Руководство по приборам и методам наблюдений

Том I – Измерения метеорологических переменных

Издание 2021 г.

ПОГОДА КЛИМАТ ВОДА

ВСЕМИРНАЯ
МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКАЯ
ОРГАНИЗАЦИЯ

ВМО-№ 8

Руководство по приборам и методам наблюдений

Том I – Измерения метеорологических переменных

Издание 2021 г.

ВСЕМИРНАЯ
МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКАЯ
ОРГАНИЗАЦИЯ

ВМО-№ 8

РЕДАКТОРСКОЕ ПРИМЕЧАНИЕ

Терминологическая база данных ВМО «МЕТЕОТЕРМ» доступна по адресу: https://public.wmo.int/ru/meteoterm.

Читателям, копирующим гиперссылки, выделяя их в тексте, следует учесть, что могут появиться дополнительные пробелы, непосредственно следующие за http://, https://, ftp://, mailto:, а также за наклонными чертами (/), дефисами (-), точками (.) и неразрывными последовательностями символов (букв и цифр). Эти пробелы должны быть удалены из вставленного URL. Правильный URL отображается на экране, если навести курсор на ссылку или нажать на нее, а затем скопировать ее из браузера.

ВМО-№ 8

© Всемирная метеорологическая организация, 2021

Право на опубликование в печатной, электронной или какой-либо иной форме на каком-либо языке сохраняется за ВМО. Небольшие выдержки из публикаций ВМО могут воспроизводиться без разрешения при условии четкого указания источника в полном объеме. Корреспонденцию редакционного характера и запросы в отношении частичного или полного опубликования, воспроизведения или перевода настоящей публикации следует направлять по адресу:

Chair, Publications Board
World Meteorological Organization (WMO)
7 bis, avenue de la Paix
P.O. Box 2300
CH-1211 Geneva 2, Switzerland

Тел.: +41 (0) 22 730 84 03
Факс: +41 (0) 22 730 81 17
Э-почта: publications@wmo.int

ISBN 978-92-63-40008-6

ПРИМЕЧАНИЕ

Обозначения, употребляемые в публикациях ВМО, а также изложение материала в настоящей публикации не означают выражения со стороны ВМО какого бы то ни было мнения в отношении правового статуса какой-либо страны, территории, города или района, или их властей, а также в отношении делимитации их границ.

Упоминание отдельных компаний или какой-либо продукции не означает, что они одобрены или рекомендованы ВМО и что им отдается предпочтение перед другими аналогичными, но не упомянутыми или не прорекламированными компаниями или продукцией.

ТАБЛИЦА РЕГИСТРАЦИИ ВНЕСЕННЫХ ИЗМЕНЕНИЙ

Дата	*Часть/ глава/ раздел*	*Цель внесения изменения*	*Предложено*	*Утверждено*

СОДЕРЖАНИЕ

Стр.

ПРЕДИСЛОВИЕ . . . . . **xxi**

ГЛАВА 1. ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ **1**
1.1 Метеорологические наблюдения 1
1.1.1 Общие сведения 1
1.1.2 Репрезентативность 2
1.1.3 Метаданные 3
1.2 Системы метеорологических наблюдений 4
1.3 Общие требования к метеорологической станции 4
1.3.1 Автоматические метеорологические станции 5
1.3.2 Наблюдатели 5
1.3.3 Размещение и установка приборов 6
1.3.3.1 Выбор места размещения 6
1.3.3.2 Координаты станции 8
1.3.3.3 Эксплуатация оборудования в экстремальных условиях окружающей среды 9
1.3.4 Замены приборного обеспечения и однородность показаний приборов . 9
1.3.5 Инспекция и обслуживание 10
1.3.5.1 Инспекция станций 10
1.3.5.2 Обслуживание 10
1.4 Общие требования к приборам 11
1.4.1 Желательные характеристики 11
1.4.2 Воздействие Минаматской конвенции 12
1.4.3 Механические самописцы 12
1.5 Эталоны измерений, прослеживаемость и единицы измерения 13
1.5.1 Определения эталонов измерений 13
1.5.2 Обеспечение прослеживаемости 15
1.5.3 Условные обозначения, единицы измерения и константы 16
1.5.3.1 Условные обозначения и единицы измерения 16
1.5.3.2 Константы 17
1.6 Погрешность измерений 18
1.6.1 Метеорологические измерения 18
1.6.1.1 Общие сведения 18
1.6.1.2 Определения измерений и погрешностей измерений 18
1.6.1.3 Характеристики приборов 20
1.6.2 Источники и оценки погрешности 21
1.6.3 Погрешности измерения одного прибора 22
1.6.3.1 Статистические распределения данных наблюдений 23
1.6.3.2 Оценка действительного значения 24
1.6.3.3 Выражение погрешности 26
1.6.3.4 Измерения дискретных значений 26
1.6.4 Требования к точности 27
1.6.4.1 Общие сведения 27
1.6.4.2 Требуемая и достижимая эффективность 27

Приложение 1.A. Требования к оперативной погрешности измерений и рабочим характеристикам приборов 29

Приложение 1.B. Стратегия обеспечения прослеживаемости 40

Приложение 1.C. Региональные центры по приборам 48

Приложение 1.D. Классификации размещения площадок для станций приземных наблюдений на суше 50

Приложение 1.E. Эксплуатация оборудования в экстремальных условиях 64

Приложение 1.F. Описание установки станции 88

Стр.

Приложение 1.G. Классификации качества измерений для наземных станций приземных наблюдений 90

Справочная и дополнительная литература 99

ГЛАВА 2. ИЗМЕРЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ 101
2.1 Общие сведения 101
2.1.1 Определение 101
2.1.2 Единицы измерения и шкалы 101
2.1.3 Метеорологические требования 102
2.1.3.1 Общие сведения 102
2.1.3.2 Погрешность измерений 102
2.1.3.3 Инерционность 103
2.1.3.4 Регистрация условий, в которых производятся измерения 103
2.1.4 Методы измерений и наблюдений 103
2.1.4.1 Общие принципы измерений 104
2.1.4.2 Общие требования к размещению 105
2.1.4.3 Источники погрешностей — общие замечания 106
2.1.4.4 Уход за приборами — общие положения 107
2.1.4.5 Последствия Минаматской конвенции с точки зрения измерения температуры 108
2.2 Электрические термометры 108
2.2.1 Общее описание 108
2.2.1.1 Металлические термометры сопротивления 108
2.2.1.2 Термисторы 110
2.2.1.3 Термопары 112
2.2.2 Порядок проведения измерений 114
2.2.2.1 Электрические термометры сопротивления 114
2.2.2.2 Термопары 115
2.2.3 Размещение и установка 116
2.2.4 Источники ошибки 116
2.2.4.1 Электрические термометры сопротивления 116
2.2.4.2 Термопары 117
2.2.5 Сравнение и калибровка 117
2.2.5.1 Электрические термометры сопротивления 117
2.2.5.2 Термопары 118
2.2.6 Поправки 118
2.2.7 Обслуживание 119
2.3 Жидкостные стеклянные термометры 119
2.3.1 Общие положения 120
2.3.1.1 Обычные (станционные) термометры 121
2.3.1.2 Максимальные термометры 121
2.3.1.3 Минимальные термометры 121
2.3.1.4 Почвенные термометры 122
2.3.2 Порядок проведения измерений 122
2.3.2.1 Снятие показаний обычных термометров 122
2.3.2.2 Измерение минимальной температуры воздуха в травостое 123
2.3.3 Размещение и установка термометров 123
2.3.4 Источники погрешностей жидкостных стеклянных термометров 123
2.3.4.1 Погрешности упругости 124
2.3.4.2 Погрешности, вызываемые капиллярной трубкой термометра . . 124
2.3.4.3 Ошибки параллакса и грубые ошибки при снятии показаний . . . 124
2.3.4.4 Погрешности, обусловленные различным расширением 125
2.3.4.5 Погрешности спиртовых термометров 125
2.3.5 Сравнение и калибровка в лабораторных условиях и в условиях эксплуатации 125
2.3.5.1 Калибровка в лабораторных условиях 125
2.3.5.2 Проверка в полевых условиях 126

Стр.

2.3.6 Поправки . . . 127
2.3.7 Обслуживание . . . 127
2.3.7.1 Разрыв столбика жидкости . . . 127
2.3.7.2 Нечеткость шкалы . . . 128
2.3.8 Безопасность . . . 128
2.4 Механические термографы . . . 128
2.4.1 Общие положения . . . 128
2.4.1.1 Биметаллический термограф . . . 128
2.4.1.2 Термограф с трубкой Бурдона . . . 129
2.4.2 Порядок проведения измерений . . . 129
2.4.3 Размещение и установка . . . 129
2.4.4 Источники погрешностей . . . 129
2.4.5 Сравнение и калибровка . . . 129
2.4.5.1 Калибровка в лабораторных условиях . . . 129
2.4.5.2 Сравнение в условиях эксплуатации . . . 130
2.4.6 Поправки . . . 130
2.4.7 Обслуживание . . . 130
2.5 Радиационные защиты . . . 130
2.5.1 Жалюзийные будки . . . 131
2.5.2 Другие искусственно вентилируемые средства защиты . . . 132
2.6 Обеспечение прослеживаемости и калибровка . . . 133

Приложение. Определение реперных точек международной температурной шкалы, принятой в 1990 году . . . 135

Справочная и дополнительная литература . . . 136

ГЛАВА 3. ИЗМЕРЕНИЕ АТМОСФЕРНОГО ДАВЛЕНИЯ . . . 139
3.1 Общие сведения . . . 139
3.1.1 Определение . . . 139
3.1.2 Единицы измерения и шкалы . . . 139
3.1.3 Метеорологические требования . . . 139
3.1.4 Методы измерений и наблюдений . . . 140
3.1.4.1 Общие принципы измерений . . . 140
3.1.4.2 Общие требования к размещению . . . 141
3.1.4.3 Источники погрешностей: общие замечания . . . 141
3.1.4.4 Уход за приборами: общие положения . . . 142
3.1.4.5 Последствия Минаматской конвенции с точки зрения измерения давления . . . 143
3.2 Электронные барометры . . . 143
3.2.1 Емкостные датчики с переменной емкостью на основе интегральных схем . . . 144
3.2.2 Цифровые пьезорезистивные барометры . . . 144
3.2.3 Вибрационно-частотные барометры . . . 145
3.2.4 Деформационные датчики с детекторами смещения . . . 145
3.2.5 Размещение электронных барометров . . . 145
3.2.6 Снятие показаний электронных барометров . . . 146
3.2.7 Источники ошибки . . . 146
3.2.7.1 Смещение в период между калибровками . . . 146
3.2.7.2 Температура . . . 146
3.2.7.3 Электрические помехи . . . 147
3.2.7.4 Характер работы . . . 147
3.3 Барометры-анероиды . . . 147
3.3.1 Требования к конструкции . . . 147
3.3.2 Достижимая погрешность измерения . . . 148
3.3.3 Размещение барометров-анероидов . . . 148
3.3.4 Снятие показаний барометров-анероидов . . . 148
3.3.4.1 Точность снятия показаний . . . 148
3.3.4.2 Приведения, применяемые к барометрам . . . 148

Стр.

3.3.5 Источники ошибки. . . . 149
3.3.5.1 Неполная компенсация на температуру 149
3.3.5.2 Погрешности упругости 149
3.4 Барографы 149
3.4.1 Общие требования 149
3.4.2 Устройство барографов 150
3.4.3 Размещение барографов 150
3.4.4 Источники ошибки. . . . 151
3.4.5 Снятие показаний барографа 151
3.4.5.1 Точность снятия показаний 151
3.4.5.2 Поправки, вводимые в показания барографа 151
3.4.5 Транспортировка 151
3.5 Изменение давления и барическая тенденция 151
3.5.1 Барическая тенденция и характеристика барической тенденции 151
3.5.2 Измерение барической тенденции 152
3.6 Обеспечение прослеживаемости и калибровка 152
3.6.1 Замечания общего характера 152
3.6.2 Лабораторная калибровка 152
3.6.2.1 Общепринятая установка оборудования 153
3.6.2.2 Лабораторные эталонные приборы 154
3.6.2.3 Метод калибровки 157
3.6.3 Инспекции в полевых условиях 158
3.7 Приведение показаний барометра к эталонному и другим уровням 159
3.7.1 Стандартные уровни 159
3.7.2 Общая формула приведения 159
3.7.3 Формула приведения для станций, расположенных на небольшой высоте 160

Приложение 3.A. Методы измерения с помощью ртутных барометров 161

Приложение 3.B. Приведение показаний ртутного барометра к стандартным условиям 171

Справочная и дополнительная литература 175

ГЛАВА 4. ИЗМЕРЕНИЕ ВЛАЖНОСТИ 176
4.1 Общие сведения 176
4.1.1 Определения 176
4.1.2 Единицы измерения. . . . 177
4.1.3 Метеорологические потребности 177
4.1.4 Методы измерений и наблюдений. . . . 177
4.1.4.1 Обзор общих принципов измерений 178
4.1.4.4 Уход за приборами: общие положения 181
4.1.5 Последствия Минаматской конвенции с точки зрения измерения влажности 182
4.2 Электрические емкостные гигрометры 183
4.2.1 Соображения общего характера 183
4.2.2 Электрический емкостный гигрометр 183
4.2.3 Процедура наблюдений 184
4.2.4 Размещение и установка 184
4.2.5 Источники ошибки. . . . 184
4.2.6 Калибровка и инспекция в полевых условиях 185
4.2.7 Обслуживание 186
4.3 Психрометр 187
4.3.1 Соображения общего характера 187
4.3.1.1 Психрометрические формулы 187
4.3.1.2 Спецификация психрометра 187
4.3.1.3 Обвязка из ткани для смоченного термометра 188

Стр.

4.3.1.4 Работа со смоченным термометром при температуре ниже точки инея . . . 188
4.3.1.5 Общая процедура проведения наблюдений . . . 190
4.3.1.6 Использование электрических термометров сопротивления . . . 190
4.3.1.7 Психрометрические формулы и таблицы . . . 190
4.3.1.8 Источники погрешностей в психрометрии . . . 191
4.3.2 Психрометр Ассмана и другие аспирационные психрометры . . . 192
4.3.2.1 Описание . . . 192
4.3.2.2 Процедура наблюдения . . . 193
4.3.2.3 Размещение и установка прибора . . . 194
4.3.2.4 Калибровка . . . 194
4.3.2.5 Обслуживание . . . 195
4.3.3 Психрометр в жалюзийном метеорологическом экране (будке) . . . 195
4.3.3.1 Описание . . . 196
4.2.3.2 Процедура наблюдений . . . 196
4.3.3.3 Размещение и установка прибора . . . 197
4.3.3.4 Калибровка . . . 197
4.3.3.5 Обслуживание . . . 197
4.3.4 Пращевые психрометры . . . 197
4.3.4.1 Описание . . . 197
4.3.4.2 Процедура наблюдений . . . 198
4.4 Гигрометр точки росы с охлаждаемым зеркалом . . . 198
4.4.1 Общие сведения . . . 198
4.4.1.1 Теория . . . 198
4.4.1.2 Принципы . . . 198
4.4.2 Описание . . . 199
4.4.2.1 Устройство датчика . . . 199
4.4.2.2 Устройство оптического обнаружения . . . 199
4.4.2.3 Устройство регулирования температуры . . . 200
4.4.2.4 Система визуального отображения температуры . . . 200
4.4.2.5 Формат прибора . . . 201
4.4.2.6 Вспомогательные системы . . . 201
4.4.3 Процедура наблюдения . . . 201
4.4.4 Размещение и установка прибора . . . 202
4.4.5 Калибровка и инспекция в полевых условиях . . . 203
4.4.5.1 Калибровка . . . 203
4.4.5.2 Инспекция в полевых условиях . . . 204
4.5 Гигрометры, основанные на поглощении электромагнитного излучения . . . 204
4.6 Волосной гигрограф . . . 205
4.6.1 Общие соображения . . . 205
4.6.2 Описание . . . 206
4.6.3 Процедура наблюдений . . . 206
4.6.4 Размещение и установка . . . 207
4.6.5 Источники ошибки . . . 207
4.6.5.1 Смещение нуля . . . 207
4.6.5.2 Погрешности, обусловленные загрязнением волоса . . . 207
4.6.5.3 Гистерезис . . . 207
4.6.6 Калибровка и инспекция в полевых условиях . . . 207
4.6.7 Обслуживание . . . 208
4.7 Обеспечение прослеживаемости и калибровка . . . 208
4.7.1 Принципы калибровки гигрометров . . . 208
4.7.2 Первичные эталоны . . . 210
4.7.2.1 Гравиметрическая гигрометрия . . . 210
4.7.2.2 Динамический эталонный генератор влажности с использованием двух давлений . . . 210
4.7.2.3 Динамический эталонный генератор влажности с использованием двух температур . . . 210
4.7.3 Вторичные эталоны . . . 211
4.7.4 Рабочие эталоны (и образцовые приборы для полевых условий) . . . 211

Стр.

4.7.5 Растворы солей . . . 211
4.7.6 Методы калибровки . . . 213
4.7.6.1 Замечания общего характера . . . 213
4.7.6.2 Лабораторная калибровка . . . 213
4.7.6.3 Полевая калибровка . . . 214
4.8 Постоянные времени, защитные фильтры и безопасность . . . 215
4.8.1 Постоянные времени датчиков влажности . . . 215
4.8.2 Защитные фильтры . . . 215
4.8.3 Безопасность . . . 216

Приложение 4.A. Водяной пар в атмосфере — термины и определения . . . 218

Приложение 4.B. Формулы для расчета характеристик влажности . . . 222

Приложение 4.C. Инструменты и методы, которые имеют ограниченное применение или более не применяются . . . 224

Справочная и дополнительная литература . . . 230

ГЛАВА 5. ИЗМЕРЕНИЕ ПРИЗЕМНОГО ВЕТРА . . . 231
5.1 Общие сведения . . . 231
5.1.1 Определения . . . 231
5.1.2 Единицы и шкалы измерения . . . 232
5.1.3 Метеорологические требования . . . 232
5.1.4 Методы измерения и наблюдения . . . 233
5.2 Визуальная оценка ветра . . . 233
5.2.1 Скорость ветра . . . 235
5.2.2 Направление ветра . . . 236
5.2.3 Пульсации ветра . . . 236
5.3 Простые методы инструментальных наблюдений . . . 236
5.3.1 Скорость ветра . . . 236
5.3.2 Направление ветра . . . 236
5.4 Чашечные и крыльчатые анемометры . . . 236
5.5 Флюгеры для измерения направления ветра . . . 237
5.6 Другие приборы для измерения ветра . . . 238
5.7 Датчики и их комбинации для измерения составляющих ветра . . . 239
5.8 Методы обработки данных . . . 239
5.8.1 Осреднение . . . 239
5.8.2 Максимальные порывы и средние квадратические отклонения . . . 240
5.8.3 Рекомендации по конструированию систем для измерения ветра . . . 242
5.9 Размещение приборов для наблюдения за ветром . . . 243
5.9.1 Общее описание проблем . . . 243
5.9.2 Размещение анемометров над сушей . . . 243
5.9.3 Размещение анемометров на море . . . 245
5.9.4 Корректировка данных с учетом размещения датчиков . . . 245
5.10 Калибровка и обслуживание . . . 247

Приложение. Интегральный параметр шероховатости . . . 249

Справочная и дополнительная литература . . . 251

ГЛАВА 6. ИЗМЕРЕНИЕ КОЛИЧЕСТВА ОСАДКОВ . . . 253
6.1 Общие сведения . . . 253
6.1.1 Определения . . . 253
6.1.2 Единицы измерения . . . 254
6.1.3 Метеорологические и гидрологические требования . . . 254
6.1.4 Методы измерений . . . 254
6.1.4.1 Приборы . . . 254
6.1.4.2 Эталонные осадкомеры и взаимные сравнения . . . 255
6.1.4.3 Документация . . . 256

Стр.

6.2 Размещение и установка . . . 257
6.3 Нерегистрирующие осадкомеры . . . 258
6.3.1 Обычные осадкомеры . . . 258
6.3.1.1 Приборы . . . 258
6.3.1.2 Эксплуатация . . . 260
6.3.1.3 Калибровка и техническое обслуживание . . . 260
6.3.2 Суммарные осадкомеры . . . 260
6.4 Погрешности и поправки при измерении количества осадков . . . 261
6.5 Плювиографы . . . 265
6.5.1 Весовой плювиограф . . . 266
6.5.1.1 Приборы . . . 266
6.5.1.2 Погрешности и поправки . . . 266
6.5.1.3 Калибровка и техническое обслуживание . . . 267
6.5.2 Плювиограф с самоопорожняющимся контейнером . . . 268
6.5.2.1 Приборы . . . 268
6.5.2.2 Погрешности и поправки . . . 269
6.5.2.3 Калибровка и техническое обслуживание . . . 271
6.5.3 Поплавковый плювиограф . . . 271
6.5.4 Другие приборы для измерения осадков . . . 272
6.6 Измерение росы, отложения льда и осадков в виде тумана . . . 272
6.6.1 Измерение росы и увлажненности листа . . . 272
6.6.2 Измерение отложения льда . . . 274
6.6.2.1 Методы измерений . . . 274
6.6.2.2 Лед на дорожном покрытии . . . 275
6.6.3 Измерение осадков в виде тумана . . . 276

Приложение 6.A. Стандартный эталонный осадкомер ямочного типа . . . 278

Приложение 6.B. Станции проведения взаимных сравнений измерений осадков . . . 280

Приложение 6.C. Стандартизированная процедура для лабораторной калибровки приборов накопительного типа, измеряющих интенсивность дождя . . . 281

Приложение 6.D. Предложенные процедуры коррекции для измерений осадков . . . 285

Приложение 6.E. Процедура для калибровки в полевых условиях приборов накопительного типа, измеряющих интенсивность дождя . . . 286

Справочная и дополнительная литература . . . 288

ГЛАВА 7. ИЗМЕРЕНИЕ РАДИАЦИИ . . . 291
7.1 Общие сведения . . . 291
7.1.1 Определения . . . 291
7.1.2 Единицы и шкалы . . . 292
7.1.2.1 Единицы . . . 292
7.1.2.2 Стандартизация . . . 292
7.1.3 Метеорологические требования . . . 294
7.1.3.1 Данные для составления отчетности . . . 294
7.1.3.2 Погрешность . . . 294
7.1.3.3 Частота проведения наблюдений и регистрация данных . . . 294
7.1.3.4 Время наблюдений . . . 295
7.1.4 Методы измерений . . . 295
7.2 Измерения прямой солнечной радиации . . . 297
7.2.1 Прямая солнечная радиация . . . 298
7.2.1.1 Основные эталонные пиргелиометры . . . 299
7.2.1.2 Вторичные эталонные пиргелиометры . . . 300
7.2.1.3 Полевые и сетевые пиргелиометры . . . 301
7.2.1.4 Калибровка пиргелиометров . . . 302
7.2.2 Экспонирование . . . 302

Стр.

7.3 Измерение суммарной и рассеянной радиации 303
7.3.1 Калибровка пиранометров 303
7.3.1.1 Поверка по эталонному пиргелиометру и затеняемому эталонному пиранометру 306
7.3.1.2 Поверка по эталонному пиргелиометру 306
7.3.1.3 Поочередная калибровка двух пиранометров с использованием пиргелиометра 307
7.3.1.4 Сравнения с эталонным пиранометром 308
7.3.1.5 Сравнения в лабораторных условиях 308
7.3.1.6 Регулярный контроль калибровочных коэффициентов 309
7.3.2 Характеристики пиранометров 309
7.3.2.1 Установка датчика в горизонтальном положении 310
7.3.2.2 Изменение чувствительности, обусловленное колебаниями температуры окружающей среды 310
7.3.2.3 Изменение чувствительности в зависимости от ориентации 310
7.3.2.4 Изменение чувствительности в зависимости от угла падения солнечных лучей 310
7.3.2.5 Погрешности определения часовых и суточных сумм 311
7.3.3 Установка и техническое обслуживание пиранометров 311
7.3.3.1 Поправки на закрытость горизонта 312
7.3.3.2 Установка пиранометров для измерения суммарной радиации 312
7.3.3.3 Установка пиранометров для измерения рассеянной радиации 313
7.3.3.4 Установка пиранометров для измерения отраженной радиации 314
7.3.3.5 Техническое обслуживание пиранометров 314
7.3.3.6 Установка и техническое обслуживание пиранометров на специальных платформах 314
7.4 Измерение интегральной и длинноволновой радиации 315
7.4.1 Приборы для измерения длинноволновой радиации 315
7.4.2 Приборы для измерения суммарной радиации 319
7.4.3 Калибровка пиргеометров 320
7.4.4 Установка пиррадиометров и пиргеометров 321
7.4.5 Регистрация и преобразование данных 322
7.5 Измерение специальных радиационных параметров 322
7.5.1 Измерение дневной освещенности 322
7.5.1.1 Приборы 324
7.5.1.2 Поверка 324
7.5.1.3 Регистрация и преобразование данных 325
7.6 Измерение ультрафиолетового излучения 325
7.6.1 Приборы 328
7.6.1.1 Широкополосные датчики 328
7.6.1.2 Узкополосные датчики 329
7.6.1.3 Спектрорадиометры 331
7.6.2 Калибровка 332

Приложение 7.A. Номенклатура актинометрических и фотометрических величин 334

Приложение 7.B. Метеорологические радиационные величины, символы и определения 336

Приложение 7.C. Установленные требования для мировых, региональных и национальных радиационных центров 338

Приложение 7.D. Используемые формулы 342

Приложение 7.E. Рассеянная радиация — поправка на затеняющее кольцо 345

Приложение 7.F. Управление и прослеживаемость атмосферного длинноволнового излучения 347

Справочная и дополнительная литература 348

Стр.

ГЛАВА 8. ИЗМЕРЕНИЕ ПРОДОЛЖИТЕЛЬНОСТИ СОЛНЕЧНОГО СИЯНИЯ 350
8.1 Общие сведения 350
8.1.1 Определение 350
8.1.2 Единицы и шкалы 351
8.1.3 Метеорологические требования 351
8.1.3.1 Использование данных о продолжительности солнечного сияния 351
8.1.3.2 Корреляция с другими метеорологическими параметрами 352
8.1.3.3 Требования к автоматической регистрации 352
8.1.4 Методы измерения 352
8.2 Приборы и датчики 354
8.2.1 Пиргелиометрический метод 354
8.2.1.1 Общие сведения 354
8.2.1.2 Источники погрешностей 354
8.2.2 Пиранометрический метод 354
8.2.2.1 Общие сведения 354
8.2.2.2 Источники погрешностей 356
8.2.3 Регистратор солнечного сияния Кэмпбелла-Стокса (метод прожигания) 356
8.2.3.1 Настройка 356
8.2.3.2 Оценка данных 357
8.2.3.3 Специальные модификации прибора 358
8.2.3.4 Источники погрешностей 358
8.2.4 Приборы для оценки контраста 358
8.2.5 Приборы для оценки контраста и сканирующие приборы 358
8.2.5.1 Общие сведения 358
8.2.5.2 Источники погрешностей 359
8.3 Установка приемников солнечного сияния 359
8.4 Общие источники погрешностей 360
8.5 Калибровка 360
8.5.1 Методы калибровки 361
8.5.1.1 Сравнение данных о продолжительности солнечного сияния 361
8.5.1.2 Сравнение аналоговых сигналов 361
8.5.1.3 Метод определения среднего эффективного порога солнечной радиации (MEIT) 362
8.5.2 Метод калибровки в лаборатории 362
8.6 Техническое обслуживание 363

Приложение 8.A. Алгоритм вычисления продолжительности солнечного сияния на основе измерений прямой суммарной солнечной радиации 364

Приложение 8.B. Алгоритм вычисления продолжительности солнечного сияния на основе 1-минутных измерений суммарной солнечной радиации 365

Справочная и дополнительная литература 367

ГЛАВА 9. ИЗМЕРЕНИЕ ВИДИМОСТИ 369
9.1 Общие сведения 369
9.1.1 Определения 369
9.1.2 Единицы измерения и шкалы 370
9.1.3 Метеорологические требования 371
9.1.4 Методы измерения 372
9.2 Визуальная оценка метеорологической оптической дальности 375
9.2.1 Общие сведения 375
9.2.2 Оценка метеорологической оптической дальности в дневное время 376
9.2.3 Оценка метеорологической оптической дальности в ночное время 376
9.2.4 Оценка метеорологической оптической дальности при отсутствии удаленных объектов 378
9.2.5 Точность визуальных наблюдений 379
9.2.6 Использование передающих камер 380

Стр.

9.3 Инструментальные измерения метеорологической оптической дальности 380
9.3.1 Общие сведения 380
9.3.2 Приборы для измерения коэффициента ослабления 381
9.3.3 Инструменты для оценки коэффициента рассеяния 383
9.3.4 Выбор места и установка приборов 386
9.3.5 Калибровка и техническое обслуживание приборов 386
9.3.5.1 Техническое обслуживание 387
9.3.5.2 Калибровка 387
9.3.6 Оценки точности измерения метеорологического оптического диапазона 391
9.3.6.1 Общие сведения 391
9.3.6.2 Точность трансмиссометров 392
9.3.6.3 Точность измерителей рассеяния 393
9.3.6.4 Точность телефотометров и визуальных фотометров 393

Справочная и дополнительная литература 394

ГЛАВА 10. ИЗМЕРЕНИЕ ИСПАРЕНИЯ 395
10.1 Общие сведения 395
10.1.1 Определения 395
10.1.2 Единицы измерения 395
10.1.3 Метеорологические требования 395
10.1.4 Методы измерения 396
10.2 Атмометры 397
10.2.1 Виды приборов 397
10.2.2 Измерение с помощью атмометров 397
10.2.3 Источники ошибки в атмометрах 398
10.3 Испарители и испарительные бассейны 398
10.3.1 Испаритель класса А (США) 398
10.3.2 Испаритель ГГИ-3000 (Россия) 399
10.3.3 Испарительный бассейн площадью 20 м^2 (Россия) 399
10.3.4 Измерения с помощью испарителей и испарительных бассейнов 399
10.3.5 Размещение испарителей и испарительных бассейнов 400
10.3.6 Источники ошибки в испарителях и испарительных бассейнах 400
10.3.7 Обслуживание испарителей и испарительных бассейнов 401
10.4 Измерители суммарного испарения (лизиметры) 402
10.4.1 Измерение с помощью лизиметра 403
10.4.2 Размещение измерителей суммарного испарения 403
10.4.3 Источники ошибки в измерениях с помощью лизиметров 404
10.4.4 Обслуживание лизиметров 405
10.5 Оценка испарения с естественных поверхностей 405

Справочная и дополнительная литература 408

ГЛАВА 11. ИЗМЕРЕНИЕ ВЛАЖНОСТИ ПОЧВЫ 409
11.1 Общие сведения 409
11.1.1 Определения 409
11.1.2 Единицы измерения 411
11.1.3 Метеорологические требования 411
11.1.4 Методы измерения 412
11.2 Прямое гравиметрическое измерение содержания влаги в почве 413
11.3 Содержание влаги в почве: косвенные методы 414
11.3.1 Радиологические методы 414
11.3.1.1 Метод рассеяния нейтронов 415
11.3.1.2 Ослабление гамма-излучения 416
11.3.2 Диэлектрические постоянные системы почва–вода 416
11.3.2.1 Динамическая рефлектометрия 417
11.3.2.2 Измерение частотного диапазона 417

Стр.

11.4 Приборы для измерения потенциала влажности почвы 418
11.4.1 Тензиометры 418
11.4.2 Блоки электрического сопротивления 419
11.4.3 Психрометры 420
11.5 Выбор места и размер пробы 420
11.6 Дистанционное зондирование влажности почвы 421
11.6.1 Микроволновое дистанционное зондирование 422
11.6.1.1 Введение 422
11.6.1.2 Многочастотные радиометры 423
11.6.1.3 Скаттерометры 425
11.6.1.4 Радиолокаторы с синтезированной апертурой 425
11.6.1.5 Специализированные спутники с использованием L-полосы частот 426
11.6.1.6 Получение данных о влажности почвы 426
11.6.2 Дистанционное зондирование в тепловом инфракрасном диапазоне 429

Справочная и дополнительная литература 431

ГЛАВА 12. АЭРОЛОГИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ ДАВЛЕНИЯ, ТЕМПЕРАТУРЫ И ВЛАЖНОСТИ 435
12.1 Общие сведения 435
12.1.1 Определения 435
12.1.2 Единицы, используемые при аэрологических измерениях 436
12.1.3 Метеорологические требования 436
12.1.3.1 Радиозондовые данные для метеорологического обеспечения . . 436
12.1.3.2 Взаимосвязь между спутниковыми и радиозондовыми аэрологическими измерениями 440
12.1.3.3 Максимальная высота радиозондовых наблюдений 441
12.1.4 Требования к точности 441
12.1.4.1 Геопотенциальная высота: требования и точность измерения . . 443
12.1.4.2 Температура: требования и точность измерений 443
12.1.4.3 Относительная влажность: требования и точность измерений . . 444
12.1.5 Методы измерения 444
12.1.5.1 Ограничивающие факторы при проектировании радиозондов . 444
12.1.5.2 Радиочастоты, используемые для передач с радиозондов 445
12.1.6 Погрешности радиозондовых измерений: общие сведения 446
12.1.6.1 Типы погрешностей 446
12.1.6.2 Потенциальные стандартные значения 447
12.1.6.3 Источники дополнительных ошибок во время функционирования радиозондов 448
12.2 Радиозондовые электронные средства 449
12.2.1 Общие характеристики 449
12.2.2 Источники питания для радиозондов 449
12.2.3 Методы передачи данных 450
12.2.3.1 Радиопередатчик 450
12.3 Датчики давления (включая измерения высоты) 450
12.3.1 Общие аспекты 450
12.3.2 Анероидные коробки 451
12.3.3 Анероидные коробки (емкостные) 451
12.3.4 Кремниевые датчики 452
12.3.5 Погрешности датчиков давления 453
12.3.5.1 Соотношение погрешностей в значениях геопотенциальной высоты и погрешностей в значениях давления 454
12.3.6 Использование геометрической высоты вместо данных датчика давления 456
12.3.6.1 Общие сведения 456
12.3.6.2 Метод расчета 456

Стр.

12.3.7. Источники погрешностей при прямом измерении высоты 458
12.3.7.1 При определении геометрической высоты с помощью ГСОМ . . . 458
12.3.7.2 При радиолокационных наблюдениях за высотой 459
12.4 Датчики температуры 460
12.4.1 Основные требования 460
12.4.2 Термисторы 462
12.4.3 Термоконденсаторы 462
12.4.4 Термопары 462
12.4.5 Научные приборы зондирования 462
12.4.6 Размещение датчиков 463
12.4.7 Погрешности измерения температуры 464
12.4.7.1 Калибровка 464
12.4.7.2 Тепловая инерция 465
12.4.7.3 Теплообмен в инфракрасной области спектра 465
12.4.7.4 Разогрев солнечной радиацией 466
12.4.7.5 Осаждение льда или воды на датчике 469
12.4.7.6 Вопросы репрезентативности 469
12.5 Датчики относительной влажности 469
12.5.1 Общие аспекты 469
12.5.2 Емкостные тонкопленочные датчики 475
12.5.3 Угольные гигристоры 476
12.5.4 Датчики из животной пленки 476
12.5.5 Научные приборы зондирования 477
12.5.6 Размещение датчиков 478
12.5.7 Погрешности измерений относительной влажности 479
12.5.7.1 Общие аспекты 479
12.5.7.2 Относительная влажность в ночное время для температур выше –20 °C 480
12.5.7.3 Относительная влажность в дневное время для температур выше –20 °C 482
12.5.7.4 Относительная влажность в ночное время для температур от –20 до –50 °C 484
12.5.7.5 Относительная влажность в дневное время для температур от –20 до –50 °C 484
12.5.7.6 Относительная влажность в ночное время для температур от –50 до –70 °C 485
12.5.7.7 Относительная влажность в дневное время для температур от –50 до –70 °C 487
12.5.7.8 Увлажнение или обледенение в облаке 489
12.5.7.9 Вопросы репрезентативности 489
12.6 Оборудование наземной станции 489
12.6.1 Общие характеристики 489
12.6.2 Программное обеспечение для обработки данных 490
12.7 Эксплуатация радиозондов 491
12.7.1 Контрольное внесение корректирующих поправок непосредственно перед использованием 491
12.7.2 Методы запуска радиозондов 492
12.7.3 Процедуры запуска радиозонда 492
12.7.4 Подвеска радиозонда во время полета 493
12.7.5 Безопасность населения 494
12.8 Сравнение, калибровка и обслуживание 494
12.8.1 Сравнения 494
12.8.1.1 Оценка качества с использованием краткосрочных прогнозов . . 495
12.8.1.2 Оценка качества с использованием временных рядов данных об атмосфере 496
12.8.1.3 Сравнение данных измерений водяного пара и дистанционного зондирования 496
12.8.1.4 Сравнения радиозондов 497

Стр.

12.8.2 Калибровка 498
12.8.3 Техническое обслуживание и ремонт 499
12.9 Вычисления и результаты измерений 499
12.9.1 Процедуры вычислений и представления результатов радиозондовых измерений 500
12.9.2 Внесение поправок 501
12.10 Вопросы, связанные с закупками 502
12.10.1 Использование и обновление результатов, полученных во взаимном сравнении высококачественных систем радиозондирования ВМО 502
12.10.2 Некоторые вопросы, которые необходимо учитывать при закупках 502

Приложение 12.A. Современные требования к перспективной и оптимальной точности радиозондовых измерений 505

Приложение 12.B. Оценки целевой, перспективной и пороговой точности измерений ветра и температуры на высотах, относительной влажности и геопотенциальной высоты (на основе регулярного обзора потребностей ВМО в аэрологических наблюдениях) 507

Приложение 12.C. Безопасные для окружающей среды радиозонды 512

Приложение 12.D. Рекомендации по организации сравнений радиозондов и учреждению центров проведения испытаний 514

Справочная и дополнительная литература 522

ГЛАВА 13. ИЗМЕРЕНИЕ ВЕТРА НА ВЫСОТАХ 525
13.1 Общие положения 525
13.1.1 Определения 525
13.1.2 Единицы измерения ветра на высотах 525
13.1.3 Метеорологические требования 526
13.1.3.1 Области применения в метеорологической практике 526
13.1.3.2 Усовершенствование процедур передачи сообщений 527
13.1.3.3 Требования к точности 527
13.1.3.4 Требования к максимальной высоте 530
13.1.4 Методы измерений 530
13.1.4.1 Слежение с использованием радионавигационных сигналов . . . 531
13.1.4.2 Слежение с использованием направленной антенны 532
13.2 Датчики и приборы для измерения ветра на высотах 533
13.2.1 Оптический теодолит 533
13.2.2 Радиотеодолит 534
13.2.3 Радиолокатор 535
13.2.3.1 Первичные радиолокаторы 535
13.2.3.2 Вторичные радиолокаторы 535
13.2.4 Навигационные системы слежения 536
13.2.4.1 Использование навигационных сигналов в будущем 537
13.2.4.2 Глобальная система определения местоположения 537
13.2.4.3 Цепи передатчиков «Лоран-С» 538
13.3 Методы измерений 539
13.3.1 Общие сведения, касающиеся обработки данных 539
13.3.2 Шаропилотные наблюдения 540
13.3.3 Наблюдения с использованием направленной антенны 541
13.3.4 Наблюдения с использованием радионавигационных систем 542
13.4 Размещение наземного оборудования 543
13.5 Источники ошибок 543
13.5.1 Общие положения 543
13.5.1.1 Ошибки при слежении за мишенью 543
13.5.1.2 Ошибки определения высоты 544
13.5.1.3 Движение мишени по отношению к атмосфере 544

Стр.

13.5.2 Ошибки при шаропилотных наблюдениях 545
13.5.3 Ошибки систем, в которых используется направленная антенна 545
13.5.4 Ошибки систем для измерения ветра, использующих Глобальную систему определения местоположения 548
13.5.5 Ошибки наземных радионавигационных систем «Лоран-С» 551
13.5.6 Ошибки репрезентативности 552
13.6 Сравнения, калибровка и техническое обслуживание 554
13.6.1 Сравнение 554
13.6.1.1 Оперативный мониторинг посредством сравнения с прогностическими полями 555
13.6.1.2 Сравнение с другими системами измерения ветра 555
13.6.2 Калибровка 556
13.6.3 Техническое обслуживание 556
13.7 Поправки 557

Справочная и дополнительная литература 558

ГЛАВА 14. НАБЛЮДЕНИЯ ЗА ТЕКУЩЕЙ И ПРОШЕДШЕЙ ПОГОДОЙ; СОСТОЯНИЕ ПОВЕРХНОСТИ ЗЕМЛИ 560
14.1 Общие сведения 560
14.1.1 Определения 560
14.1.2 Единицы измерений и шкалы 560
14.1.3 Метеорологические требования 561
14.1.4 Методы наблюдений 561
14.2 Наблюдение за текущей и прошедшей погодой 562
14.2.1 Осадки 562
14.2.1.1 Объекты наблюдения 562
14.2.1.2 Приборы и измерительные устройства: виды осадков 562
14.2.1.3 Приборы и измерительные устройства: интенсивность и характер осадков 565
14.2.1.4 Приборы и измерительные устройства: подход, предполагающий использование многих датчиков 566
14.2.2 Мутность атмосферы и аэрозоль 566
14.2.2.1 Объекты наблюдения 566
14.2.2.2 Приборы и измерительные устройства для определения характеристик мутности атмосферы и аэрозоля 567
14.2.3 Другие погодные явления 568
14.2.3.1 Объекты наблюдения 568
14.2.3.2 Приборы и измерительные устройства 569
14.2.4 Состояние неба 569
14.2.4.1 Объекты наблюдения 569
14.2.4.2 Приборы и измерительные устройства 569
14.3 Наблюдение за состоянием поверхности земли 569
14.3.1 Объекты наблюдения 569
14.3.2 Приборы и измерительные устройства 570
14.4 Наблюдение за особыми явлениями 571
14.4.1 Электрические явления (электрометеоры) 571
14.4.2 Оптические явления (фотометеоры) 571

Приложение. Критерии для интенсивности слабых, умеренных и сильных осадков 572

Справочная и дополнительная литература 574

ГЛАВА 15. НАБЛЮДЕНИЯ И ИЗМЕРЕНИЕ ОБЛАКОВ 577
15.1 Общие сведения 577
15.1.1 Определения 577
15.1.2 Единицы и шкалы 579
15.1.3 Метеорологические требования 579

Стр.

15.1.4 Методы наблюдения и измерения 579
15.1.4.1 Количество облаков 579
15.1.4.2 Высота нижней границы облаков 580
15.1.4.3 Тип облаков 581
15.2 Оценка и наблюдения за количеством и видами облаков, высотой нижней границы облаков, осуществляемые наблюдателем 581
15.2.1 Проведение эффективной оценки 581
15.2.2 Оценка количества облаков 581
15.2.3 Оценка высоты нижней границы облаков 582
15.2.4 Наблюдение за видами облаков 583
15.3 Инструментальное измерение количества облаков 584
15.3.1 Измерение количества облаков с помощью лазерного облакомера 584
15.3.2 Измерение количества облаков с помощью инфракрасного детектора . . . 586
15.3.3 Измерение количества облаков с помощью камеры обзора небосвода . . . 587
15.4 Инструментальные измерения высоты нижней границы облаков 587
15.4.1 Измерение высоты нижней границы облаков с помощью лазерного облакомера 588
15.4.1.1 Метод измерения 588
15.4.1.2 Размещение и установка 589
15.4.1.3 Источники погрешностей 589
15.4.1.4 Калибровка и техническое обслуживание 590
15.4.2 Измерение высоты нижней границы облаков с помощью облакомера с вращающимся лучом 591
15.4.2.1 Метод измерения 591
15.4.2.2 Размещение и установка 592
15.4.2.3 Источники погрешностей 592
15.4.2.4 Калибровка и техническое обслуживание 593
15.4.3 Измерение высоты нижней границы облаков с помощью облачного прожектора 593
15.4.3.1 Метод измерения 593
15.4.3.2 Размещение и установка 593
15.4.3.3 Источники погрешностей 594
15.4.3.4 Калибровка и техническое обслуживание 594
15.4.4 Измерение высоты нижней границы облаков с помощью шара-пилота . . . 595
15.4.4.1 Метод измерения 595
15.4.4.2 Источники погрешности 596
15.5 Инструментальное измерение форм облаков 596
15.6 Другие особенности, связанные с облаками 596
15.6.1 Вертикальная видимость 596

Справочная и дополнительная литература 597

ГЛАВА 16. ИЗМЕРЕНИЕ СОСТАВА АТМОСФЕРЫ 599
16.1 Общие сведения 599
16.1.1 Определения и описания 600
16.1.2 Единицы и шкалы 601
16.1.3 Принципы и методы измерений 603
16.1.4 Обеспечение качества 604
16.2 Измерения (стратосферного) озона 606
16.2.1 Общее содержание озона 606
16.2.2 Измерения вертикального распределения озона 608
16.2.2.1 Умкер-метод 608
16.2.2.2 Измерения с помощью озонозондов 608
16.2.2.3 Другие методы измерений 609
16.2.3 Наблюдения с помощью самолетов и спутников 609
16.3 Парниковые газы 610
16.3.1 Диоксид углерода (включая $\Delta^{14}C$, $\delta^{13}C$ и $\delta^{18}O$ в CO_2, и соотношения O_2/N_2) 610
16.3.2 Метан 612

Стр.

16.3.3 Закись азота . . . 612
16.3.4 Галогенуглероды и SF_6 . . . 613
16.3.5 Дистанционное зондирование парниковых газов . . . 613
16.4 Химически активные газы . . . 614
16.4.1 Тропосферный (приземный) озон . . . 614
16.4.2 Моноксид углерода . . . 615
16.4.3 Летучие органические соединения . . . 616
16.4.4 Оксид азота . . . 620
16.4.5 Двуокись серы . . . 622
16.4.6 Молекулярный водород . . . 622
16.5 Атмосферные влажные выпадения . . . 623
16.5.1 Отбор проб . . . 624
16.5.2 Химический анализ . . . 625
16.6 Аэрозоли . . . 628
16.6.1 Измерения химического состава аэрозолей . . . 629
16.6.2 Измерения ***in situ*** аэрозольных радиационных характеристик . . . 634
16.6.3 Численная концентрация частиц и фракционный состав . . . 635
16.6.4 Облачные ядра конденсации . . . 636
16.6.5 Оптическая плотность аэрозоля . . . 637
16.6.6 Лидарные наблюдения за аэрозолями на станциях ГСА . . . 638
16.7 Естественная радиоактивность . . . 643

Приложение. Центральные учреждения ГСА . . . 644

Справочная и дополнительная литература . . . 647

ПРЕДИСЛОВИЕ

В руководствах ВМО описываются практики и процедуры, которые Членам ВМО предлагается соблюдать или выполнять при разработке и осуществлении своих мер, направленных на обеспечение соответствия правилам Технического регламента ВМО.

Одной из давних публикаций в этой серии является Руководство по приборам и методам наблюдений (ВМО № 8), которое было впервые опубликовано в 1950 году. Постоянное развитие и стандартизация практики измерений и наблюдений, а также стремительное развитие новых методов и технологий измерений привели к превращению Руководства в значительно более крупный, фундаментальный и важный источник информации. Начиная с издания 2018 года, Руководство разделено на «тома», которые могут обновляться и публиковаться независимо друг от друга.

В общих чертах Руководство в его нынешнем виде выглядит следующим образом:

Том I — Измерения метеорологических переменных;
Том II — Измерение криосферных переменных;
Том III — Системы наблюдений;
Том IV — Космические наблюдения;
Том V — Обеспечение качества и менеджмент систем наблюдений.

Настоящее Руководство является авторитетным справочным материалом по всем вопросам, касающимся приборов и методов наблюдений в контексте Интегрированной глобальной системы наблюдений ВМО (ИГСНВ). Единообразные, прослеживаемые и высококачественные данные наблюдений представляют собой важнейший вклад для большинства применений ВМО, таких как мониторинг климата, численное прогнозирование погоды, прогнозирование текущей погоды и прогнозирование суровой погоды, которые способствуют повышению благополучия обществ во всех странах.

Основная цель Руководства состоит в том, чтобы предоставить руководящие указания в отношении наиболее эффективных практик и процедур, а также возможностей приборов и систем, которые регулярно используются для выполнения метеорологических, гидрологических и связанных с окружающей средой измерений и наблюдений для удовлетворения специфических потребностей в различных областях применения. Теоретические основы техники и методов наблюдения изложены в тексте и снабжены ссылками и списком литературы для получения дополнительной справочной информации и сведений.

Настоящее издание тома I, подготовленное в 2021 году, было утверждено на семьдесят третьей сессии (ИС 73) Исполнительного совета ВМО. По сравнению с изданием 2018 года в этом издании добавлено важное новое приложение 1.G к главе 1 «Классификация качества измерений для наземных станций приземных наблюдений».

От имени ВМО позвольте выразить мою искреннюю признательность Постоянному комитету по вопросам измерений, приборного оснащения и прослеживаемости Комиссии по наблюдениям, инфраструктуре и информационным системам, чьи колоссальные усилия сделали возможной публикацию этого нового издания.



(Петтери Таалас)
Генеральный секретарь

ГЛАВА 1. ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

1.1 МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИЕ НАБЛЮДЕНИЯ

1.1.1 Общие сведения

Метеорологические (и соответствующие экологические и геофизические) наблюдения проводятся в силу целого ряда причин. Данные таких наблюдений используются для подготовки в режиме реального времени метеорологических анализов, прогнозов и предупреждений о неблагоприятной погоде, для исследования климата, в текущей деятельности отраслей экономики, зависящих от погоды (например, обеспечение полетов воздушных судов с местных аэродромов, строительных работ на суше и на море), для целей гидрологии и сельскохозяйственной метеорологии и для проведения научных исследований в области метеорологии и климатологии. Цель *Руководства по метеорологическим приборам и методам наблюдений* заключается в оказании поддержки этой деятельности посредством предоставления рекомендаций по эффективной практике при проведении метеорологических измерений и наблюдений.

Существует много других источников дополнительных рекомендаций, и пользователям следует обращаться к справочной литературе в конце каждой главы для ознакомления с библиографией теории и практики, связанной с приборами и методами наблюдений. Справочная литература содержит также ссылки на национальные виды практики, на национальные и международные стандарты и на конкретную литературу. Она включает также доклады, опубликованные ВМО от Комиссии по приборам и методам наблюдений (КПМН), касающиеся технических конференций, приборного обеспечения и международных сравнений приборов. Многие другие наставления и руководства, выпущенные ВМО, посвящены конкретным применениям данных метеорологических наблюдений (см., в частности, *Наставление по Интегрированной глобальной системе наблюдений ВМО* (ВМО-№ 1160), *Руководство по Интегрированной глобальной системе наблюдений ВМО* (ВМО-№ 1165), *Руководство по системам метеорологических наблюдений и распространения информации для метеорологического обслуживания авиации* (ВМО-№ 731), *Руководство по гидрологической практике* (ВМО-№ 168), *Guide to Agricultural Meteorological Practices* (Руководство по агрометеорологической практике) (WMO-No. 134) и *Руководство по климатологической практике* (ВМО-№ 100)).

Особое значение для инструментальных измерений имеют обеспечение и поддержание качества (ОК). На всем протяжении настоящего Руководства содержатся многочисленные рекомендации с тем, чтобы были удовлетворены заявленные требования к техническим характеристикам. Эти требования описаны в приложении 1.A. В частности, том V настоящего Руководства посвящен вопросам ОК и менеджмента систем наблюдений. Признается, что исключительно важное значение имеют менеджмент качества и профессиональная подготовка специалистов по приборам. В этой связи по рекомендации КПМН[1] региональные ассоциации ВМО учредили региональные центры по приборам (РЦП) для сохранения стандартов и проведения консультаций по метеорологическим измерениям. Эти РЦП играют ключевую роль в осуществлении стратегии ВМО по обеспечению прослеживаемости, которая описана в приложении 1.B. Круг обязанностей этих центров приводится в приложении 1.C. Кроме того, по рекомендации Совместной технической комиссии ВМО/Межправительственной океанографической комиссии по океанографии и морской метеорологии (СКОММ)[2] (см. *Совместная комиссия ВМО/МОК по океанографии и морской метеорологии* (ВМО-№ 1049)) была создана сеть региональных центров по морским приборам для выполнения аналогичных функций, связанных с морской метеорологией и другими соответствующими океанографическими измерениями. Круг их обязанностей и места их нахождения представлены в томе III,

[1] Рекомендовано КПМН на ее девятой сессии (1985 г.), рекомендация 19 (КПМН-IX).
[2] Рекомендовано СКОММ на ее третьей сессии (2009 г.), рекомендация 1 (СКОММ-III).

глава 4, приложение 4.A настоящего Руководства. Кроме того, для проведения обучения в области метеорологии, гидрологии и смежных наук с целью удовлетворения потребностей регионов были созданы региональные учебные центры ВМО[3].

Определения и стандарты, изложенные в настоящем Руководстве (см. п. 1.5.1), соответствуют стандартам, принятым на международном уровне. Базовыми документами, к которым необходимо обращаться, являются *Международный метеорологический словарь* (ВМО-№ 182) и *Международный словарь по метрологии — Основные и общие понятия и соответствующие термины (VIM)* (Объединенный комитет по руководствам в метрологии (ОКРМ), 2012).

1.1.2 Репрезентативность

Репрезентативность данных наблюдений — это та степень точности, с которой они описывают значение переменной величины, требуемой для конкретной цели. В этой связи это не зафиксированное качество любых данных наблюдений, а результаты совместной оценки приборов, интервала измерений и размещения приборов по сравнению с требованиями определенного конкретного применения. Например, данные синоптических наблюдений должны быть, как правило, репрезентативными для района размером до 100 км вокруг станции, однако для мелкомасштабных или местных применений рассматриваемый район может иметь размер соответствующей территории в 10 км или меньше.

В частности, применения обладают своими собственными предпочтительными временными масштабами и пространственными масштабами для осреднения, плотности станций и разрешающей способности явления погоды — небольшими для сельскохозяйственной метеорологии, большими для глобального долгосрочного прогнозирования. Масштабы прогнозирования тесно связаны с временными масштабами данного явления; таким образом, краткосрочные метеорологические прогнозы требуют проведения более частых наблюдений более плотной сетью на ограниченной территории с тем, чтобы обнаруживать любые мелкомасштабные явления и их быстрое развитие. На основе использования различных источников (*Lecture Notes for Training Agricultural Meteorological Personnel* (Сборник лекций для подготовки агрометеорологического персонала) (WMO-No. 551), *Наставление по Интегрированной глобальной системе наблюдений ВМО* (ВМО-№ 1160), Orlanski, 1975) горизонтальные метеорологические масштабы могут быть классифицированы следующим образом, при этом коэффициент погрешности равен двум:

a) микромасштаб (менее 100 м) для сельскохозяйственной метеорологии, например испарение;

b) топографический или местный масштаб (100 м – 3 км), например загрязнение воздуха, торнадо;

c) мезомасштаб (3–100 км), например грозы, морской и береговой бриз;

d) крупный масштаб (100–3000 км), например фронты, различные циклоны, облачные скопления;

e) планетарный масштаб (более 3000 км), например длинные волны в верхней тропосфере.

В разделе 1.6 рассматриваются требуемые и достижимые погрешности измерительных систем. Установленные достижимые погрешности могут быть получены с помощью эффективных систем приборов, которые эксплуатируются должным образом, но на практике это происходит не всегда. Надлежащая практика наблюдений требует навыков

[3] С последней информацией о региональных учебных центрах и их составляющих можно ознакомиться по адресу: https://community.wmo.int/wmo-regional-training-centres.

и профессионального мастерства, учебной подготовки, оборудования и поддержки, которые не всегда имеются в достаточной степени. Необходимые интервалы измерений меняются в зависимости от применения: минуты — для авиации, часы — для сельского хозяйства и сутки — для описания климата. Организация хранения данных представляет собой компромисс между имеющимися возможностями и потребностями пользователей.

Трудно выполнимой задачей является правильная установка приборов, которая репрезентативна для масштабов от нескольких метров до 100 км (см. п. 1.3). Погрешности, связанные с нерепрезентативной установкой приборов, могут быть гораздо более значительными, чем погрешности, ожидаемые от отдельно стоящих приборов. Данные со станции, размещенной в горной или прибрежной местности, являются, вероятно, нерепрезентативными в крупном масштабе или мезомасштабе. Однако хорошая однородность данных наблюдений во времени может позволить пользователям применять для целей климатических исследований данные, полученные даже от нерепрезентативных станций.

В приложении 1.D рассматривается более подробно вопрос о репрезентативности места размещения и даются руководящие указания относительно классификации наземных наблюдательных площадок на суше, с тем чтобы указать их репрезентативность для измерения различных переменных величин. Настоящая классификация преследует несколько целей:

a) усовершенствовать выбор площадки и расположения прибора на выбранной площадке с тем, чтобы оптимизировать репрезентативность путем применения ряда объективных критериев;

b) оказывать помощь в построении сети и выборе площадок для нее:

   i) не только для метеорологического обслуживания, но также, например, для целей дорожно-эксплуатационного обслуживания;

   ii) во избежание неправильного размещения приборов;

c) обосновывать репрезентативность площадки при помощи простого в использовании критерия:

   i) очевидно, что одна величина недостаточна для полного описания окружающей среды и репрезентативности площадки. Необходима дополнительная информация, такая как схема, снимки или описание окружающей обстановки;

   ii) несмотря на численное значение, классификация площадки не является только системой ранжирования. Площадки класса 1 предпочтительны, однако площадки других классов все равно представляют ценность для многих других применений;

d) оказывать помощь пользователям извлекать пользу из метаданных при использовании данных наблюдений. Рекомендуется, чтобы метаданные были настолько простыми, насколько это практически возможно, а также соответствовали предполагаемому использованию.

1.1.3 **Метаданные**

Целью настоящего Руководства и соответствующих публикаций ВМО является обеспечение надежности данных наблюдений посредством стандартизации. Однако местные ресурсы и обстоятельства могут являться причиной отклонений от согласованных стандартов средств измерений и их установки. Характерным примером является пример регионов с обильными снегопадами, где приборы устанавливаются выше, чем обычно, с тем чтобы они могли быть полезными зимой, а также летом.

Пользователям данных метеорологических наблюдений часто необходимо знать фактическую установку, тип и состояние оборудования, а также условия его эксплуатации и, вероятно, обстоятельства проведения наблюдений. Это имеет особенно важное значение при изучении климата, когда необходимо подробно изучать историю станций. Следует сохранять метаданные (данные о данных), касающиеся всех вопросов, связанных с созданием и функционированием станций, описанных в п. 1.3, и происходящих изменениях, включая историю калибровки приборов и их обслуживания, а также изменений в местах их установки и в составе персонала (см. *Руководящие принципы по вопросам климатических метаданных и обеспечению однородности данных* (WMO/TD-No. 1186)). Метаданные особенно важны для величин, которые особенно чувствительны к влиянию внешних факторов, таких как осадки, ветер и температура. Одной из основных форм метаданных является информация о доступности, наличии и качестве метеорологических данных и метаданных о них.

1.2 СИСТЕМЫ МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИХ НАБЛЮДЕНИЙ

Обеспечение потребностей в результатах наблюдений достигается путем использования измерений *in situ* или систем дистанционного зондирования (включая космические системы) в соответствии со способностью различных сенсорных систем проводить измерения необходимых природных величин. В *Наставлении по Интегрированной глобальной системе наблюдений ВМО* (ВМО-№ 1160) дается описание потребностей с точки зрения глобальных, региональных и национальных масштабов и в соответствии с районом применения. ИГСНВ, разработанная для удовлетворения этих потребностей, состоит из наземной и космической подсистем. В наземную подсистему входит множество станций (пунктов наблюдений) различного типа в зависимости от конкретного вида применения (например, наземная синоптическая станция, аэрологическая станция, климатологическая станция и т. д.). Космическая подсистема включает ряд космических аппаратов, осуществляющих зондирование из космоса, и связанный с ними наземный комплекс для управления, контроля и приема данных. Последующие пункты и главы настоящего Руководства посвящены наземной подсистеме и, в меньшей степени, космической подсистеме. Для выведения данных в результате определенных космических наблюдений автоматизированными системами, например данных о текущей погоде, необходима так называемая «многоприборная» концепция, когда используется алгоритм для расчета результата по выходным данным нескольких приборов измерения.

1.3 ОБЩИЕ ТРЕБОВАНИЯ К МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКОЙ СТАНЦИИ

В *Наставлении по Интегрированной глобальной системе наблюдений ВМО* (ВМО-№ 1160) подробно изложены требования в отношении тех величин, за которыми должны проводиться наблюдения в соответствии с типом станции наблюдательной сети. В настоящем разделе рассматриваются требования к наблюдениям, проводимым типовой климатологической или синоптической станцией наземной сети наблюдений.

На станции, предназначенной для приземных наблюдений, проводятся наблюдения за следующими величинами (указаны главы настоящего тома):

- Температура воздуха (глава 2)
- Температура почвы (глава 2)
- Атмосферное давление (глава 3)
- Относительная влажность (глава 4)
- Направление и скорость ветра (глава 5)

– Осадки (глава 6)

– Снежный покров (глава 6)

– Солнечное излучение и/или солнечное сияние (главы 7, 8)

– Видимость (глава 9)

– Испарение (глава 10)

– Текущая погода (глава 14)

– Прошедшая погода (глава 14)

– Облачность (количество облаков) (глава 15)

– Тип облачности (глава 15)

– Высота нижней границы облаков (глава 15)

Существуют приборы, с помощью которых можно измерить все эти величины, за исключением формы облаков. Однако при наличии современной технологии приборы для наблюдения за текущей и прошедшей погодой, количеством и высотой облаков, а также снежным покровом, не могут осуществлять наблюдения за всем спектром данных явлений, в то время как это могут сделать наблюдатели.

На некоторых метеорологических станциях проводятся аэрологические измерения (настоящий том, главы 12 и 13), измерения влажности почвы (настоящий том, глава 11), озона и состава атмосферы (настоящий том, глава 16), а на некоторых из них используются системы специальных приборов, описанные в томе III настоящего Руководства.

Подробные сведения о методах наблюдения и необходимом приборном обеспечении содержатся в последующих главах настоящего Руководства.

1.3.1 Автоматические метеорологические станции

Большинство метеорологических величин, необходимых для синоптических, климатологических и аэронавигационных целей, могут быть измерены при помощи автоматического приборного обеспечения (см. том III, глава 1 настоящего Руководства).

По мере расширения возможностей автоматических систем постоянно увеличивается соотношение между полностью автоматизированными метеорологическими станциями (АМС) и метеорологическими станциями, обслуживаемыми наблюдателями (с автоматическим приборным обеспечением или без него). Изложенные в последующих пунктах рекомендации относительно размещения и установки приборов, замены приборного обеспечения, а также выполнения инспекций и обслуживания, применимы в равной мере как к АМС, так и к метеорологическим станциям, обслуживаемым персоналом.

1.3.2 Наблюдатели

Услуги наблюдателей-метеорологов необходимы по ряду следующих причин:

a) проведение с помощью соответствующих приборов синоптических и/или климатологических наблюдений с необходимой степенью неопределенности и репрезентативности;

b) поддержание в хорошем состоянии приборов, документации метаданных и пунктов наблюдения;

c) кодирование и передача результатов наблюдений (при отсутствии автоматических систем кодирования и связи);

d) обслуживание регистрирующих устройств на местах, включая замену, при необходимости, регистрационных лент;

e) подготовка или сбор недельных и/или месячных сводок климатологических данных в случае отсутствия или неадекватности автоматических систем;

f) обеспечение дополнительных или дублирующих наблюдений в тех случаях, когда автоматическое оборудование не позволяет проводить наблюдения за всеми необходимыми величинами или когда оно выходит из строя;

g) реагирование на запросы населения и специалистов.

Наблюдатели должны пройти профессиональную подготовку и/или быть аттестованы уполномоченной метеорологической службой для констатации их компетенции проводить наблюдения в соответствии с требуемыми стандартами. Они должны быть способны интерпретировать инструкции по использованию приборного обеспечения и ручных методов работы, применяемых к их собственным конкретным системам наблюдений. Руководящие указания относительно требований к профессиональной подготовке наблюдателей в области использования приборного обеспечения будут изложены в томе V, глава 5 настоящего Руководства.

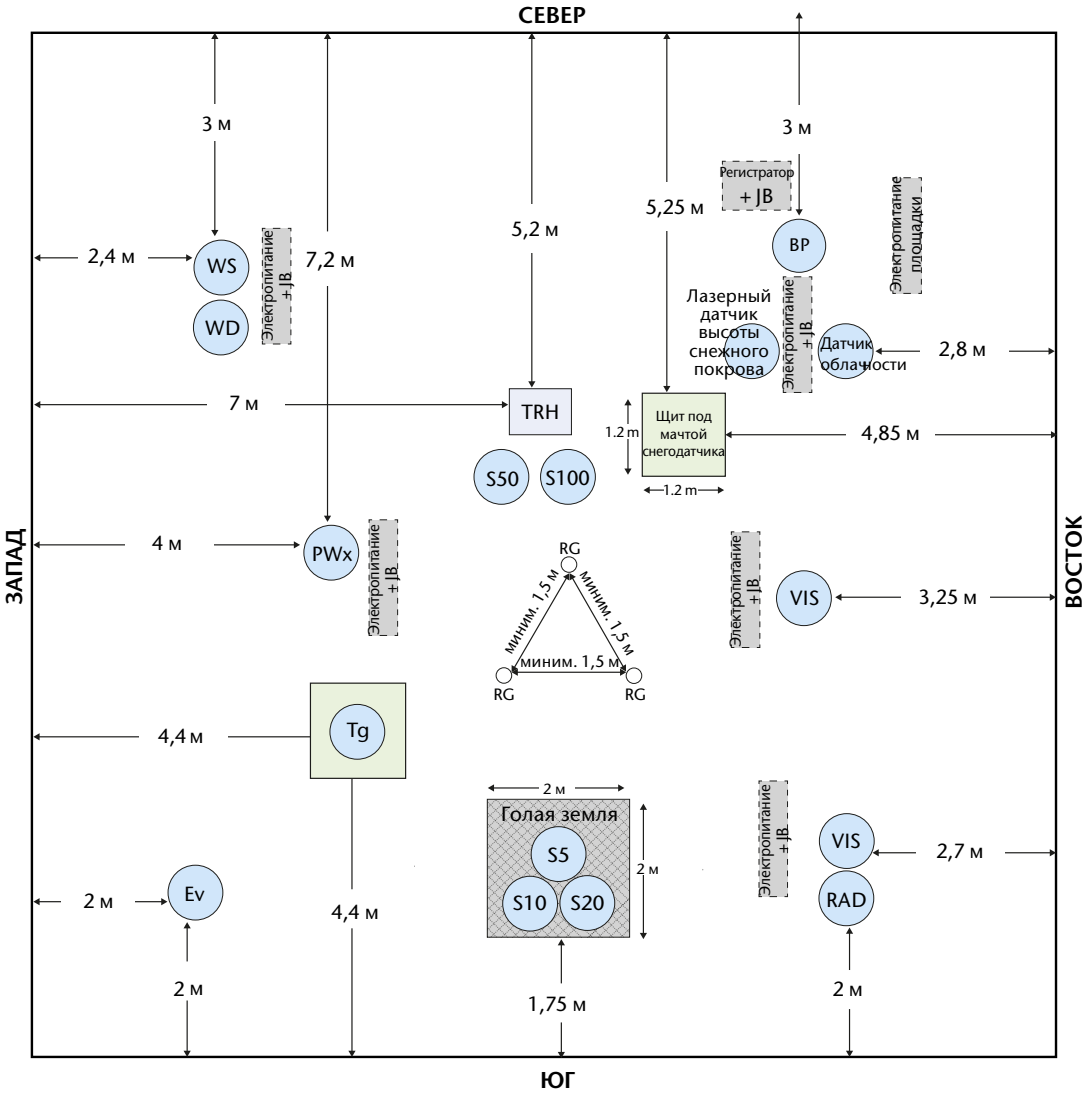
1.3.3 Размещение и установка приборов

1.3.3.1 *Выбор места размещения*

Метеорологические станции организуются таким образом, чтобы репрезентативные измерения (или наблюдения) можно было проводить в соответствии с типом данной станции. Так на станции, входящей в синоптическую сеть, должны проводиться наблюдения для удовлетворения потребностей в данных в синоптическом масштабе, в то время как на авиационной метеорологической наблюдательной станции должны проводиться наблюдения, дающие описания конкретных условий для местного пункта (аэродрома). В тех случаях, когда станции используются для нескольких целей, например для целей авиации, синоптических и климатологических целей, то наиболее строгое требование будет диктовать точное положение места наблюдений и соответствующих измерительных приборов. Подробное исследование вопроса о размещении и установке приборов содержатся в *Siting and Exposure of Meteorological Instruments* (Выбор места и размещение метеорологических приборов) (WMO/TD-No. 589).

В качестве примера приводятся следующие соображения, касающиеся требований к выбору места размещения и установки приборов на типовой синоптической или климатологической станции в региональной или национальной сети:

a) метеорологические приборы следует устанавливать на ровном участке земли желательно размером не менее 25 м x 25 м, на котором имеется множество установок, однако в тех случаях, когда имеется относительно небольшое число установок, данная площадка может быть гораздо меньше. Участок должен быть покрыт короткотравьем или иметь поверхность, характерную для данной местности, и быть окруженным оградой открытого типа или дощатым забором, исключающими проникновение посторонних лиц. Внутри огороженного пространства участок оголенной земли размером примерно 2 м x 2 м резервируется для проведения наблюдений за состоянием поверхности почвы и за ее температурой на глубинах равных или менее 20 см (см. главу 2 этого тома) (температура почвы на глубинах более 20 см измеряется за пределами этого оголенного участка земли). Пример плана-схемы подобной станции приводится на рисунке 1.1;



Примечания:

BP	Барометрическое давление
Ev	Испарение
JB	Распределительная коробка для данных
PWx	Текущая погода
RG	Осадкомер
RAD	Солнечное излучение (пиранометр)
S5	Температура почвы на глубине 5 см
S10	Температура почвы на глубине 10 см
S20	Температура почвы на глубине 20 см
S50	Температура почвы на глубине 50 см
SUN	Продолжительность солнечного сияния
Tg	Температура в травостое
TRH	Температура воздуха и относительная влажность в радиационной защите
VIS	Метеорологическая оптическая дальность (визиомер)
WS	Скорость ветра
WD	Направление ветра

Ограждение:
Идеал = ограждение, защищенное от скота
Для обеспечения безопасности могут потребоваться компромиссы

Рисунок 1.1. Пример схемы планировки размещения приборов на наблюдательной метеорологической площадке станции в северном полушарии с указанием типичных расстояний между установками и огороженного участка. Важно убедиться, чтобы фактические расстояния были достаточными, чтобы минимизировать влияние окружающих препятствий.

b) поблизости не должно быть крутых склонов и само данное место не должно находиться в низине. Если эти условия не соблюдаются, то данные наблюдений могут отражать особенности, имеющие только локальное значение;

c) месторасположение должно находиться далеко от деревьев, зданий, стен или других препятствий. Расстояние от любого такого препятствия (включая ограждение участка) до осадкомера должно быть как минимум в два раза, а предпочтительно в четыре раза больше высоты данного объекта над краем осадкомера;

d) гелиограф, осадкомер и анемометр должны устанавливаться в соответствии с их техническими требованиями, предпочтительно на той же площадке, что и другие измерительные приборы;

e) следует отметить, что огороженный участок может не быть наиболее хорошо подготовленным местом для оценки скорости и направления ветра; требуемым может оказаться выбор еще одного наблюдательного пункта, который более открыт для воздействия ветра;

f) наиболее открытые места, которые являются удовлетворительными для большинства измерительных приборов, не подходят для осадкомеров. В таких местах количество попавших в осадкомер осадков уменьшается в условиях иных, нежели слабый ветер, и поэтому необходимо наличие определенной защиты для осадкомера;

g) если рядом с оградой площадки на некотором расстоянии расположены такие объекты, как деревья или здания, в значительной мере закрывающие горизонт, следует выбрать альтернативные пункты обзора для проведения наблюдений за солнечным сиянием или излучением;

h) позиция, используемая для наблюдений за облаками и видимостью, должна быть как можно более открытой и обеспечивать максимально возможный обзор неба и окружающей местности;

i) в случае прибрежных станций желательно, чтобы на станции обеспечивался обзор открытого моря. Однако станция не должна находиться слишком близко от края обрыва, поскольку завихрения ветра, создаваемые этим обрывом, будут влиять на результаты измерений ветра и количества осадков;

j) наблюдения за облачностью и видимостью в ночное время лучше всего проводить из места, не затронутого посторонним освещением.

Очевидно, что некоторые из вышеприведенных соображений являются несколько противоречивыми и требуют компромиссных решений. В последующих главах приводится подробная информация, касающаяся конкретных приборов и измерений.

1.3.3.2 ***Координаты станции***

Месторасположение станции, ссылка на которое делается во Всемирной геодезической системе 1984 г. (ВГС-84) и ее Геодезической модели Земли 1996 г. (ГМ396), должно быть точно известно и зарегистрировано[4]. Координатами станции являются (в соответствии с требованиями *Руководства по Интегрированной глобальной системе наблюдений ВМО* (ВМО-№ 1165)):

a) широта в градусах, минутах и целых секундах;

b) долгота в градусах, минутах и целых секундах;

[4] Объяснение ВГС-84 и вопросы регистрации, см. ИКАО (ICAO, 2002).

c) высота станции над средним уровнем моря (СУМ)[5], т. е. расстояние по вертикали от этого уровня до станции, определенная с точностью до метра (до двух десятичных знаков).

Эти координаты относятся к тому участку земли, на котором проводятся наблюдения, и они могут не совпадать с координатами города, деревни или аэродрома, по которым названа данная станция. Если требуется более высокое разрешение координат, то можно использовать ту же практику, что применяют к высоте, как это объясняется ниже.

Высота станции определяется как расстояние по вертикали между СУМ того участка земли, на котором установлен осадкомер, или, если осадкомер отсутствует, то участком, на котором размещена метеорологическая будка. Если нет ни осадкомера, ни метеорологической будки, то это средний уровень территории вблизи станции. Если со станции поступает информация о давлении, то должна конкретно указываться высота, на которой определяется атмосферное давление на станции.

Если станция находится на аэродроме, то должны также указываться другие высоты (см. том III, глава 2 настоящего Руководства, и *Руководство по системам метеорологических наблюдений и распространения информации для метеорологического обслуживания авиации* (ВМО-№ 731)). Определения мер высоты и СУМ даны в *Международном метеорологическом словаре* (ВМО-№ 182).

1.3.3.3 *Эксплуатация оборудования в экстремальных условиях окружающей среды*

Непрерывные наблюдения во время и после экстремальных гидрометеорологических явлений имеют исключительную важность как для поддержки деятельности по восстановлению, так и для обеспечения готовности к будущим явлениям. Стратегии смягчения последствий для наиболее распространенных опасных явлений описаны в приложении 1.E.

1.3.4 Замены приборного обеспечения и однородность показаний приборов

Характеристики места для проведения наблюдений, как правило, со временем меняются, например в результате роста деревьев или возведения зданий на соседних участках. Эти места следует выбирать таким образом, чтобы по возможности свести к минимуму эти воздействия. В качестве компонента метаданных следует вести и регулярно обновлять документацию по географии данного места и его подверженности воздействиям (см. приложение 1.F и *Руководящие принципы по вопросам климатических метаданных и обеспечению однородности данных* (WMO/TD-No. 1186)).

Особенно важно свести к минимуму последствия замен приборов и/или изменений в размещении конкретных приборов. Хотя статические характеристики новых приборов могут быть, вероятно, хорошо известны, при оперативном размещении приборов они могут внести очевидные изменения в климатологию места размещения. Для того, чтобы

[5] В публикации ВМО (1992) СУМ определяется как : фиксированный исходный уровень СУМ, описанный хорошо определенным геоидом. В геодезии существует два типа моделей, используемых для определения положения в пространстве. Первая — это эллипсоид, который функционально представляет собой деформированную сферу и является базовой моделью, используемой многими глобальными навигационными спутниковыми системами (ГНСС). Вторая — это геоид, эквипотенциальная поверхность гравитационного поля Земли, которая лучше всего совпадает с глобальным СУМ, рассчитанному по методу наименьших квадратов. ГНСС дают значения высоты относительно эталонного эллипсоида ВГС-84, и их необходимо корректировать для геоида, поскольку эта разница может достигать 100 м. Модель ВГС-84 ГМ396 включает как эталонный эллипсоид ВГС-84, так и геоид ГМ396. Для тех пользователей, которым нужна местная высота, например давление или уровень моря, необходимо применить поправку от высоты ГНСС к геоиду. В некоторых юрисдикциях национальный геодезический орган предоставляет местную поправку от эллипсоида (ВГС-84), которая является более точной и имеет более высокую разрешающую способность по сравнению с геоидом ГМ396.

предотвратить подобную возможность, данные наблюдений от новых приборов следует сравнивать на протяжении длительного периода времени (по меньшей мере не менее одного года; см. *Руководство по климатологической практике* (ВМО-№ 100)) с данными старой системы измерений, перед тем как последняя будет снята с эксплуатации. То же правило применяется, когда происходит смена места для проведения наблюдений. В тех случаях, когда практически невозможно осуществить данную процедуру во всех местах проведения наблюдений, весьма важно проводить сравнения в выбранных репрезентативных местах, с тем чтобы попытаться уменьшить погрешности в данных измерений, которые могут быть следствием изменения технологии или вынужденной смены места наблюдений.

1.3.5 Инспекция и обслуживание

1.3.5.1 *Инспекция станций*

Все синоптические наземные станции и основные климатологические станции следует инспектировать не реже одного раза в два года. Агрометеорологические и специальные станции следует инспектировать с достаточно короткими интервалами, с тем чтобы обеспечить поддержание высокого качества наблюдений и правильного функционирования приборов.

Основная цель таких инспекций заключается в том, чтобы установить следующие факты:

a) местоположение и установка приборов известны и приемлемы и должным образом задокументированы;

b) приборы являются утвержденными образцами, находятся в хорошем состоянии и, при необходимости, регулярно поверяются по соответствующим эталонам;

c) соблюдается единообразие в методах наблюдений и в процедурах расчета количественных значений данных наблюдений;

d) наблюдатели обладают соответствующей квалификацией для выполнения своих обязанностей;

e) информация, входящая в состав метаданных, актуализирована.

Дополнительная информация о стандартизации приборов приведена в п. 1.5.

1.3.5.2 *Обслуживание*

Места и приборы для проведения наблюдений должны обслуживаться на регулярной основе, с тем чтобы качество наблюдений заметно не ухудшалось в интервалах между инспекциями станций. Графики планового (профилактического) обслуживания включают регулярную «уборку» в местах проведения наблюдений (например, стрижку травы и очистку подверженных воздействиям поверхностей приборов) и рекомендованные производителем проверки работы автоматических приборов. Плановые проверки в рамках контроля качества (КК), проводимые как на самой станции, так и в центральном пункте, следует проводить таким образом, чтобы дефекты в работе оборудования обнаруживались на самой ранней стадии их появления. В зависимости от характера дефектов или типа станции корректирующее обслуживание (замена оборудования или ремонт) должно проводиться в соответствии с согласованными приоритетами и временными масштабами. В отношении метаданных особенно важно регистрировать в журнале дефекты приборов, изменения в установке приборов и предпринятые корректирующие действия в тех случаях, когда данные наблюдений используются для климатологических целей.

Дополнительную информацию об инспекции и менеджменте станций можно найти в *Наставлении по Интегрированной глобальной системе наблюдений ВМО* (ВМО-№ 1160).

1.4 ОБЩИЕ ТРЕБОВАНИЯ К ПРИБОРАМ

1.4.1 Желательные характеристики

Наиболее важные требования к метеорологическим приборам касаются следующих их характеристик:

a) погрешность, в соответствии с установленным требованием для конкретной переменной;

b) надежность и стабильность;

c) удобство эксплуатации, калибровки и обслуживания;

d) простота конструкции (в соответствии с требованиями);

e) долговечность;

f) приемлемая стоимость прибора, расходных материалов и запчастей;

g) безопасность для персонала и окружающей среды.

В отношении первых двух характеристик важно, чтобы прибор обеспечивал заданную точность в течение длительного времени. Это намного лучше, чем когда высокий уровень исходной точности (означающий малую погрешность) невозможно сохранить в условиях последующей длительной эксплуатации.

Первоначальные калибровки приборов выявляют, как правило, отклонения от идеального результата, что ведет к необходимости введения поправок в данные в ходе обычных операций. Важно, чтобы сведения о таких поправках поставлялись вместе с приборами и хранились вместе с ними в пункте наблюдения, а также чтобы для наблюдателей были обеспечены четкие руководящие инструкции по их использованию.

Простота и прочность конструкции, удобство в эксплуатации и обслуживании приборов являются важными их характеристиками, поскольку большинство метеорологических приборов могут использоваться весьма продолжительное время и при этом находиться далеко от мест ремонта. Прочность конструкции особенно желательна для тех приборов, которые полностью или частично находятся под воздействием погодных условий. Обеспечение перечисленных характеристик приборов обычно позволяет уменьшить затраты на проведение качественных наблюдений и компенсировать таким образом первоначальные вложения средств.

При использовании приборов, содержащих опасные химические вещества, должны применяться соответствующие правила техники безопасности (см., в частности, руководящие указания по ртути (настоящий том, глава 3, приложение 3.A) и опасным химическим веществам (том III, глава 8, 8.5 и 8.6).

В случае радиозондирования при выборе материалов для радиозондов следует учитывать вопросы загрязнения окружающей среды; в главе 12, приложение 12.C настоящего тома, описаны проблемы и потенциальные решения для каждого компонента радиозонда, доступные в ближайшем будущем.

Оценка общего качества данных измерений может быть получена из Классификаций качества измерений для наземных станций приземных наблюдений (приложение 1.G). Данная схема в сочетании с Классификациями размещения площадок для станций

приземных наблюдений на суше (приложение 1.D) является частью метаданных измеряемой величины и дает представление о пригодности измерения для конкретного применения.

1.4.2 Воздействие Минаматской конвенции

Минаматская конвенция о ртути Программы Организации Объединенных Наций по окружающей среде (ЮНЕП) вступила в силу на глобальном уровне в августе 2017 года. Она запрещает любое производство, импорт и экспорт приборов для наблюдений (термометров, барометров и т. п.), содержащих ртуть (ЮНЕП, 2017). Это соглашение представляет собой глобальный договор по прекращению применения ртути, направленный на защиту как здоровья человека, так и окружающей среды от ее негативного воздействия. Он был согласован на пятой сессии Межправительственного комитета по ведению переговоров в Женеве в январе 2013 года.

Конвенция гласит, что «ни одна Сторона не разрешает посредством принятия соответствующих мер производство, импорт или экспорт продуктов с добавлением ртути, перечисленных в части I приложения A [Конвенции] после наступления предусмотренного для этих продуктов срока поэтапного вывода из обращения». В частности, в этот перечень входят перечисленные ниже неэлектронные измерительные устройства, кроме неэлектронных измерительных устройств, установленных на крупногабаритном оборудовании или используемых для высокоточного измерения, если отсутствуют приемлемые безртутные альтернативные решения:

a) барометры;

b) гигрометры;

c) манометры;

d) термометры;

e) сфигмоманометры.

Аналогичное постановление вступило в силу в Европе 10 апреля 2014 года (Постановление Комиссии (ЕК) № 847/2012), и ряд производителей в Европе уже не могут поставлять приборы с содержанием ртути.

В связи с этим более не рекомендуется использовать приборы с содержанием ртути, и настоятельно поощряется принять соответствующие меры для осуществления стратегии перехода, нацеленной на отказ от использования любых приборов, содержащих этот элемент. Благодаря последним достижениям в области электронных и цифровых технологий, сегодня цифровые электронные барометры, термометры и гигрометры находятся на самом современном уровне. Они могут стать экономичной, точной и надежной альтернативой своим опасным ртутным предшественникам и обеспечивают другие значительные преимущества в плане хранения данных и отображения информации в режиме реального времени.

1.4.3 Механические самописцы

Во многих моделях механических самописцев, применяемых в метеорологии, реакция чувствительного элемента усиливается рычагами, заставляющими перо передвигаться по ленте, закрепленной на барабане с часовым механизмом. При работе таких самописцев следует обеспечивать максимально возможное отсутствие трения, причем не только в подшипниках, но также между пером и бумагой. Следует предусмотреть определенные технические возможности для регулирования давления пера на бумагу, однако это давление должно сводиться к минимуму, обеспечивающему непрерывный четкий след от чернил (пасты) на ленте. Следует также предусмотреть возможность нанесения на лентах

самописцев отметок времени. При конструировании самописцев для использования в холодном климате особое внимание следует уделять тому, чтобы на эффективности их работы не сказывалось влияние сильных холодов и влажности и чтобы плановые процедуры (нанесение отметок времени и т. д.) могли бы выполняться наблюдателями в перчатках.

Необходимо регулярное сравнение работы самописцев с работой приборов прямого считывания.

Все шире используются электронные самописцы с магнитной лентой или микросхемами на полупроводниках. Многие из вышеприведенных требований, касающихся подшипников, трения и обслуживания в холодную погоду, относятся и к механическим компонентам таких приборов.

1.5 ЭТАЛОНЫ ИЗМЕРЕНИЙ, ПРОСЛЕЖИВАЕМОСТЬ И ЕДИНИЦЫ ИЗМЕРЕНИЯ

1.5.1 Определения эталонов измерений

Термин «эталон» и другие аналогичные термины означают различные приборы, методы и шкалы, используемые для установления неопределенности измерений. Номенклатура эталонов измерений приводится в *Международном словаре по метрологии — Основные и общие понятия и соответствующие термины (VIM)*, который был подготовлен совместно Международным бюро мер и весов (МБМВ) (Bureau international des poids et mesures), Международной электротехнической комиссией (МЭК), Международной федерацией клинической химии и лабораторной медицины, Международной кооперацией по аккредитации лабораторий, Международной организацией стандартизации (ИСО), Международным союзом чистой и прикладной химии, Международным союзом чистой и прикладной физики и Международной организацией законодательной метрологии, и был опубликован ОКРМ. Существующим в настоящее время вариантом является публикация ОКРМ 200:2012, имеющаяся по адресу: http://www.bipm.org/en/publications/guides/vim.html. Ниже приводятся некоторые из определений:

Международная система единиц (СИ) (Système international d'unités). Система единиц, основанная на Международной системе величин, вместе с наименованиями и обозначениями, а также набором приставок и их наименованиями и обозначениями вместе с правилами их применения, принятая Генеральной конференцией по мерам и весам (CGPM).

Эталон измерения. Реализация определения заданного количества с установленной оценкой количества и связанной с ними неопределенностью измерений, служащие в качестве образца.

Пример 1: Эталон измерения массы 1 кг с соответствующей погрешностью измерений эталоном в 3 мкг.

Пример 2: Эталонный резистор измерений номиналом в 100 Ом с соответствующей погрешностью эталонного измерения в 1 мкОм.

Международный эталон измерений (международный эталон). Эталон измерений, признанный сторонами, подписавшими международное соглашение, и предназначенный для использования в мировом масштабе.

Пример: Международный прототип килограмма.

Национальный эталон измерений (национальный эталон). Эталон измерений, признанный национальным органом в государстве или экономике в качестве основы для установления количественных значений для других эталонов измерений для соответствующего вида количества.

Первичный эталон измерений (первичный эталон). Эталон измерений, установленный с использованием процедуры первичных эталонных измерений или созданный в качестве артефакта, и выбранный в соответствии с соглашением.

Пример 1: Первичный эталон измерений концентрации количества вещества, подготовленной путем растворения известного количества вещества химического компонента в известном объеме раствора.

Пример 2: Первичный эталон измерений для давления, основанный на отдельных измерениях силы и площади.

Вторичный эталон измерений (вторичный эталон). Эталон измерений, установленный путем калибровки относительно первичного эталона измерений для количества того же типа.

Образцовый эталон измерений (образцовый эталон). Эталон измерений, предназначенный для калибровки других эталонов измерений для количеств данного типа в конкретной организации или в конкретном месте.

Рабочий эталон измерений (рабочий эталон). Эталон измерений, который используется на плановой основе для калибровки или проверки измерительных приборов или измерительных систем.

Примечания:

1. Рабочий эталон измерений обычно калибруется путем сравнения с образцовым эталоном измерений.
2. В отношении верификации также иногда используются термины «проверочный эталон» или «контрольный эталон».

Переходное средство измерений (переходное средство). Средство, используемое в качестве промежуточного для сравнения эталонов измерений.

Примечание: В некоторых случаях эталоны измерений используются в качестве переходных средств.

Транспортируемый эталон измерений (транспортируемый эталон). Эталон измерений, имеющий иногда специальную конструкцию и предназначенный для транспортировки между различными пунктами.

Групповой эталон. Набор аналогичных физических величин или измерительных приборов, выполняющих при их совместном использовании роль эталона.

Пример: Всемирный радиометрический справочник.

Примечания:

1. Групповой эталон обычно предназначается для установления единственного значения количества.
2. Величина, определяемая групповым эталоном, является соответствующим результатом усреднения величин, измеренных отдельными приборами.

Прослеживаемость. Свойство результата измерений или значения эталона, благодаря которому они могут быть соотнесены с установленными образцами, обычно национальными или международными эталонами, на основе непрерывной цепи сравнений, которые все обладают установленными погрешностями.

Метрологическая прослеживаемость. Свойство результата измерений, благодаря которому данный результат может быть соотнесен с образцом благодаря документированной непрерывной цепи калибровок, при этом каждый из них вносит вклад в погрешность измерений.

Метрологическая цепочка прослеживаемости (цепочка прослеживаемости). Последовательность стандартов измерения и калибровок, которая используется для соотнесения результата измерения с эталонной величиной.

Калибровка. Операция, которая при определенных условиях устанавливает в первую очередь соотношение между количественными величинами с погрешностями измерений, обусловленных эталонами измерений и соответствующими указаниями связанных с этими погрешностями измерений, и, во вторую очередь, использует эту информацию для установления соотношения с целью получения результата измерений из определенного показания.

Примечания:

1. Результат калибровки может быть выражен в виде заявления, функции калибровки, диаграммы калибровки, кривой калибровки или таблицы калибровки. В некоторых случаях она может заключаться в дополнительной или мультипликативной поправке показания с соответствующей погрешностью измерения.
2. Калибровку не следует путать с корректировкой системы измерений, которую часто ошибочно называют «самокалибровкой», а также с верификацией калибровки.

Схема соподчинения эталонов и образцовых мер. Последовательность калибровок от эталона до конечной измерительной системы, где результат каждой калибровки зависит от результата предыдущей калибровки.

1.5.2 Обеспечение прослеживаемости

Измерения имеют смысл, если их результаты не колеблются в значительной степени при задействовании разных приборов, операторов или других параметров в ходе измерения. Эта достоверность опирается на нормативные документы, международные соглашения и контроль качества в процессе измерения. Общепринятая практика заключается в том, чтобы проводить оценку качества измерений на основе количественного утверждения, которое представляет собой неопределенность измерения, связанную с результатом измерения. Доверие к результату измерения и указанной неопределенности зависит от прослеживаемости измерений, которая включает в себя непрерывную и документированную цепочку сравнений, связывающую результат измерения с согласованным на международном уровне эталоном измерения.

Измерения должны быть сопоставимы со сформулированным и принятым на международном уровне эталоном, которым в большинстве случаев является СИ. Техническая и организационная инфраструктура была разработана и поддерживается МБМВ. Поддержание национальных стандартов и обеспечение сопоставимости на национальном уровне полагается на национальные метрологические учреждения (НМУ) или назначенные учреждения (НУ). Концепция РЦП была создана региональными ассоциациями для поддержки национальных метеорологических и гидрологических служб (НМГС) в деле распространения информации о прослеживаемости их национальных метеорологических стандартов и соответствующих приборов для мониторинга окружающей среды. Круг ведения РЦП представлен в приложении 1.C.

Ответственность за обеспечение прослеживаемости на национальном уровне возложена на НМГС, которые должны обеспечить все необходимые шаги для достижения цели стратегии. Отсутствие обеспечения прослеживаемости сильно снижает доверие к измерениям и их использование местными и глобальными сообществами.

Стратегия обеспечения прослеживаемости приводится в приложении 1.B.

В процессе эксплуатации приборы находятся в совершенно иных условиях окружающей среды по сравнению с приборами в контролируемых лабораторных условиях. Факторы, влияющие на измеряемую величину in vivo (влияющие величины, нестабильность во времени и т. п.), также должны быть определены количественно и задокументированы для каждого измерения. Оценка влияния прибавляется к значению неопределенности. Только тогда результат измерения можно сравнивать с любым другим прослеживаемым результатом, полученным в другом месте и/или в другое время.

Для содействия стандартизации метеорологических и других соответствующих наблюдений и обеспечения единообразного издания результатов наблюдений и статистических данных были разработаны комплекты стандартных процедур и рекомендованных правил (том V, глава 4).

1.5.3 Условные обозначения, единицы измерения и константы

1.5.3.1 *Условные обозначения и единицы измерения*

Результатом приборных измерений являются цифровые величины. Цель этих измерений заключается в получении физических или метеорологических количественных значений, отражающих состояние атмосферы в конкретном месте. Для целей метеорологической практики показания приборов отражают такие переменные величины, как «атмосферное давление», «температура воздуха» или «скорость ветра». Переменная величина с условным обозначением a обычно представляется в виде $a = \{a\} \cdot [a]$, где $\{a\}$ означает цифровое значение и [a] — условное обозначение данной единицы. Общие принципы, касающиеся количеств, единиц измерения и условных обозначений, констатируются в публикациях ИСО (ISO, 2009) и Международного союза теоретической и прикладной физики (International Union of Pure and Applied Physics, 1987). СИ следует пользоваться в качестве системы единиц измерения для оценки метеорологических величин, включенных в доклады о международном обмене. Эта система публикуется и обновляется МБМВ (2006). Руководства по использованию системы СИ выпускаются Национальным институтом стандартов и технологии Соединенных Штатов (NIST, 2008) и ISO (2009). С переменными величинами, не определенными в качестве международного условного обозначения в Международной системе количественных величин, но широко применяемыми в метеорологии, можно ознакомиться в *Международных метеорологических таблицах* (ВМО-№ 188) и соответствующих главах настоящего Руководства.

При проведении метеорологических наблюдений следует использовать следующие единицы:

a) атмосферное давление, p, в гектопаскалях (гПа);[6]

b) температура, t, в градусах Цельсия (°C) или T в кельвинах (K);

Примечание: шкалы температур в градусах Цельсия и кельвинах должны соответствовать действующему определению Международной шкалы температур 1990 года (МШТ-90; см. BIPM, 1990).

c) скорость ветра, как при приземных, так и при аэрологических наблюдениях, в метрах в секунду ($м \cdot с^{-1}$);

d) направление ветра в градусах по часовой стрелке от направления на истинный север или по шкале 0–36, где 36 — это ветер истинного северного направления и 09 — это ветер истинного восточного направления (°);

[6] Единица измерения «паскаль» является производной единицей СИ для величины давления. Данная единица и условное обозначение (бар) — это единица измерения вне системы СИ; в любом документе, в котором она используется, эта единица измерения (бар) должна определяться по отношению к системе СИ. Ее постоянное использование не рекомендуется. По определению, 1 мбар (миллибар) = 1 гПа (гектопаскаль).

e) относительная влажность, U, в процентах (%);

Примечание: рекомендация МБМВ: «При использовании любого из терминов, %, части на миллион и т. д., важно указать безразмерную величину, значение которой указывается. Например, в главе 4 эта рекомендация выполняется с помощью использования «% ОВ».».

f) осадки (общее количество) в миллиметрах (мм) или килограммах на квадратный метр (кг·м$^{-2}$);[7]

g) интенсивность осадков, R_i, в миллиметрах в час (мм·ч$^{-1}$) или килограммах на квадратный метр в секунду (кг·м$^{-2}$·с$^{-1}$);[8]

h) эквивалент снеговой воды в килограммах на квадратный метр(кг·м$^{-2}$);

i) испарение в миллиметрах (мм);

j) видимость в метрах (м);

k) энергетическая освещенность в ваттах на квадратный метр и энергетическая экспозиция в джоулях на квадратный метр (Вт·м$^{-2}$, Дж·м$^{-2}$);

l) продолжительность солнечного сияния в часах (ч);

m) высота облаков в метрах (м);

n) количество облаков в октантах;

o) геопотенциал, используемый в аэрологических наблюдениях, в стандартных геопотенциальных метрах (гп. м).

Примечание: высота, уровень или расстояние уровня представлены относительно определенного эталона. Характерными эталонами являются СУМ, высота станции и уровень давления 1 013,2 гПа.

Стандартный геопотенциальный метр определяется как 0,980 665 динамического метра; для уровней в тропосфере геопотенциал примерно соответствует в численном выражении высоте, выраженной в метрах.

1.5.3.2 ***Константы***

Для использования в метеорологии приняты следующие константы:

a) абсолютная температура замерзания T_0 = 273,15 K (t = 0,00 °C);

b) абсолютная температура тройной точки воды T = 273,16 K (t = 0,01 °C), по определению ИТС-90;

c) ускорение свободного падения (g_n) = 9,80665 м·с$^{-2}$.

Величины других констант приведены в *Международных метеорологических таблицах* (ВМО-№ 188) и *Техническом регламенте* (ВМО-№ 49).

[7] Предполагает, что 1 мм равен 1 кг·м$^{-2}$ независимо от температуры.
[8] Рекомендация 3 (КОС-XII), приложение 1, принята резолюцией 4(ИС-LIII).

1.6 ПОГРЕШНОСТЬ ИЗМЕРЕНИЙ

1.6.1 Метеорологические измерения

1.6.1.1 *Общие сведения*

В настоящем разделе рассматриваются определения, относящиеся к оценке точности и неопределённости измерения погрешностей, при физических измерениях, и в заключении в нем излагаются заявления о требуемых и достижимых погрешностях в метеорологии. Прежде всего в нем рассматриваются некоторые вопросы, которые возникают конкретно при метеорологических измерениях.

Термин *измерение* подробно определяется в п. 1.6.1.2, однако в большинстве случаев в настоящем Руководстве он используется в менее строгом смысле для обозначения процесса измерения или его результата, который может также называться данными «наблюдений». *Примером* является единичное измерение, обычно одно из ряда точечных или мгновенных показаний системы датчиков, из которых получают осредненное или сглаженное значение, используемое в качестве данных наблюдений. Более теоретический подход к настоящему обсуждению изложен в томе V, главы 2 и 3 настоящего Руководства.

Термины *точность*, *ошибка*, *погрешность* и *неопределенность* подробно определены в п. 1.6.1.2, в котором объясняется, что точность является понятием качества, численным выражением которого является погрешность. Это является эффективной практикой и формой, которой придерживаются в настоящем Руководстве. Ранее общепринятое и менее точное понятие точности определялось как «точность $\pm x$», которое следует понимать как «погрешность x».

1.6.1.2 *Определения измерений и погрешностей измерений*

Нижеследующая терминология, касающаяся точности измерений, основана на публикации ОКРМ (2012), в которой содержатся многие определения, применимые к практике метеорологических наблюдений. Очень полезное и подробное практическое руководство по расчету и выражению погрешности в измерениях содержится в ISO/IEC (2008)/JCGM (2008).

Измерение. Процесс получения экспериментальным путем одного или более значений величины, которые могут быть обоснованно приписаны физической величине.

Примечание: данные действия могут проводиться автоматически.

Измерительный прибор. Устройство, используемое для проведения измерений либо *самостоятельно, либо в сочетании с одним или несколькими дополнительными устройствами.*

Пример: платиновый термометр сопротивления (ПТР), электронный барометр.

Примечание: термин «прибор» иногда используется без прилагательного «измерительный». Если прибор содержит датчик, можно использовать словосочетание «чувствительный прибор».

Датчик. Элемент системы измерения, который непосредственно подвергается воздействию *явления, тела или вещества, несущего измеряемую величину.*

Пример: измерительная катушка ПТР, трубка Бурдона манометра.

Примечание: иногда для обозначения этого понятия используется термин «чувствительный элемент».

Результат измерения. Совокупность значений величины, приписываемых измеряемой величине, вместе с любой другой доступной соответствующей информацией.

Примечания:

1. При указании результата следует четко разъяснить, относится ли он к показанию прибора, неоткорректированному или откорректированному результату, и был ли он получен осреднением нескольких значений.
2. Полное сообщение о результате измерения включает информацию о погрешности измерения.

Откорректированный результат. Результат измерения после внесения поправки на систематическую ошибку.

Значение (физической величины). Число и обозначение (единица), выражающие вместе размер физической величины.

Пример: длина стержня: 5,34 м.

Действительное значение (физической величины). Значение величины, соответствующее определению физической величины.

Примечания:

1. Это то значение, которое будет получено при безупречно проведенном измерении.
2. Истинные значения по своему характеру не поддаются определению.

Точность (измерения). Качественная характеристика, относящаяся к степени близости совпадения между измеренным значением величины и истинным значением измеряемой физической величины. Под точностью измерения иногда подразумевается степень близости совпадения между измеренными значениями величины, которые приписывают измеряемой величине. Можно говорить о приборе или измерении как имеющих высокую точность, однако количественная мера точности выражается в терминах неопределенности.

Неопределенность. Неотрицательный параметр, характеризующий дисперсию значений величины, приписываемых измеряемой величине на основе использованной информации.

Повторяемость. Степень совпадения показаний приборов или измеренных значений величины, полученных на одних и тех же или подобных объектах в совокупности условий, которые включают одинаковую процедуру измерений, тех же операторов, ту же систему наблюдений, те же условия эксплуатации и то же местонахождение, и повторные измерения в течение короткого промежутка времени.

Примечание: соответствующие статистические термины содержатся в публикациях ISO (1994*a*) и ISO (1994*b*).

Воспроизводимость. степень совпадения показаний приборов или измеренных значений величины, полученных на одних и тех же или подобных объектах в совокупности условий, которые включают различные местонахождения, операторов и системы измерений, и повторные измерения.

Погрешность (измерения). Значение измеренной величины за вычетом опорного значения величины.

Приборные погрешности. Среднее значение повторных показаний приборов за вычетом опорного значения величины.

Случайная погрешность. Составляющая погрешности измерения, которая в повторных измерениях изменяется непредсказуемым образом.

Примечания:
1. Случайная погрешность измерения равна погрешности измерения за вычетом систематической погрешности измерения.
2. Опорное значение величины для случайной погрешности измерения представляет собой среднее значение, которое могло бы быть получено в результате бесконечного числа повторных измерений одной и той же измеряемой величины.

Систематическая погрешность. Составляющая погрешности измерения, которая в повторных измерениях остается постоянной или изменяется предсказуемым образом.

Примечания:
1. Систематическая погрешность равна погрешности измерения за вычетом случайной погрешности измерения.
2. Как и в случае с действительным значением, невозможно получить полное представление о систематической погрешности и ее причинах.

Поправка. Компенсация оцененного систематического эффекта.

Некоторые определения для удобства повторяются в томе V, глава 4 настоящего Руководства.

1.6.1.3 *Характеристики приборов*

Ниже на основании публикации ОКРМ (2012) приведены некоторые другие свойства приборов, которые необходимо знать, оценивая их погрешность.

Чувствительность. Отношение изменения в показаниях измерительной системы и соответствующего изменения в значении измеряемой величины.

Примечание: чувствительность измерительной системы может зависеть от значения измеряемой величины.

Порог реагирования. Наибольшее изменение в значении измеряемой величины, которое не вызывает обнаруживаемых изменений в соответствующем показании прибора.

Разрешение. Наименьшее изменение в измеряемой величине, которое вызывает ощутимое изменение в соответствующем показании прибора.

Гистерезис. Свойство измерительного прибора реагировать на измеряемую величину в зависимости от того, каковы были ее предыдущие значения.

Стабильность (прибора). Свойство измерительного прибора, благодаря которому его метрологические характеристики остаются постоянными с течением времени.

Дрейф. Непрерывное или ступенчатое изменение показаний во времени вследствие изменения метрологических характеристик измерительного средства.

Время отклика при скачкообразном воздействии. Время от момента, когда значение величины на входе средства измерений или измерительной системы скачкообразно изменяется между двумя определенными значениями постоянной величины, до момента, когда соответствующее показание прибора устанавливается в заданных пределах в районе своего конечного значения.

В метеорологии также часто используются следующие определения:

Указания на время ответной реакции. Часто приводится период времени, необходимый для 90 % ступенчатого изменения. Иногда указывается на период времени, необходимый для 50 % ступенчатого изменения, в качестве половины времени.

Расчет времени ответной реакции. В большинстве простых систем ответная реакция на какое-либо ступенчатое изменение рассчитывается следующим образом:

$$Y = A\left(1 - e^{-t/\tau}\right) \tag{1.1}$$

где Y — величина изменения за истекшее время t; A — применяемая амплитуда ступенчатого изменения; t — время, прошедшее после ступенчатого изменения; τ — характеристический параметр системы, имеющий размерность времени.

Параметр τ называют постоянной времени или коэффициентом задержки. Он соответствует периоду времени, необходимому прибору для достижения $1/e$ от конечного постоянного значения после ступенчатого изменения.

В других системах ответная реакция носит более сложный характер и не рассматривается в настоящем документе (см. также том V, глава 2).

Погрешность задержки. Погрешность, которая может быть присуща совокупности измерений в результате того, что для ответной реакции измерительного прибора необходимо определенное ограниченное время.

1.6.2 Источники и оценки погрешности

В последующих главах настоящего Руководства рассматриваются конкретно источники погрешностей при различных метеорологических измерениях, однако в целом можно считать, что они накапливаются по всей цепи получения результатов измерений, начиная от приборных ошибок и заканчивая условиями измерения.

Рассматривая вопрос о том, как возникают погрешности, удобно в качестве примера взять температуру воздуха; но при этом нетрудно адаптировать приводимые ниже аргументы к атмосферному давлению, ветру и другим метеорологическим величинам. В случае температуры источниками погрешности при индивидуальных измерениях являются следующие факторы:

a) погрешности в международных, национальных и рабочих эталонах и при сравнениях между ними. Эти погрешности можно практически не принимать в расчет для метеорологических применений;

b) погрешности, возникающие в ходе проведения сравнений между рабочими эталонами, транспортируемыми эталонами и/или эталонами проверки и полевыми приборами в лаборатории или в водяных термостатах в полевых условиях (если прослеживаемость обеспечивается именно таким образом). Если все действия производятся надлежащим образом, то эти погрешности незначительны (например, погрешность ±0,1 K при уровне достоверности 95 %, включая погрешности, указанные в пункте «a», однако они могут и легко возрасти в зависимости от квалификации оперативного работника и качества оборудования;

c) нелинейность, дрейф, повторяемость и воспроизводимость в используемом термометре и его преобразовательном механизме (в зависимости от типа элемента термометра);

d) эффективность теплообмена между элементом термометра и воздухом в метеорологической будке, которая должна обеспечивать тепловое равновесие между термометром и воздухом (в зависимости от системы временной константы

или коэффициента запаздывания). В хорошо сконструированной, вентилируемой психрометрической будке эта погрешность будет совсем незначительной, однако в противном случае она может быть серьезной;

e) эффективность психрометрической будки, которая должна обеспечивать равенство температуры воздуха внутри нее и температуры воздуха, непосредственно окружающего будку. В хорошо сконструированной будке эта погрешность невелика, однако в конкретных обстоятельствах разница температур в эффективной и неэффективной будках может достигать 3 °C и даже больше;

f) установка будки, которая должна обеспечивать ее размещение в репрезентативных температурных условиях того региона, который подлежит мониторингу. Наличие поблизости источников и поглотителей тепла (здания, другие нерепрезентативные поверхности ниже и вокруг будки) и топография (холмы, границы между сушей и водой) могут вызвать значительные погрешности. Метаданные станции должны содержать четкое и регулярно обновляемое описание установки (см. приложение 1.F) для информирования пользователей данных о возможных погрешностях, связанных с установкой.

Как систематические, так и случайные погрешности, возникают на всех вышеупомянутых этапах. Воздействие источников погрешностей d)–f) может быть сведено к минимуму, если операции проводятся весьма осторожно и имеется подходящая территория для размещения приборов; в противном случае эти источники погрешностей могут способствовать возникновению весьма значительной погрешности. В то же время они иногда упускаются из вида при обсуждении погрешности, как будто при лабораторной калибровке приборов могут быть выявлены все погрешности полностью.

В метеорологии установление действительного значения является трудной задачей (Linacre, 1992). Хорошо продуманные сравнения приборов в полевых условиях дают возможность определить характеристики приборов, с тем чтобы дать правильную оценку погрешности, возникающей на указанных выше стадиях (a)–(e). Если организация станции была документирована должным образом, последствия неудачного выбора метеорологической площадки могут корректироваться систематически по определенным параметрам (например, ветер; см. WMO, 2002), и они должны оцениваться для других параметров.

Сравнение результатов наблюдений станций с результатами численного анализа полей, полученных на основе использования данных соседних станций, является эффективной оперативной процедурой КК, если в данном регионе имеются достаточно надежные станции. Расхождения между данными отдельных наблюдений на станции и значениями, полученными путем интерполяции проанализированных полей, объясняются погрешностями интерполяции метеорологических величин, а также эффективностью работы самой станции. Однако для определенного периода средняя погрешность в каждой точке проанализированного поля может считаться равной нулю, если окружающие станции подходят для тщательного анализа. В таком случае может быть рассчитано среднее и стандартное отклонение различий между данными станции и проанализированного поля, и эти данные могут быть приняты в качестве погрешностей измерения станции (включая воздействия в результате установки приборов). В результате этого погрешность в оценке среднего значения измеряемой величины за продолжительный период времени может быть весьма незначительной (если не изменяются условия измерений на данной станции), и эти соображения лежат в основе исследований изменения климата.

1.6.3 Погрешности измерения одного прибора

Для выражения и расчета неопределенностей следует воспользоваться публикацией ISO/IEC (2008)/JCGM (2008). Она содержит подробное практическое описание определений и методов представления информации, а также всеобъемлющее описание подходящих статистических методов с многочисленными иллюстративными примерами.

1.6.3.1 *Статистические распределения данных наблюдений*

Для определения погрешности любого отдельного измерения необходимо в первую очередь решить вопрос о статистическом подходе. С этой целью указываются следующие определения (ISO/IEC (2008)/JCGM (2008), ОКРМ, 2012):

a) стандартная погрешность;

b) расширенная погрешность;

c) дисперсия, стандартное отклонение;

d) статистический интервал охвата.

Если проведено n сравнений оперативного прибора, при которых измеряемая переменная величина и все другие значимые переменные остаются постоянными, если наилучшая оценка действительного значения устанавливается путем использования образцового эталона, и если измеряемая переменная величина имеет гауссово распределение[9], то результат можно представить в том виде, как это сделано на рисунке 1.2.

На этом рисунке T — это действительная величина; $\bar{O}$ — среднее значение, вычисленное по n значениям величины O, измеренным одним прибором; и σ — среднеквадратическое отклонение наблюдаемых величин от их средних значений.

В данном случае могут быть определены следующие характеристики:

a) систематическая погрешность, часто именуемая смещением, дается алгебраической разностью $\bar{O} - T$. Систематические погрешности невозможно исключить, но часто их можно уменьшить. Для компенсации систематического воздействия может применяться поправочный коэффициент. Обычно для исключения систематических погрешностей измерительного прибора следует проводить надлежащие калибровки и корректировки. Систематические погрешности, вызванные воздействием условий окружающей среды или местом размещения, могут быть лишь уменьшены;

b) случайная погрешность, которая возникает в результате непредсказуемых или стохастических временных и пространственных колебаний. Степень этого случайного воздействия может быть выражена стандартным отклонением σ, определенным после проведения n измерений, где n должно быть достаточно большим. В принципе σ является мерой для неопределенности $\bar{O}$;

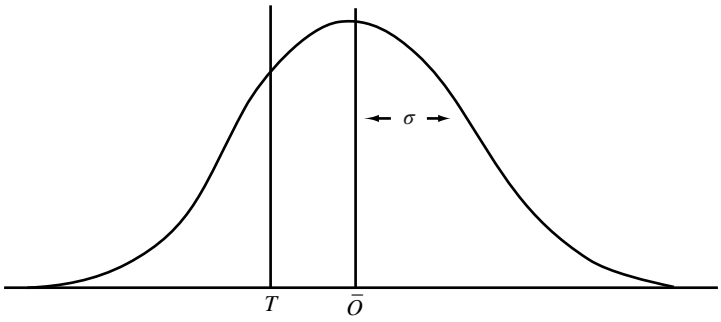


Рисунок 1.2. Распределение данных при инструментальном сравнении.

[9] Отметим, однако, что несколько метеорологических переменных не соответствуют гауссову распределению. См. п. 1.6.3.2.3.

c) точность измерения, которая представляет собой степень совпадения результата измерения и действительного значения измеряемой величины. Точность измеряющего прибора — это способность давать ответы, близкие к истинному значению. Отметим, что понятие «точность» является качественным понятием;

d) погрешность измерения, которая представляет параметр, связанный с результатом измерения, характеризует дисперсию значений, которые могли бы быть разумно приписаны измеряемой величине. Неопределенности, связанные со случайными и систематическими воздействиями, которые порождают погрешность, могут оцениваться, с тем чтобы выразить погрешность измерения.

1.6.3.2 *Оценка действительного значения*

В обычной практике данные наблюдений используются для того, чтобы оценить действительное значение. Если систематическая погрешность отсутствует или была исключена из данных, то оценкой для действительного значения может приблизительно служить среднее значение результатов большого числа правильно выполненных независимых измерений. В случае, когда число выполненных измерений невелико, их среднее значение имеет свое собственное распределение, и можно указать лишь на определенные пределы, внутри которых может находиться действительное значение. Для того чтобы сделать это, необходимо выбрать статистическую вероятность (уровень достоверности) для этих пределов и знать распределение погрешности средних значений.

Очень полезное и четкое описание оценки действительного значения и тесно связанных с ней вопросов представлено в работе Natrella (1966). Дальнейшее обсуждение этого вопроса содержится в работе Eisenhart (1963).

1.6.3.2.1 **Оценка действительного значения при большом *n***

В случае, когда число наблюдений n велико, распределение средних значений образцов является нормальным (гауссовым), даже если сами погрешности наблюдений таковыми не являются. В этом случае, а также когда известно, что распределение средних значений выборок является нормальным (гауссовым) в силу других причин, пределы, внутри которых может находиться действительное значение средней величины, получают из следующих уравнений:

верхний предел: $$L_U = \bar{X} + k \cdot \frac{\sigma}{\sqrt{n}} \tag{1.2}$$

нижний предел: $$L_L = \bar{X} - k \cdot \frac{\sigma}{\sqrt{n}} \tag{1.3}$$

где $\bar{X}$ — среднее из наблюдений $\bar{O}$, откорректированное на значение систематической погрешности; σ — среднеквадратическое отклонение для генеральной совокупности; k — коэффициент, соответствующий выбранному уровню достоверности, который может быть рассчитан при помощи функции нормального распределения.

Можно привести некоторые значения k:

Уровень достоверности	*90 %*	*95 %*	*99 %*
k	1,645	1,960	2,575

Уровень достоверности, использованный в приведенной выше таблице, определен для условия, когда действительное значение не превысит по величине ни один из конкретных пределов (верхний или нижний), которые должны быть рассчитаны. При указании уровня достоверности, при котором действительное значение будет находиться в интервале между двумя пределами, необходимо рассматривать обе зоны, находящиеся

за верхним и нижним пределами. Учитывая это, видно, что k принимает значение 1,96 при вероятности 95 %, и что действительное значение средней величины находится между пределами L_U и L_L.

1.6.3.2.2 **Оценка действительного значения при небольшом *n***

В случае, когда n невелико, средние значения выборок соответствуют t-распределению Стьюдента при условии, что погрешности наблюдений имеют гауссово или близкое к гауссовому распределение. В этом случае, и для выбранного уровня достоверности, можно получить верхний и нижний пределы следующим образом:

верхний предел:
$$L_U \approx \bar{X} + t \cdot \frac{\hat{\sigma}}{\sqrt{n}} \tag{1.4}$$

нижний предел:
$$L_L \approx \bar{X} - t \cdot \frac{\hat{\sigma}}{\sqrt{n}} \tag{1.5}$$

где t — это коэффициент (t Стьюдента), который зависит от выбранного уровня достоверности и от числа измерений n; и $\hat{\sigma}$ — оценочное значение стандартного отклонения для генеральной совокупности, полученное на основе результатов измерений при помощи следующего уравнения:

$$\hat{\sigma}^2 = \frac{\sum_{i=1}^{n}\left(X_i - \bar{X}\right)^2}{n-1} = \frac{n}{n-1} \cdot \sigma_0^2 \tag{1.6}$$

где X_i — отдельное значение O_i, откорректированное с учетом систематической погрешности.

Ниже приводятся некоторые значения t:

Уровень достоверности	*90 %*	*95 %*	*99 %*
df			
1	6,314	12,706	63,657
4	2,132	2,776	4,604
8	1,860	2,306	3,355
60	1,671	2,000	2,660

где df — это степени свободы, связанные с числом измерений следующим образом: $df = n - 1$. Уровень достоверности, используемый в данной таблице, определен для случая, когда действительное значение не превосходит по величине ни один из конкретных пределов (ни верхний, ни нижний), которые должны быть рассчитаны. Когда нужно указать доверительный уровень, при котором действительное значение находится между этими двумя пределами, необходимо поступить так же, как и в случае с большим n. С учетом этого становится ясно, что n принимает значение 2,306 при вероятности 95 % того, что действительное значение находится между пределами L_U и L_L, если для получения оценки проведено девять измерений ($df = 8$).

По мере увеличения n значения t приближаются к значениям k, и можно видеть, что значения k очень близки к значениям t, когда df равно 60. По этой причине в случаях, когда число измерений среднего значения превышает 60, нередко используются таблицы значений k (предпочтительнее, чем таблицы значений t).

1.6.3.2.3 **Оценка действительного значения — дополнительные замечания**

Исследователям следует учитывать, является ли распределение погрешностей гауссовым или нет. Распределение самих переменных величин, таких как солнечное сияние,

видимость, влажность и высота нижней границы облачности, не является гауссовым, и их математическое описание должно основываться на правилах, действительных для каждого конкретного типа распределения (Brooks и Carruthers, 1953).

На практике данные наблюдений содержат как случайные, так и систематические ошибки. В каждом конкретном случае полученное в результате наблюдений среднее значение должно быть откорректировано с учетом систематической погрешности, если она известна. Когда это сделано, оценка действительного значения все же остается неточной из-за случайных погрешностей, как показано в уравнениях, и из-за неизвестной составляющей систематической погрешности. Для получения общей погрешности необходимо установить пределы для погрешности систематической погрешности и объединить их с пределами для случайных погрешностей. Однако до тех пор, пока неопределенность систематической погрешности не выражена в понятиях вероятности и подходящим образом не скомбинирована со случайной погрешностью, мы не можем знать уровень достоверности. Желательно, следовательно, чтобы систематическая погрешность была определена полностью.

1.6.3.3 ***Выражение погрешности***

Если случайные или систематические воздействия признаются, однако их уменьшение или поправки невозможны или не применяются, следует провести оценку итоговой погрешности измерения. Эта погрешность устанавливается после оценки погрешности, возникающей в результате случайных воздействий и несовершенной поправки результата систематических воздействий. Обычной практикой является выражение погрешности в качестве «суммарной погрешности» в связи со «статистическим интервалом охвата». Для того, чтобы соответствовать общепринятой в метрологии практике, 95 % доверительный уровень или $k = 2$ следует использовать для всех типов измерений, а именно:

$$<\textit{суммарная погрешность}> = k \cdot \sigma = 2 \cdot \sigma \qquad (1.7)$$

В результате этого действительное значение, определенное в п. 1.6.1.2, будет выражено в следующем виде:

$$<\textit{действительное значение}> = <\textit{измеряемая величина}> \pm <\textit{суммарная погрешность}> = <\textit{измеряемая величина}> \pm 2\sigma$$

1.6.3.4 ***Измерения дискретных значений***

Хотя состояние атмосферы может быть хорошо описано при помощи физических переменных или количественных значений, ряд метеорологических явлений выражаются посредством дискретных значений. Характерными примерами подобных значений являются определение солнечного сияния, осадков или молнии, а также переохлажденных осадков. Все эти параметры могут быть выражены только словами «да» или «нет». В отношении ряда параметров, которые все являются членами группы существующих метеорологических явлений, существует несколько возможностей. Например, при передаче сообщений о текущей погоде требуется проведение различия между изморозью, дождем, снегом, градом и их сочетаниями. Для практики подобных видов неприемлемыми являются расчеты погрешности, аналогичные тем, о которых говорилось выше. Некоторые из этих параметров связаны с цифровым пороговым значением (например, обнаружение солнечного сияния с использованием интенсивности прямой радиации) и определение погрешности любой производной переменной (например, продолжительность солнечного сияния) можно рассчитать исходя из оценочной неопределенности переменной источника (например интенсивность прямой радиации). Однако этот метод применяется только для производных параметров, а не для типичных явлений текущей погоды. Несмотря на невозможность использования простого численного подхода, имеется целый ряд статистических методов для определения качества данных подобных наблюдений. Подобные методы основаны на сравнениях двух комплектов данных, при этом один комплект определяется в качестве эталона. Результатом подобного сравнения является матрица сопряженности, представляющая перекрестные частоты взаимных явлений. В своей самой простой форме, когда переменная величина представляет собой

булевулогическую переменную («да» или «нет»), подобная матрица представляет собой матрицу 2 x 2 с рядом равных событий в элементах по диагональной оси и «промахов» и «ложных тревог» в других элементах. Подобная матрица позволяет выводить проверочные показатели или индексы, которые должны отражать качество данных наблюдений. Этот метод описан Murphy and Katz (1985). Его обзор дается Kok (2000).

1.6.4 Требования к точности

1.6.4.1 *Общие сведения*

Погрешность, с которой должна измеряться какая-либо метеорологическая величина, зависит от той конкретной цели, для которой требуется измерение. В целом пределы эффективности измерительного устройства или системы будут определяться изменчивостью того параметра, который должен измеряться в пространственном и временном масштабах, подходящих для данного применения.

Результат любого измерения можно разложить на две составляющие — сигнал и шум. Сигнал предстоит определить, а шум — это составляющая, не имеющая отношения к измеряемой величине. Шум может возникать по нескольким причинам: в результате погрешности в данных наблюдений, из-за того, что наблюдения проводятся в неправильный срок и в неподходящем месте, или в связи с тем, что для наблюдаемой физической величины характерны короткопериодные или мелкомасштабные неоднородности, которые не имеют отношения к проводимым наблюдениям и поэтому должны быть сглажены. Если предположить, что ошибка в наблюдениях может быть устранена по желанию, то шум, связанный с другими причинами, обусловит предел для точности измерений. Дальнейшее совершенствование методов наблюдения позволит улучшить измерение шума, однако не приведет к значительному улучшению результатов по сигналу.

С другой стороны, прибор, погрешность которого превышает амплитуду самого сигнала, может дать мало информации об истинной величине или не дать ее совсем. Таким образом, амплитуды шума и сигнала служат соответственно для того, чтобы определить:

a) пределы эффективности, вне которых усовершенствование приборов не является необходимым;

b) пределы эффективности, ниже которых полученные данные не будут приниматься в расчет.

Эта тема о выявлении и определении вышеупомянутых пределов (a) и (b) была подробно рассмотрена для аэрологических данных в *Performance Requirements of Aerological Instruments* (Рабочие характеристики аэрологических приборов) (WMO-No. 267). Однако требования к точности формулируются, как правило, не на основе подобных доводов, а на основе представлений, с одной стороны, о практически достижимой эффективности и, с другой стороны, о потребностях пользователей данных.

1.6.4.2 *Требуемая и достижимая эффективность*

Понятие эффективности измерительной системы охватывает ее надежность, капитальные и текущие расходы в течение срока ее службы, а также пространственное разрешение, однако рассматриваемая в настоящем документе эффективность ограничивается погрешностью измерений (включая пространственное разрешение) и разрешением по времени.

Существуют различные формулировки требований к эффективности, при этом как потребности, так и возможности изменяются со временем. Приведенные в приложении 1.A

формулировки являются наиболее авторитетными на момент написания настоящей работы и могут быть приняты в качестве полезных рекомендаций для дальнейших разработок, хотя и не носят окончательного характера.

Требования в отношении переменных величин, наиболее часто используемых в синоптической, авиационной и морской метеорологии, а также в климатологии, представлены в обобщенном виде в приложении 1.A[10]. Перечисленные в нем требования касаются только приземных измерений, данные которых участвуют в международном обмене. В *Наставлении по Глобальной системе обработки данных и прогнозирования* (ВМО-№ 485) приводятся подробности о требованиях к данным наблюдений для центров Глобальной системы обработки данных и прогнозирования. Требование к погрешности при измерениях параметров ветра приведено отдельно для скорости и для направления ветра, поскольку в таком виде сообщаются данные о ветре.

Способность отдельных измерительных приборов и систем наблюдения удовлетворять указанные потребности постоянно изменяется по мере развития приборного обеспечения и технологии наблюдений. Характеристики типичных приборов или систем, которые используются в настоящее время, представлены в приложении 1.A[11]. Следует отметить, что во многих случаях достижимая оперативная погрешность не удовлетворяет указанным требованиям. Для некоторых из физических величин такие показатели погрешности достижимы лишь при наличии высококачественного оборудования и надлежащих процедур.

Требования, касающиеся погрешности при аэрологических измерениях, рассматриваются в настоящем томе, глава 12.

---

[10] Разработано Группой экспертов Комиссии по основным системам (КОС) по потребностям в данных с автоматических метеорологических станций (2004 г.) и утверждено президентом КПМН для включения в настоящее издание Руководства после консультации с президентами других технических комиссий.

[11] Разработано Группой экспертов КПМН по технологии приземных наблюдений и методам измерений (2004 г.) и утверждено президентом КПМН для включения в настоящее Руководство.

ПРИЛОЖЕНИЕ 1.A. ТРЕБОВАНИЯ К ОПЕРАТИВНОЙ ПОГРЕШНОСТИ ИЗМЕРЕНИЙ И РАБОЧИМ ХАРАКТЕРИСТИКАМ ПРИБОРОВ

(См. пояснительные примечания в конце таблицы; цифры в верхней строке обозначают номера столбцов.)

1	*2*	*3*	*4*	*5*	*6*	*7*	*8*	*9*
Переменная	*Диапазон*	*Сообщаемое разрешение*	*Способ измерения/ наблюдения*	*Требуемая погрешность измерения*	*Постоянная времени прибора*	*Время усреднения результатов*	*Достижимая погрешность измерения*	*Примечания*
1. Температура								
1.1 Температура воздуха	–80 °C до 60 °C	0,1 K	I	0,3 K для ≤ -40 °C 0,1 K для > -40 °C и ≤ 40 °C 0,3 K для > 40 °C	20 с	1 мин	0,2 K	На достижимую погрешность и фактическую постоянную времени может оказывать влияние конструкция метеорологической будки, защищающей термометр от солнечного излучения. Постоянная времени зависит от потока воздуха над чувствительным элементом
1.2 Экстремальные значения температуры воздуха	–80 °C до 60 °C	0,1 K	I	0,5 K для ≤ -40 °C 0,3 K для > -40 °C и ≤ 40 °C 0,5 K для > 40 °C	20 с	1 мин	0,2 K	
1.3 Температура поверхности моря	–2 °C до 40 °C	0,1 K	I	0,1 K	20 с	1 мин	0,2 K	
1.4 Температура почвы	–50 °C до 50 °C	0,1 K	I		20 с	1 мин	0,2 K	

1	*2*	*3*	*4*	*5*	*6*	*7*	*8*	*9*
Переменная	*Диапазон*	*Сообщаемое разрешение*	*Способ измерения/ наблюдения*	*Требуемая погрешность измерения*	*Постоянная времени прибора*	*Время усреднения результатов*	*Достижимая погрешность измерения*	*Примечания*
2. Влажность								
2.1 Температура точки росы	–80 °C до 35 °C	0,1 K	I	0,1 K	20 с	1 мин	0,25 K	Погрешность измерения зависит от отклонения от температуры воздуха
					Температура смоченного термометра (психрометр)			
2.2 Относительная влажность	0 % – 100 %	1 %	I	1 %	20 с	1 мин	0,2 K	В случае прямого измерения и сочетания с температурой воздуха (сухой термометр). Возможны значительные ошибки, обусловленные проблемами вентиляции и поддержания чистоты (см. также примечание 11). Пороговая величина в 0 °C подлежит уведомлению для смоченного термометра
					Твердое и прочие состояния			
					40 с	1 мин	3 %	Постоянная времени и достижимая погрешность приборов измерения твердого состояния могут показывать значительную зависимость от температуры и влажности

1	*2*	*3*	*4*	*5*	*6*	*7*	*8*	*9*
Переменная	*Диапазон*	*Сообщаемое разрешение*	*Способ измерения/ наблюдения*	*Требуемая погрешность измерения*	*Постоянная времени прибора*	*Время усреднения результатов*	*Достижимая погрешность измерения*	*Примечания*
3. Атмосферное давление								
3.1 Давление	500–1080 гПа	0,1 гПа	I	0,1 гПа	2 с	1 мин	0,15 гПа	Давление как на уровне станции, так и СУМ. На погрешность измерения существенно влияет динамическое давление, обусловленное действием ветра, если не предпринимается никаких мер предосторожности. Неадекватная компенсация температуры преобразователем может существенно повлиять на погрешность измерения. При измерениях с борта судов на давление на СУМ влияет погрешность при определении высоты барометра
3.2 Барическая тенденция	Не указан	0,1 гПа	I	0,2 гПа			0,2 гПа	Разница между мгновенными значениями

1	*2*	*3*	*4*	*5*	*6*	*7*	*8*	*9*
	Переменная	*Диапазон*	*Сообщаемое разрешение*	*Способ измерения/ наблюдения*	*Требуемая погрешность измерения*	*Постоянная времени прибора*	*Время усреднения результатов*	*Достижимая погрешность измерения*	*Примечания*
4.	**Облачность**								
4.1	Количество облаков	0/8—8/8	1/8	I	1/8	н/п		2/8	Период времени, за который формируется определенная структура облаков, может быть использован для автоматической оценки количества облаков нижнего яруса
4.2	Высота нижней границы облаков	0 м — 30 км	10 м	I	10 м для ≤ 100 м 10% для > 100 м	н/п		~10 м	Достижимая погрешность измерения может с трудом поддаваться определению. Не существует никакого четкого определения для измеряемой при помощи приборов нижней границы облаков (например, основанного на глубине проникновения или существенном изменении неоднородности профиля ослабления). Значительная погрешность во время осадков
4.3	Высота верхней границы облаков	Нет данных							

1	*2*	*3*	*4*	*5*	*6*	*7*	*8*	*9*
Переменная	*Диапазон*	*Сообщаемое разрешение*	*Способ измерения/ наблюдения*	*Требуемая погрешность измерения*	*Постоянная времени прибора*	*Время усреднения результатов*	*Достижимая погрешность измерения*	*Примечания*
5. Ветер								
5.1 Скорость	0–75 м·с$^{-1}$	0,5 м·с$^{-1}$	A	0,5 м·с$^{-1}$ для ≤ 5 м·с$^{-1}$ 10 % для > 5 м·с$^{-1}$	Путь синхронизации 2–5 м	2 и/или 10 мин	0,5 м·с$^{-1}$ для ≤ 5 м·с$^{-1}$ 10 % для > 5 м·с$^{-1}$	В среднем более 2 и/или 10 мин Нелинейные устройства. Необходим тщательный подход к разработке процесса усреднения. Путь синхронизации обычно выражается в виде усредненных величин длины синхронизации, рассчитанных по декартовым компонентам (см. том V, глава 3, 3.6 настоящего Руководства). При использовании ультразвуковых анемометров не требуется ни пути синхронизации, ни постоянной времени. Для перемещающихся мобильных станций необходимо учитывать перемещение станции, в том числе связанную с ним погрешность
5.2 Направление	0°–360°	1°	A	5°	Степень затухания > 0,3	2 и/или 10 мин	5°	
5.3 Порывы	0,1–150 м·с$^{-1}$	0,1 м·с$^{-1}$	A	10 %		3 с	0,5 м·с$^{-1}$ для ≤ 5 м·с$^{-1}$ 10 % для > 5 м·с$^{-1}$	Следует регистрировать самый сильный порыв, усредненный за 3 с

1	*2*	*3*	*4*	*5*	*6*	*7*	*8*	*9*
Переменная	*Диапазон*	*Сообщаемое разрешение*	*Способ измерения/ наблюдения*	*Требуемая погрешность измерения*	*Постоянная времени прибора*	*Время усреднения результатов*	*Достижимая погрешность измерения*	*Примечания*
6. Осадки								
6.1 Количество (суточное)	0–500 мм	0,1 мм	T	0,1 мм для ≤ 5 мм 2% для > 5 мм	н/п	н/п	Большее значение из 5 % или 0,1 мм	Общее количество, основанное на суточных количествах. Погрешность измерения зависит от аэродинамической эффективности осадкомеров при сборе осадков и от потерь в результате испарения в нагреваемых осадкомерах
6.2 Высота снежного покрова	0–25 м	1 см	I	1 см для ≤ 20 см 5% для > 20 см	< 10 с	1 мин	1 см	Средняя высота снежного покрова на территории, репрезентативной для места проведения наблюдений
6.3 Толщина слоя льда при обледенении судов	Не указан	1 см	I	1 см для ≤ 10 см 10% для > 10 см				

	1	2	3	4	5	6	7	8	9
	Переменная	*Диапазон*	*Сообщаемое разрешение*	*Способ измерения/ наблюдения*	*Требуемая погрешность измерения*	*Постоянная времени прибора*	*Время усреднения результатов*	*Достижимая погрешность измерения*	*Примечания*
6.4	Интенсивность осадков	0,02 – 2 000 мм·ч$^{-1}$	0,1 мм·ч$^{-1}$	I	(составляющий компонент): н/п для 0,02—0,2 мм·ч$^{-1}$ 0,1 мм·ч$^{-1}$ для 0,2—2 мм·ч$^{-1}$ 5% для > 2 мм·ч$^{-1}$	< 30 с	1 мин	В условиях постоянного потока в лаборатории 5 % выше 2 мм·ч$^{-1}$, 2 % выше 10 мм·ч$^{-1}$ В полевых условиях 5 мм·ч$^{-1}$ и 5 % выше 100 мм·ч$^{-1}$	Значения погрешности только для жидких осадков. Значительные воздействия на погрешность оказывает ветер. Приборы могут показывать весьма нелинейное поведение. Для < 0,2 мм·ч$^{-1}$: при использовании дождемеров накопительного типа в случае выпадения твердых осадков значительное воздействие оказывается на постоянную времени прибора в режиме только обнаружения (да/нет)
6.5	Продолжительность осадков (суточная)	0–24 ч	60 с	T	н/п	60 с			Пороговое значение 0,02 мм·ч$^{-1}$

1	*2*	*3*	*4*	*5*	*6*	*7*	*8*	*9*
Переменная	*Диапазон*	*Сообщаемое разрешение*	*Способ измерения/ наблюдения*	*Требуемая погрешность измерения*	*Постоянная времени прибора*	*Время усреднения результатов*	*Достижимая погрешность измерения*	*Примечания*
7. Радиация								
7.1 Продолжительность солнечного сияния (суточная)	0–24 ч	60 с	Т	0,1 ч	20 с	н/п	Более 0,1 ч или 2 %	
7.2 Чистая радиация, энергетическая экспозиция (суточная)	Не указан	1 Дж·м$^{-2}$	Т	0,4 МДж·м$^{-2}$ для ≤ 8 МДж·м$^{-2}$ 5% для > 8 МДж·м$^{-2}$	20 с	н/п	15 %	Энергетическая экспозиция, выраженная в виде суточных сумм (количество) (чистой) радиации. Наилучшая достигаемая эксплуатационная погрешность достигается путем сочетания измерений двух пиранометров и двух пиргеометров
7.3 Глобальное нисходящее/ восходящее солнечное излучение	Не указан	1 Дж·м$^{-2}$	Т	2 %	20 с	н/п	5 % (суточное) 8 % (часовое)	Суточное общее излучение
7.4 Нисходящее/ восходящее длинноволновое излучение на поверхность Земли	Не указан	1 Дж·м$^{-2}$	Т	5 %	20 с	н/п	10 %	

1	2	3	4	5	6	7	8	9
Переменная	*Диапазон*	*Сообщаемое разрешение*	*Способ измерения/ наблюдения*	*Требуемая погрешность измерения*	*Постоянная времени прибора*	*Время усреднения результатов*	*Достижимая погрешность измерения*	*Примечания*
8. Видимость								
8.1 Метеорологическая оптическая дальность (МОД)	10 м – 100 км	1 м	I	50 м для ≤ 600 м 10% для > 600 м — ≤ 1 500 м 20% для > 1 500 м	< 30 с	1 и 10 мин	Наибольшее из: 20 м или 20 %	Достижимая погрешность измерения может зависеть от причины затемнения. Количество, подлежащее усреднению: коэффициент ослабления (см. том V, глава 3, 3.6 настоящего Руководства). Предпочтение отдается усреднению логарифмических значений
8.2 Дальность видимости на взлетно-посадочной полосе	10 – 2000 м	1 м	A	10 м для ≤ 400 м 25 м для > 400 м – ≤ 800 м 10% для > 800 м	< 30 с	1 и 10 мин	Более 20 м или 20 %	В соответствии с ВМО-№ 49, том II, дополнение A (издание 2004 г.) и документом Международной организации гражданской авиации (ИКАО) 9328-AN/908 (второе издание, 2000 г.). Могут существовать другие варианты этих документов, уточняющие другие величины.
8.3 Яркость фона	0–40 000 кд·м$^{-2}$	1 кд·м$^{-2}$	I		30 с	1 мин	10%	Связано с 8.2 "Дальность видимости на взлетно-посадочной полосе"

1	2	3	4	5	6	7	8	9
Переменная	*Диапазон*	*Сообщаемое разрешение*	*Способ измерения/ наблюдения*	*Требуемая погрешность измерения*	*Постоянная времени прибора*	*Время усреднения результатов*	*Достижимая погрешность измерения*	*Примечания*
9. Волны								
9.1 Значительная высота волн	0–50 м	0,1 м	A	0,5 м для ≤ 5 м 10 % для > 5 м	0,5 с	20 мин	0,5 м для ≤ 5 м 10 % для > 5 м	Усреднение за 20 мин при измерениях с помощью приборов
9.2 Период волны	0–100 с	1 с	A	0,5 с	0,5 с	20 мин	0,5 с	Усреднение за 20 мин при измерениях с помощью приборов
9.3 Направление волн	0–360°	1°	A	10°	0,5 с	20 мин	20°	Усреднение за 20 мин при измерениях с помощью приборов
10. Испарение								
10.1 Испарения из чаши испарителя	0–100 мм	0,1 мм	T	0,1 мм для ≤ 5 мм 2 % для > 5 мм	н/п			

Примечания:

1. Колонка 1 — основная переменная величина.
2. Колонка 2 — общий диапазон для большинства переменных величин; пределы зависят от местных климатических условий.
3. Колонка 3 — наиболее точное разрешение, как это определено в *Наставлении по кодам* (ВМО-№ 306).
4. Колонка 4:
   I = Мгновенное значение: в целях исключения естественной мелкомасштабной изменчивости и шума в качестве минимального и наиболее приемлемого значения рассматривается значение, усредненное за период в 1 минуту; приемлемы также усредненные значения за периоды вплоть до 10 минут.
   A = Усредненное значение: усредненные значения за фиксированный период времени, как это определено требованиями кодирования.
   T = Суммарные значения: суммарные значения за фиксированный период времени, как это определено требованиями кодирования.
5. Колонка 5 — рекомендованные требования к погрешности измерения для общего оперативного использования, т. е. данные уровня II согласно FM 12, 13, 14, 15 и его соответствующим эквивалентам BUFR. Они были приняты всеми восемью техническими комиссиями и применимы для синоптической, авиационной, сельскохозяйственной и морской метеорологии, гидрологии, климатологии и прочего. Эти требования применимы как к неавтоматическим метеорологическим станциям, так и АМС, как это определено в *Наставлении по Интегрированной глобальной системе наблюдений ВМО* (ВМО-№ 1160). Отдельные применения могут иметь менее строгие требования. Указанное значение требуемой погрешности измерения представляет собой погрешность сообщаемого значения по отношению к действительному значению и указывает на тот интервал, в котором находится действительное значение при указанной погрешности. Рекомендуемый уровень вероятности составляет 95 % (k = 2), что соответствует уровню 2 σ для нормального (гауссового) распределения переменной величины. Предположение о том, что в расчет приняты все известные поправки, подразумевает, что ошибки в сообщаемых значениях будут иметь среднее значение (или смещение), близкое к нулю. Любое остаточное смещение должно быть незначительным по сравнению с указанным требованием к погрешности измерения. Действительное значение — это значение, которое в оперативных условиях идеально характеризует измеряемую/наблюдаемую переменную величину за репрезентативный временной интервал, на репрезентативной территории и/или в необходимом объеме с учетом размещения и установки приборов.

Примечания *(прод.)*

6. Колонки 2–5 касаются требований, установленных Группой экспертов КОС по потребностям в данных с АМС в 2004 г.
7. Колонки 6–8 касаются типовых оперативных рабочих характеристик, установленных Группой экспертов КПМН по технологии приземных наблюдений и методам измерений в 2004 г.
8. Достижимая погрешность измерения (колонка 8) основана на технических характеристиках прибора при номинальной или рекомендованной установке, которая может быть достигнута в оперативной практике. Ее следует рассматривать в качестве практической помощи пользователям при определении достижимых и допустимых требований.
9. н/п = неприменимо.
10. Термин *погрешность* является более желательным по сравнению с термином *точность* (т. е. погрешность соответствует стандартам ИСО/МЭК/ОКРМ по погрешности измерений (ИСО/МЭК (2008); ОКРМ (2008)).
11. Температура точки росы, относительная влажность и температура воздуха взаимосвязаны и соответственно взаимосвязаны их погрешности. При усреднении предпочтение отдается абсолютной влажности как главной переменной величине.

ПРИЛОЖЕНИЕ 1.B. СТРАТЕГИЯ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ПРОСЛЕЖИВАЕМОСТИ

1. ВВЕДЕНИЕ

Сопоставимость измерений и результатов калибровки играет ключевую роль для многих областей применения: разумеется, от оценки изменчивости и изменений климата и до аспектов, способных повлечь за собой серьезные экономические и правовые последствия в контексте выпуска предупреждений о суровых погодных явлениях для защиты жизни людей и их средств к существованию.

Обеспечение метрологической прослеживаемости позволяет получить полную уверенность в правильности результатов измерений, что вызывает доверие к последующим видам применения данных измерений: прогнозам и предупреждениям, полученным на основе измерений; климатическому анализу и тенденциям, полученным в результате измерений. А это, в свою очередь, ведет к улучшению ситуации в области сокращения рисков бедствий (СРБ), смягчения последствий изменения климата, консультирования лиц, ответственных за разработку политики, здравоохранения и безопасности людей и защиты имущества.

КПМН признала отсутствие прослеживаемости результатов измерений серьезной проблемой, поскольку без регулярного обеспечения прослеживаемости весь потенциал ИГСНВ был бы поставлен под сомнение. В связи с этим КПМН подчеркнула необходимость обратить внимание НМГС на обязательную регулярную калибровку приборов как важнейший инструмент обеспечения требуемой прослеживаемости и качества результатов измерений, в дополнение к профилактическому обслуживанию и периодическим проверкам приборов.

Многие Члены из числа развивающихся стран вообще не располагают лабораторией калибровки для обеспечения сопоставимости их приборов. Некоторые Члены также сталкиваются с трудностями при калибровке своих сетевых приборов и вместо реализации комплексной стратегии калибровки применяют политику проведения поверок в полевых условиях для выявления приборов, не отвечающих требованиям в отношении погрешности, и проведения полной лабораторной калибровки только этих приборов. Поверки в полевых условиях должны охватывать весь диапазон измерений, аналогично плановым калибровкам на месте, и их не следует путать с инспекциями в полевых условиях (см. том V, глава 4, 4.3.4 настоящего Руководства), которые обычно проводятся в один определенный момент (при условиях окружающей среды) и рассматриваются как калибровка «по одной точке».

Стратегия, изложенная в данном приложении, направлена на использование наилучших имеющихся видов практики для укрепления обслуживания в области калибровки и улучшения обеспечения прослеживаемости среди Членов ВМО. Она призвана предоставить широко применяемые руководящие принципы с целью повышения доверия к результатам измерений.

2. ЦЕЛЬ СТРАТЕГИИ

Основной целью стратегии калибровки для гарантии прослеживаемости является обеспечение надлежащей прослеживаемости результатов измерений и калибровки до СИ благодаря непрерывной цепи калибровок, при этом каждая из них вносит вклад в погрешность измерения.

Эта стратегия применима к метеорологическим измерениям, для которых хорошо налажена цепочка прослеживаемости до СИ (например, измерения температуры, атмосферного давления, влажности, скорости ветра, осадков и солнечной радиации).

Стратегия призвана обеспечить руководство по эффективному и действенному достижению этой цели.

3. ОТВЕТСТВЕННОСТЬ ЗА ОСУЩЕСТВЛЕНИЕ СТРАТЕГИИ

Ответственность за обеспечение прослеживаемости возлагается на Членов ВМО, которые должны обеспечить все необходимые калибровки, а также другие необходимые этапы для достижения цели стратегии.

Каждый НМГС самостоятельно выбирает наиболее приемлемый подход для обеспечения прослеживаемости, но настоятельно рекомендуется обеспечить метрологическую прослеживаемость всех результатов измерений.

4. СПОСОБЫ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ПРОСЛЕЖИВАЕМОСТИ

Если упростить определение ИСО/ОКРМ, метрологическую прослеживаемость можно описать как прямую связь между результатом измерения, выполненного в полевых условиях, и результатом, полученным в процессе калибровки в калибровочной лаборатории. Она гарантирует, что разные методы и приборы измерений, используемые в разных странах в разное время, дают надежные, повторяемые, воспроизводимые, совместимые и сопоставимые результаты измерений. Когда результат измерения прослеживается метрологически, его можно с уверенностью соотнести с международно признанными эталонами измерений.

На вершине цепи метрологической прослеживаемости находится сформулированный и принятый на международном уровне эталон, в большинстве случаев СИ, техническая и организационная инфраструктура для которой была разработана и поддерживается МБМВ (www.bipm.org).

Механизм, посредством которого НМУ демонстрируют эквивалентность международному уровню своих стандартов измерений и выпускаемых ими сертификатов калибровки и измерений, называется Соглашением о взаимном признании Международного комитета мер и весов (СВП МКМВ). Результатом СВП являются признанные на международном уровне (рецензируемые и утвержденные) возможности калибровки и измерений (ВКИ) участвующих учреждений. Утвержденные ВКИ и вспомогательные технические данные размещены в открытом доступе в Главной базе данных сравнений СВП МКМВ (http://kcdb.bipm.org/).

НМУ отвечают за поддержание национальных эталонов и обеспечение сопоставимости на национальном уровне либо самостоятельно, либо с помощью НУ. НУ — это учреждения, обладающие большим опытом и действующие на вершине национальной метрологической системы, но не входящие в официальную структуру НМУ. Они призваны отвечать за определенные национальные стандарты и сопутствующее обслуживание, которые не относятся к регулярной сфере деятельности НМУ.

Дальнейшее обеспечение сопоставимости зависит от аккредитованных лабораторий калибровки, которые внедрили систему менеджмента качества, аккредитованную национальным органом по аккредитации. Национальные органы по аккредитации обычно являются подписантами Соглашения о взаимном признании Организации по международному сотрудничеству в области аккредитации лабораторий, которое обеспечивает принятие сертификатов калибровки и доверие к ним за пределами национальных границ.

По возможности, все измерения в любой конкретной стране должны быть прослеживаемы до СИ.

Принимая во внимание все вышеупомянутое, а также возможности и потребности Членов ВМО, можно выделить следующие сценарии обеспечения (или отсутствия) прослеживаемости (номера указывают на последующие разделы, посвященные этой теме):

4.1 полностью гарантируемая прослеживаемость — целевой, высокий уровень достоверности измерений;

4.2 гарантируемая прослеживаемость (без аккредитации) — хороший уровень достоверности, но присутствуют некоторые риски; рекомендуется улучшить;

4.3 частично гарантируемая прослеживаемость — низкая достоверность и высокий риск; необходимо улучшить;

4.4 отсутствие прослеживаемости — невозможно оценить степень достоверности; необходимо безотлагательно улучшить.

4.1 Полностью гарантируемая прослеживаемость — целевой, высокий уровень достоверности измерений

Такая гарантия прослеживаемости (рисунок 1.B.1) обеспечивает полную прослеживаемость результатов метеорологических измерений, предоставляемых конкретными НМГС, в соответствии с международными стандартами. Вся цепочка прослеживаемости охвачена аккредитацией в соответствии с ИСО/МЭК 17025 и/или СВП МКМВ.

Полевые приборы НМГС необходимо регулярно калибровать в аккредитованной лаборатории калибровки, обеспечивая наивысшие достижимые погрешности измерений.

В случае, если лаборатория калибровки также аккредитована для проведения калибровок на месте, которые охватывают весь диапазон метеорологических параметров, такие калибровки могут быть выполнены, но при этом следует проявлять особую осторожность в отношении требуемых и достижимых погрешностей.

Если калибровки на месте не охвачены аккредитацией, их не следует использовать для регулярного обеспечения прослеживаемости, а только в качестве поверок в полевых условиях. Проверки в полевых условиях не относятся к обеспечению прослеживаемости. Они могут применяться только в качестве дополнительного КК, направленного на выявление приборов, выходящих за пределы требуемых погрешностей.

Для достижения этого статуса должны быть выполнены следующие предварительные условия:

– НМГС располагает лабораторией калибровки;

– сотрудники лаборатории хорошо обучены и обладают необходимыми компетенциями, чтобы правильно обращаться с лабораторными эталонными приборами и оборудованием;

– калибровочные эталоны и оборудование соответствуют целевым значениям погрешности, требуемым при калибровке метеорологических приборов;

– калибровочные эталоны и оборудование регулярно калибруются и обслуживаются;

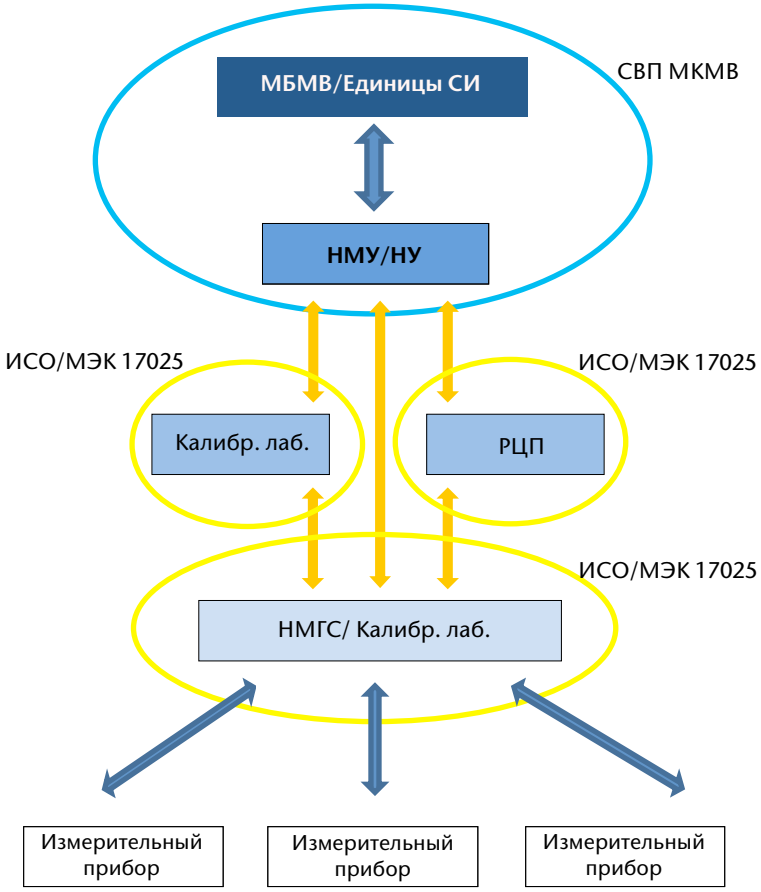


Рисунок 1.B.1. Полностью гарантируемая прослеживаемость — целевой, высокий уровень достоверности измерений

- система менеджмента качества, включая все процедуры калибровки, рабочие инструкции и формы, хорошо документирована и применяется в работе лаборатории;
- лаборатория калибровки аккредитована в соответствии с ИСО/МЭК 17025;
- лаборатория калибровки участвует в межлабораторных сравнениях.

Правление НМГС должно выразить решительную приверженность оказанию поддержки непрерывному укреплению лаборатории калибровки. Это должно сопровождаться четкой политикой в области проведения необходимой регулярной калибровки метеорологических приборов, для которых имеются эталоны, в рамках обязанностей НМГС, включая определенные интервалы калибровки, а также политикой по применению результатов калибровки.

Следует обеспечить прослеживаемость лабораторных эталонов и оборудования посредством калибровки в НМУ, НУ, аккредитованном РЦП ВМО или другой аккредитованной лаборатории калибровки, стремясь удовлетворить потребности Члена в отношении требуемой погрешности.

Совместно с другими соответствующими департаментами лаборатория калибровки НМГС также должна разработать процедуры, направленные на предотвращение пробелов в полевых измерениях из-за деятельности по калибровке. Для этого необходимо иметь небольшой резерв калиброванных приборов, которые можно будет использовать в качестве запасного комплекта для приборов в сети. Извлеченные из сети приборы необходимо калибровать в лаборатории, формируя из них, соответственно, новый запасной комплект, и так далее, чтобы охватить всю сеть.

Дополнительный КК можно обеспечить путем проведения неаккредитованных калибровок на месте или поверок в полевых условиях, но только для выявления приборов, выходящих за рамки значений погрешности, указанных в спецификациях. Обнаруженные приборы необходимо откалибровать в соответствии с аккредитованными методами калибровки.

Набор транспортируемых эталонов и/или портативных калибровочных устройств, используемых для неаккредитованных калибровок на месте или поверок в полевых условиях, необходимо регулярно калибровать в аккредитованной лаборатории калибровки и проверять до и после использования в полевых условиях.

4.2 Гарантируемая прослеживаемость (без аккредитации) — хороший уровень достоверности, но присутствуют некоторые риски; рекомендуется улучшить

Этот тип обеспечения прослеживаемости (рис. 1.B.2) так же уместен и приемлем, но он не обеспечивает полной прослеживаемости результатов метеорологических измерений. Он применим к НМГС, имеющим средства калибровки, но не имеющим аккредитации в соответствии с ИСО/МЭК 17025. Несмотря на отсутствие аккредитации у этих лабораторий калибровки, их калибровочные эталоны должны быть откалиброваны в аккредитованных лабораториях калибровки, аккредитованных РЦП или в лабораториях, подписавших СВП МКМВ. Наименее подходящим, но все же приемлемым способом может стать калибровка, выполненная неаккредитованным РЦП, но этот РЦП должен доказать полностью гарантируемую прослеживаемость своих калибровочных эталонов.

Полевые приборы НМГС должны калиброваться либо в лаборатории калибровки (если она имеется), либо на месте с помощью портативных калибровочных устройств,

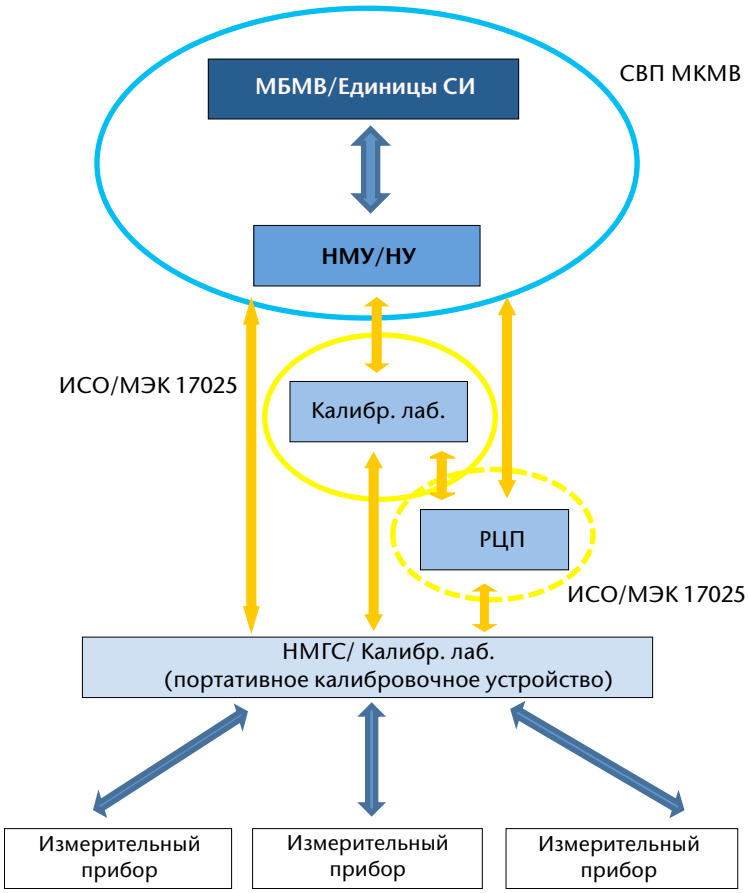


Рисунок 1.B.2. Гарантируемая прослеживаемость (без аккредитации) — хороший уровень достоверности, но присутствуют некоторые риски; рекомендуется улучшить

которые калибруются в аккредитованных лабораториях и охватывают весь диапазон метеорологических параметров. Все калибровки должны проводиться на регулярной основе, обеспечивая наивысшую достижимую погрешность измерений.

Поверки в полевых условиях могут применяться в качестве дополнительного КК, направленного на выявление приборов, выходящих за рамки требуемых значений погрешности, но не для обеспечения прослеживаемости.

Для достижения этого статуса должны быть выполнены следующие предварительные условия:

- в НМГС имеется лаборатория калибровки или по крайней мере портативные калибровочные устройства, охватывающие весь спектр измеряемых метеорологических параметров;
- сотрудники лаборатории хорошо обучены и обладают необходимыми компетенциями, чтобы правильно обращаться с калибровочными эталонами и оборудованием;
- калибровочные эталоны и оборудование соответствуют целевым значениям погрешности, требуемым при калибровке метеорологических приборов;
- калибровочные эталоны и оборудование регулярно калибруются и обслуживаются.

Кроме того, настоятельно рекомендуется обеспечить следующие условия:

- система менеджмента качества, включая все процедуры калибровки, рабочие инструкции и формы, должна быть документирована и применяться в работе лаборатории;
- несмотря на отсутствие аккредитации, средства калибровки должны отвечать требованиям стандарта ИСО/МЭК 17025;
- участие в межлабораторных сравнениях, что будет очень полезно.

Прослеживаемость лабораторных эталонов и оборудования должна быть обеспечена путем калибровки в НМУ, НУ, РЦП или в другой аккредитованной лаборатории калибровки. Неаккредитованные РЦП должны доказать прослеживаемость своих эталонов до СИ через аккредитованную лабораторию, НМУ или НУ.

Приветствуется решительная приверженность правления НМГС оказанию поддержки непрерывному укреплению средств калибровки. Это должно сопровождаться определенной политикой в области проведения необходимой регулярной калибровки всех метеорологических приборов, в рамках обязанностей НМГС, включая интервалы калибровки, а также политикой по применению результатов калибровки.

Необходимо разработать процедуры, направленные на предотвращение пробелов в полевых измерениях из-за деятельности по калибровке. Одно из возможных решений заключается в том, чтобы в распоряжении НМГС находился небольшой запас калиброванных приборов, которые можно было бы использовать в качестве запасного комплекта для приборов в сети. Извлеченные из сети приборы необходимо регулярно калибровать, формируя из них, соответственно, новый запасной комплект, и так далее, чтобы охватить всю сеть.

Дополнительный КК можно обеспечить путем проведения поверок в полевых условиях, но только для выявления приборов, выходящих за рамки значений погрешности, указанных в спецификациях. Набор транспортируемых эталонов или портативных калибровочных устройств, используемых для поверок в полевых условиях, необходимо регулярно калибровать в лаборатории калибровки и проверять до и после использования в полевых условиях.

4.3 Частично гарантируемая прослеживаемость — низкая достоверность и высокий риск; необходимо улучшить

Этот способ обеспечения прослеживаемости (рис. 1.B.3) является наименее подходящим и должен применяться только в тех случаях, когда два вышеупомянутых сценария неприменимы. Он применим к НМГС, не имеющим лаборатории калибровки и портативных калибровочных устройств, но имеющим комплект для проведения инспекции в полевых условиях.

Комплект для инспекции в полевых условиях необходимо регулярно калибровать в аккредитованных лабораториях калибровки, аккредитованных РЦП, лабораториях калибровки, подписавших СВП МКМВ, или в худшем случае в неаккредитованных РЦП или лабораториях калибровки. К последнему варианту следует прибегать только при отсутствии всех вышеупомянутых возможностей и только в том случае, если эти лаборатории могут доказать полностью гарантируемую прослеживаемость своих калибровочных эталонов.

Инспекция в полевых условиях не эквивалентна регулярной калибровке в лаборатории или поверке в полевых условиях, но может быть приемлемым способом обеспечения качества наблюдений в сети. Инспекцию в полевых условиях можно рассматривать в качестве «калибровки по одной точке».

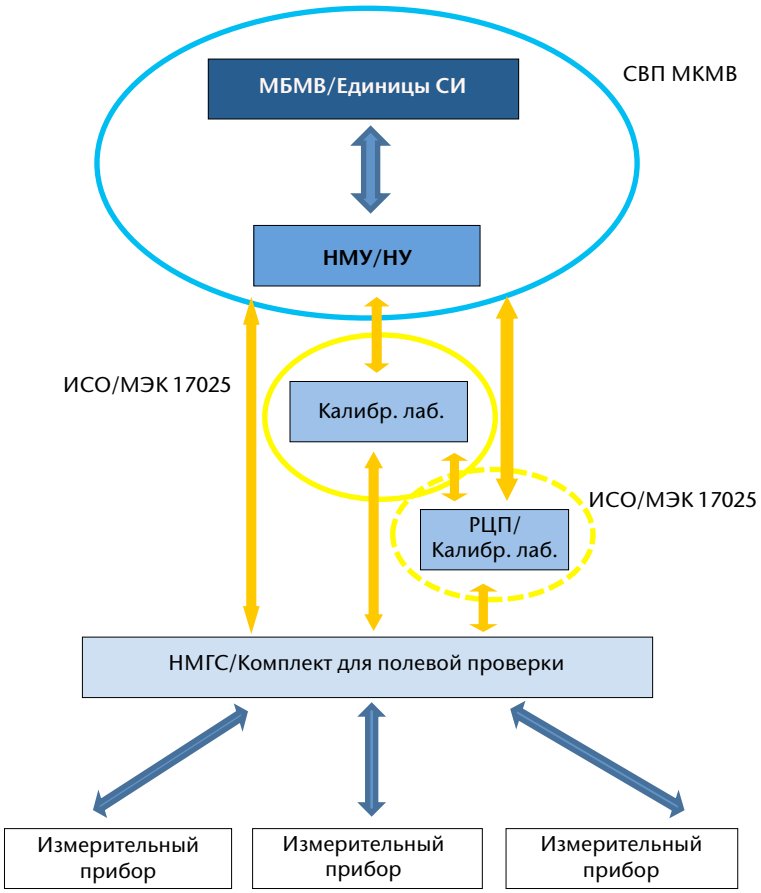


Рисунок 1.B.3. Частично гарантируемая прослеживаемость — низкая достоверность и высокий риск; необходимо улучшить

– В целях обеспечения хотя бы частично гарантируемой прослеживаемости Членам рекомендуется добиться следующего:

– необходимо приобрести комплект для инспекции в полевых условиях с требуемыми метрологическими характеристиками в отношении полевых приборов и с сертификатом калибровки, выданным аккредитованной лабораторией калибровки;

– экономически оправданный комплект для инспекции в полевых условиях должен включать в себя передвижные приборы для измерения, как минимум, давления, температуры, влажности и количества осадков;

– комплект для инспекции в полевых условиях необходимо регулярно калибровать в аккредитованной лаборатории калибровки, аккредитованном РЦП или НМУ либо НУ. В случае, если аккредитованное обслуживание в области калибровки недоступно, выбранная лаборатория калибровки должна продемонстрировать полностью гарантируемую прослеживаемость;

– комплект для инспекции в полевых условиях должен быть проверен до и после использования в полевых условиях и перепроверен, если имеется более одного комплекта;

– сотрудники, которые будут работать с комплектом для инспекции в полевых условиях, должны быть хорошо обучены и компетентны для проведения инспекций в полевых условиях;

– технические процедуры по эксплуатации комплекта для инспекции в полевых условиях должны быть задокументированы;

– инспекции в полевых условиях должны проводиться на регулярной основе;

– результаты инспекций в полевых условиях необходимо документировать.

4.4 Отсутствие прослеживаемости — не применимо

Отсутствие метрологической прослеживаемости приводит к недостаточной надежности метеорологических измерений и, следовательно, сильно снижает достоверность результатов данных измерений, таких как прогнозы погоды, предупреждения и анализ климата. В конечном счете, это ставит под вопрос пользу метеорологических измерений для мирового сообщества. Таким образом, непрослеживаемые результаты измерений влекут за собой весьма серьезные последствия.

В связи с этим прослеживаемость измерений имеет существенно важное значение, и Членам ВМО настоятельно рекомендуется обеспечить прослеживаемость всех измерений, находящихся в их ведении.

ПРИЛОЖЕНИЕ 1.C. РЕГИОНАЛЬНЫЕ ЦЕНТРЫ ПО ПРИБОРАМ

Примечание: информация о возможностях и мероприятиях РЦП размещена по адресу: https://community.wmo.int/activity-areas/imop/Regional_Instrument_Centres.

На своей семнадцатой сессии, состоявшейся в 2018 году, Комиссия по приборам и методам наблюдений рекомендовала[1] следующий круг ведения для всех РЦП.

Региональные центры по приборам должны обладать следующими возможностями для выполнения своих соответствующих функций:

Возможности:

a) РЦП должен иметь необходимые технические средства и лабораторное оборудование, с тем чтобы выполнять функции, необходимые для калибровки метеорологических и соответствующих приборов для измерения параметров окружающей среды;

b) РЦП должен обслуживать комплект эталонных метеорологических приборов и обеспечивать прослеживаемость своих собственных стандартов измерений и измерительных приборов до системы единиц СИ;

c) РЦП должен иметь квалифицированный управленческий и технический персонал для выполнения своих функций;

d) РЦП должен располагать техническими процедурами для калибровки метеорологических и соответствующих приборов для измерения параметров окружающей среды, пользуясь калибровочным оборудованием, применяемым РЦП;

e) РЦП должен иметь системы менеджмента качества, желательно соответствующую стандарту ИСО/МЭК 17025, и обеспечивать ее работу;

f) РЦП должен участвовать в межлабораторных сравнениях эталонных калибровочных приборов и методов и/или организовывать такие сравнения;

g) РЦП должен, по мере целесообразности, использовать доступные ресурсы и возможности, согласно наивысшим интересам Членов;

h) РЦП должен, по мере возможности, пользоваться международными стандартами, применяемыми для калибровочных лабораторий, такими как ИСО/МЭК 17025[2];

i) РЦП должен обеспечить проведение оценки своей работы авторитетным органом или группой по оценке ВМО как минимум раз в четыре года для проверки его возможностей и эффективности.

Соответствующие функции:

a) РЦП должен оказывать помощь Членам Региона и, по возможности, других Регионов в проведении калибровки их национальных метеорологических эталонов и соответствующих приборов для мониторинга окружающей среды;

---

[1] Рекомендация 2 (КПМН-17).

[2] РЦП, имеющие аккредитацию по хотя бы одному параметру, называются «РЦП, аккредитованными по ИСО/МЭК 17025».

b) РЦП должен участвовать в межлабораторных сравнениях приборов и/или организовывать их, а также оказывать поддержку взаимным сравнениям приборов, следуя соответствующим рекомендациям ВМО;

c) согласно соответствующим рекомендациям относительно структуры менеджмента качества ВМО РЦП должен вносить позитивный вклад в деятельность стран-членов, связанную с качеством измерений;

d) РЦП должен консультировать Члены ВМО по запросам, касающимся эксплуатации и обслуживания приборов, а также наличия соответствующих руководящих материалов;

e) РЦП должен активно участвовать в организации семинаров по вопросам калибровки и обслуживании метеорологических и соответствующих приборов для измерения параметров окружающей среды или оказывать помощь в такой организации;

f) РЦП должен вносить вклад в стандартизацию метеорологических и соответствующих измерений параметров окружающей среды;

g) РЦП должен проводить регулярную оценку потребностей Членов в обслуживании РЦП или оказывать поддержку ее проведению;

h) РЦП должен регулярно информировать Члены ВМО и сообщать[3] на ежегодной основе Секретариату ВМО об обслуживании, предложенном Членам, и осуществленной деятельности.

---

[3] Рекомендуется использовать файл в формате Word RIC-Reporting Form (.docx), размещенный на веб-странице ВМО/ППМН.

ПРИЛОЖЕНИЕ 1.D. КЛАССИФИКАЦИИ РАЗМЕЩЕНИЯ ПЛОЩАДОК ДЛЯ СТАНЦИЙ ПРИЗЕМНЫХ НАБЛЮДЕНИЙ НА СУШЕ

(В этом приложении представлен текст общего стандарта ИСО/ВМО. Он также опубликован как ИСО 19289:2014(E) с идентичным содержанием)

Примечание: в этом приложении термин «датчик» используется не в том значении, которое указано в п. 1.6.1.2 этой главы. В соответствии с тем определением его следует заменить на термин «инструмент». Поскольку в этом приложении просто воспроизводится текст стандарта ИСО, этот термин был сохранен.

ВВЕДЕНИЕ

Условия окружающей среды на площадке[1] могут влиять на результаты измерений. Тщательный анализ этих условий должен сочетаться с оценкой характеристик самих приборов с тем, чтобы избежать искажения результатов измерений и влияния на их репрезентативность, особенно когда площадка должна быть репрезентативной для большого района (то есть, от 100 до 1 000 км^2).

1. ОБЛАСТЬ ПРИМЕНЕНИЯ

В настоящем приложении[2] излагаются правила установки для различных датчиков. Но что следует предпринять, когда эти условия не выполняются?

Существуют площадки, которые не отвечают рекомендуемым правилам установки. Поэтому была создана классификация в помощь определению репрезентативности данной площадки на небольшом масштабе (воздействие окружающей среды в непосредственной близости). Таким образом, площадка класса 1 может рассматриваться в качестве эталонной площадки. Площадка, относящаяся к классу 5, это такая площадка, где близко расположенные препятствия создают неподходящую среду для метеорологических измерений, которые должны быть репрезентативными для обширного района (по крайней мере, десятки км^2). Чем ниже класс площадки, тем выше репрезентативность измерения для обширного района. В идеале все площадки должны быть класса 1, но реальный мир не идеален, и необходимы некоторые компромиссы. Площадка неудовлетворительного класса (большой номер) может, тем не менее, представлять ценность с точки зрения конкретного применения, требующего измерения в данном конкретном месте, включая препятствия данной местности.

Процесс применения классификации помогает участникам и руководителям сети более успешно учитывать требования к установке приборов и тем самым часто обеспечивает более удачный выбор места размещения. По крайней мере, условия окружающей среды вокруг площадки становятся известны и документально фиксируются в метаданных. Разумеется, можно осуществить и рекомендовать полное описание площадки, но при этом существует опасность того, что подробно описанная площадка может привести к усложнению метаданных, что будет во многих случаях ограничивать их оперативное использование. Поэтому данная классификация выбора площадок сформулирована таким образом, чтобы представлять информацию в сжатом виде и способствовать оперативному использованию данной информации из метаданных.

Площадка в целом не имеет одного единственного классификационного номера. Каждый параметр, который измеряется на площадке, имеет свой класс и иногда отличается от других. Если требуется общая классификация площадки, то может использоваться максимальное значение из классов, характеризующих параметры.

---

[1] «Площадка» определяется как место, где установлен прибор.

[2] Если в настоящем *Руководстве* это называется приложением, то в документе ИСО на него ссылаются как на «стандарт».

Принадлежность каждой площадки к определенному классу должна периодически пересматриваться, поскольку условия окружающей среды могут меняться с течением времени. Рекомендуется систематическая ежегодная визуальная проверка: если некоторые характеристики окружающей среды изменились, то необходимо проведение нового классификационного процесса.

Полный пересмотр классов площадок следует проводить, по меньшей мере, каждые пять лет.

В нижеприведенном тексте классификация проводится (несистематическим образом) вместе с оценкой неопределенности, обусловленной выбором места, которая должна прибавляться к общей оценке неопределенности измерения. Данную оценку получают из библиографических исследований и/или некоторых сравнительных тестов.

Основная цель данной классификации — задокументировать наличие препятствий вблизи площадки измерения. По этой причине естественный рельеф местности может не учитываться, если находится на большом расстоянии (т. е. > 1 км). Метод определения того, является ли рельеф репрезентативным для окружающего района, заключается в следующем: изменит ли перемещение станции на 500 м получаемый класс? Если ответ «нет», то рельеф является природной характеристикой данного района и не принимается во внимание.

Сложный рельеф местности или городские районы обычно соответствуют высоким значениям классов. В этих случаях дополнительная отметка «S» может быть добавлена к классам 4 или 5 для обозначения специфических условий окружающей среды или применения (например, 4S).

2. ТЕМПЕРАТУРА ВОЗДУХА И ВЛАЖНОСТЬ

2.1 Общая информация

Датчики, расположенные внутри метеорологической будки, должны монтироваться на высоте, определяемой метеорологической службой (от 1,25 до 2 м, как определено в этом томе, глава 2, 2.1.4.2.1). Высота никогда не должна быть меньше 1,25 м. Удовлетворение верхнего предела не столь обязательно, поскольку температурный градиент по высоте уменьшается с высотой. Например, разница температуры для датчиков, расположенных на высоте от 1,25 до 2 м, составляет менее 0,2 °C.

Основные расхождения вызываются неестественными поверхностями и тенью:

a) препятствия вокруг метеорологической будки влияют на радиационный баланс метеорологической будки. Метеорологическая будка вблизи вертикального препятствия может быть затенена от солнечной радиации или «защищена» от ночного радиационного выхолаживания воздуха вследствие получения более теплого инфракрасного (ИК) излучения от данного препятствия, или может подвергаться воздействию отраженной радиации;

b) соседние искусственные поверхности могут нагревать воздух, и их необходимо избегать. Степень их воздействия зависит от состояния ветра, поскольку ветер влияет на степень воздушного обмена. К неестественным или искусственным поверхностям, которые принимаются во внимание, относятся источники тепла, отражающие поверхности (например, здания, бетонные поверхности, парковки машин) и водные объекты (например, пруды, озера, орошаемые территории).

Тени от близлежащих препятствий следует избегать. Тень, обусловленная естественным рельефом, не учитывается в классификации (см. выше).

Указываемой высотой растительного покрова является высота растительности, состояние которой поддерживается обычным способом. Различают структурную высоту растительности (для типа растительности, присутствующей на площадке) и высоту, обусловленную неудовлетворительным уходом за растительностью. Классификация конкретной площадки, таким образом, основывается на допущении регулярного обслуживания (за исключением случаев, когда такое обслуживание не представляется возможным).

2.2 **Класс 1**

a) Плоский горизонтальный участок на открытой местности, уклон не более ⅓ (19°);

b) поверхность земли покрыта естественной невысокой растительностью (< 10 см), репрезентативной для региона;

c) точка измерения расположена:

i) более чем в 100 м от источников тепла или отражающих поверхностей (здания, бетонные поверхности, парковки машин и тому подобное);

ii) более чем в 100 м от водного пространства (за исключением случаев, когда оно занимает значительную часть региона);

iii) вдали от всякой отбрасываемой тени, когда солнце выше 5°.

Считается, что источник тепла (или водное пространство) оказывает воздействие, если занимает более 10 % поверхности в радиусе 100 м вокруг метеорологической будки, составляет 5 % кольцевой зоны 10 м — 30 м или охватывает 1 % десятиметровой радиусной зоны.

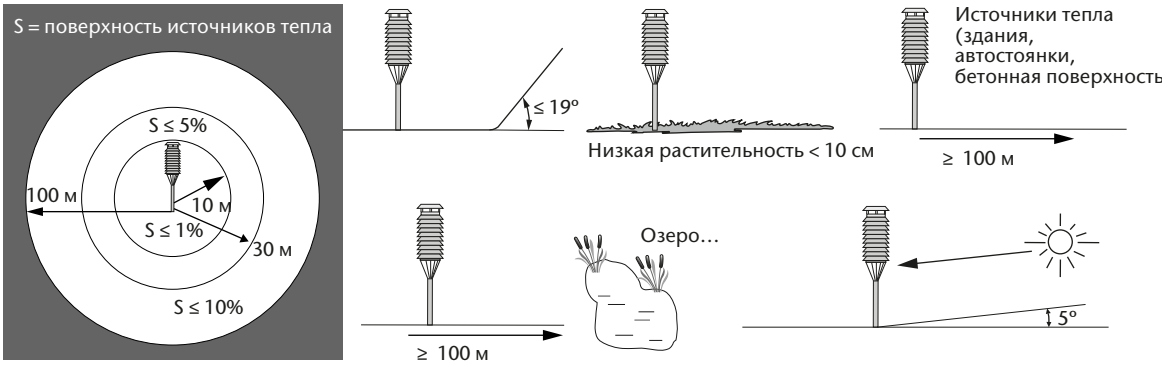


Рисунок 1.D.1. Критерии для температуры воздуха и влажности для площадок класса 1.

2.3 **Класс 2**

a) Плоский горизонтальный участок на открытой местности, уклон не более ⅓ (19°);

b) поверхность земли покрыта естественной невысокой растительностью (< 10 см), репрезентативной для региона;

c) точка измерения расположена:

i) более чем в 30 м от источников тепла или отражающих поверхностей (здания, бетонные поверхности, автостоянки машин и тому подобное);

ii) более чем в 30 м от водного пространства (за исключением случаев, когда оно занимает значительную часть региона);

iii) вдали от всякой отбрасываемой тени, когда солнце выше, чем 7°.

Считается, что источник тепла (или водное пространство) оказывает воздействие, если занимает более 10 % поверхности в радиусе 30 м вокруг метеорологической будки, составляет 5 % кольцевой зоны 5 м — 10 м или охватывает 1 % пятиметровой радиусной зоны.

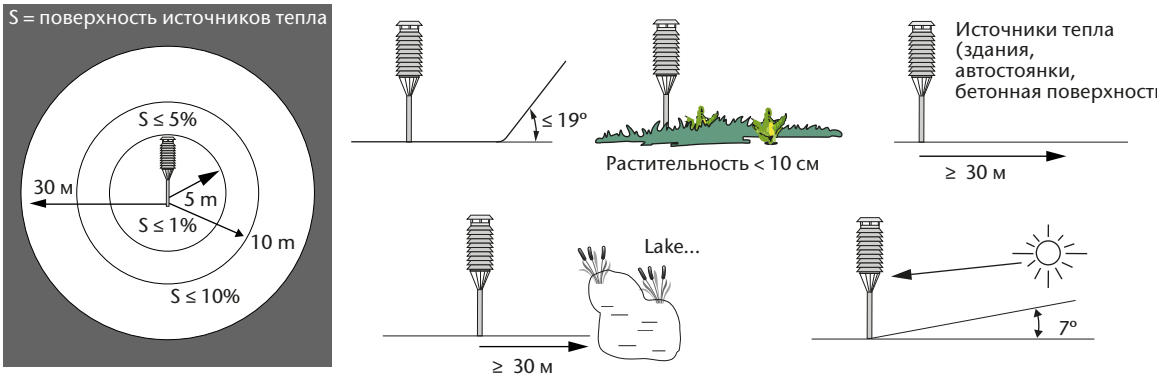


Рисунок 1.D.2. Критерии для температуры воздуха и влажности для площадок класса 2.

2.4 Класс 3 (дополнительная неопределенность, обусловленная выбором места для площадки, составляет до 1 °C)

a) Поверхность земли покрыта естественной невысокой растительностью (< 25 см), репрезентативной для региона;

b) точка измерения расположена:

i) более чем в 10 м от источников тепла или отражающих поверхностей (здания, бетонные поверхности, парковки машин и тому подобное);

ii) более чем в 10 м от водного пространства (за исключением случаев, когда оно занимает значительную часть региона);

iii) вдали от всякой отбрасываемой тени, когда солнце выше, чем 7°.

Считается, что источник тепла (или водное пространство) оказывает воздействие, если занимает более 10 % поверхности в радиусе 10 м вокруг метеорологической будки или составляет 5 % пятиметровой радиусной зоны.

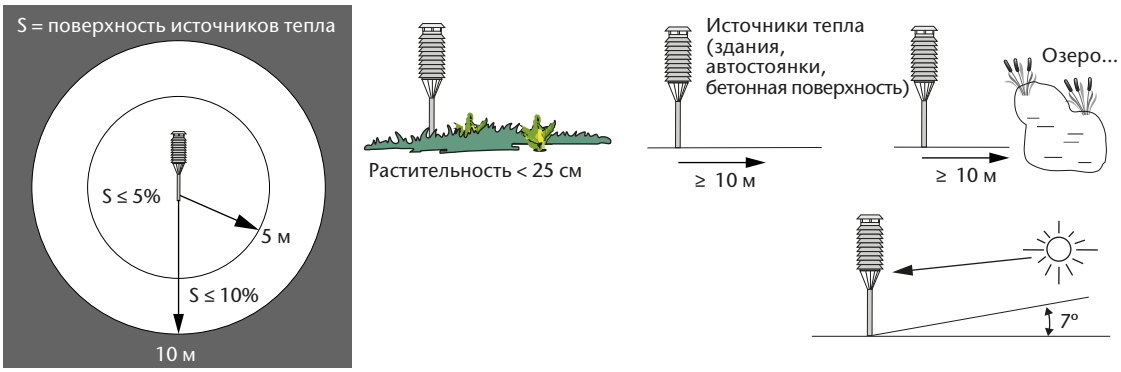


Рисунок 1.D.3. Критерии для температуры воздуха и влажности для площадок класса 3.

2.5 Класс 4 (дополнительная неопределенность, обусловленная выбором места для площадки, составляет до 2 °C)

a) Близлежащие искусственные источники тепла или отражающие поверхности (здания, бетонные поверхности, парковки машин и тому подобное) или водное пространство (за исключением случаев, когда оно занимает значительную часть региона), занимающие:

i) менее 50 % поверхности в радиусе 10 м вокруг метеорологической будки;

ii) менее 30 % поверхности в радиусе 3 м вокруг метеорологической будки;

b) вдали от всякой отбрасываемой тени, когда солнце выше, чем 20°.

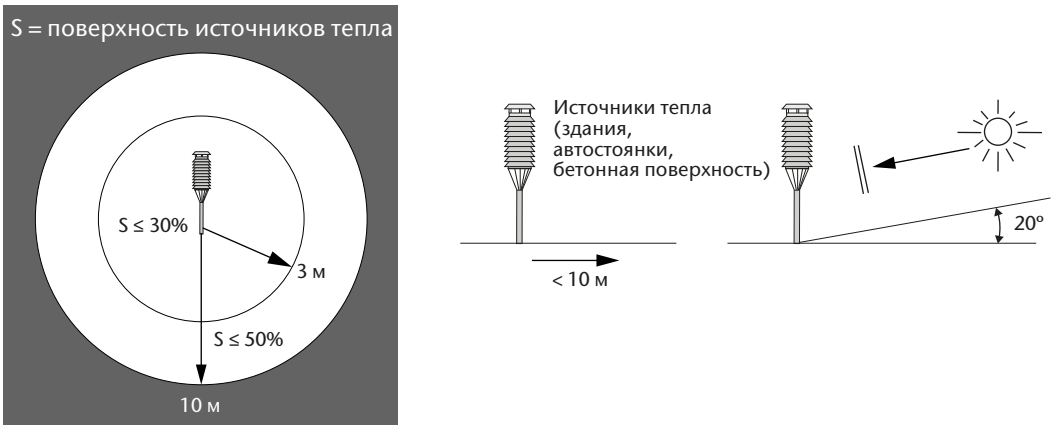


Рисунок 1.D.4. Критерии для температуры воздуха и влажности для площадок класса 4.

2.6 Класс 5 (дополнительная неопределенность, обусловленная выбором места для площадки, составляет до 5 °C)

Площадка, не удовлетворяющая требованиям класса 4.

3. ОСАДКИ

3.1 Общая информация

Ветер является наибольшим источником погрешностей в измерениях осадков вследствие влияния приборов на воздушный поток. Если не обеспечивать искусственную защиту осадкомеров от ветра, например устанавливая ветровую защиту, то наилучшие места для расположения постов часто находятся на лесных полянах или в садах, среди деревьев, в кустарниковом редколесье или там, где другие объекты представляют собой эффективную защиту от ветра всех направлений. Идеальными условиями для установки оборудования являются такие, при которых оборудование установлено в районе, окруженном равномерно препятствиями одинаковой высоты. Препятствием является объект с эффективной угловой шириной 10° и более.

Выбор данного типа площадки не согласуется с ограничениями в отношении высоты другого измерительного оборудования. Такие условия являются практически невыполнимыми. Если препятствия не одинаковы, они имеют тенденцию создавать турбулентность, что дает искажение в результатах измерения; причем данный эффект более выражен для твердых осадков. Вот почему более реально выполнимые требования по высоте предусматривают определенное расстояние от любых препятствий. Ориентация таких препятствий по отношению к преобладающему ветру сознательно не учитывается. На самом деле, сильные осадки часто связаны с конвективными факторами, в силу

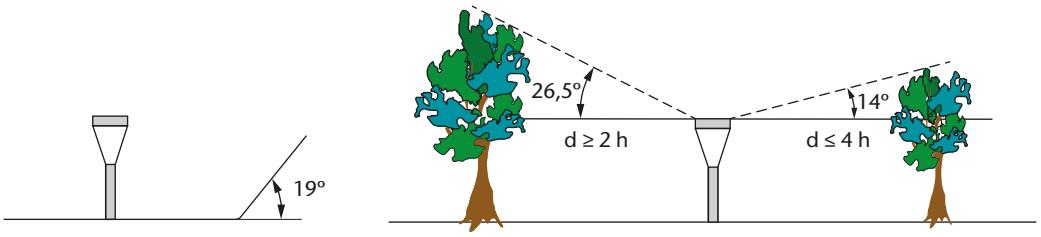
которых направление ветра не обязательно совпадает с направлением преобладающего ветра. Препятствия считаются однородными по высоте, если отношение между самой большой и самой малой высотой составляет менее 2.

Точкой отсчета для высоты препятствий является высота приемной поверхности осадкомера.

3.2 **Класс 1**

a) Плоский горизонтальный участок на открытой местности, уклон не более ⅓ (19°). Осадкомер должен быть окружен низкими препятствиями одинаковой высоты, при этом противолежащие углы возвышения составляют от 14° до 26° (препятствия на расстоянии, равном их двухкратной и четырехкратной высоте);

b) плоский горизонтальный участок на открытой местности, уклон не более ⅓ (19°). Для осадкомера, искусственно защищенного от ветра, прибор не обязательно должен быть защищен препятствиями одинаковой высоты. В данном случае любые другие препятствия должны быть расположены на расстоянии, равном, по крайней мере, их четырехкратной высоте.



или:

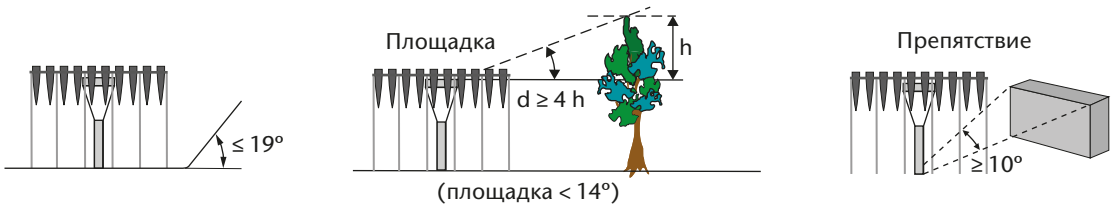


Рисунок 1.D.5. Критерии для осадков для площадок класса 1.

3.3 **Класс 2 (дополнительная неопределенность, обусловленная выбором места для площадки, составляет до 5 %)**

a) Плоский горизонтальный участок на открытой местности, уклон не более ⅓ (19°);

b) возможные препятствия должны быть расположены на расстоянии, превышающем, по крайней мере, в два раза высоту препятствия (по отношению к высоте приемной поверхности дождемера).

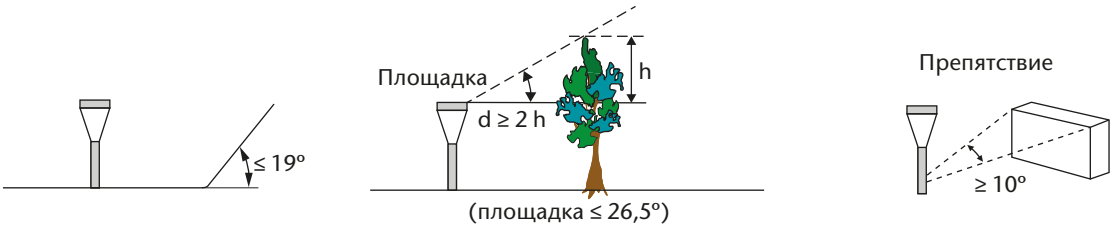


Рисунок 1.D.6. Критерии для осадков для площадок класса 2.

3.4 Класс 3 (дополнительная неопределенность, обусловленная выбором места для площадки, составляет до 15 %)

a) Участок на открытой местности, уклон не более ½ (≤ 30°);

b) возможные препятствия должны быть расположены на расстоянии, превышающем высоту препятствия.

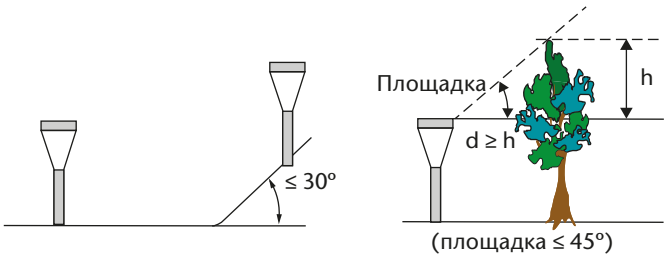


Рисунок 1.D.7. Критерии для осадков для площадок класса 3.

3.5 Класс 4 (дополнительная неопределенность, обусловленная выбором места для площадки, составляет до 25 %)

a) Участок с крутым уклоном (> 30°);

b) возможные препятствия должны быть расположены на расстоянии, превышающем половину (½) высоты препятствия.

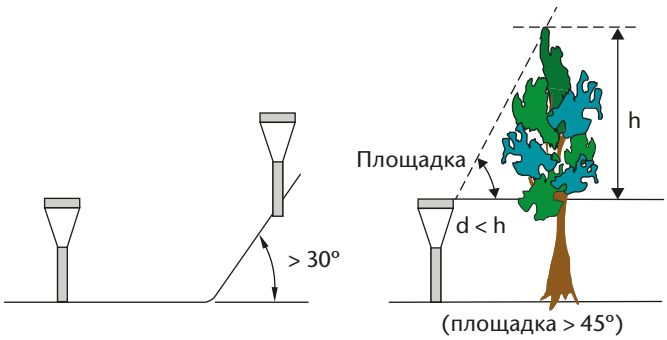


Рисунок 1.D.8. Критерии для осадков для площадок класса 4.

3.6 Класс 5 (дополнительная неопределенность, обусловленная выбором места для площадки, составляет до 100 %)

Препятствия расположены ближе, чем половина (½) их высоты (дерево, крыша, стена и тому подобное).

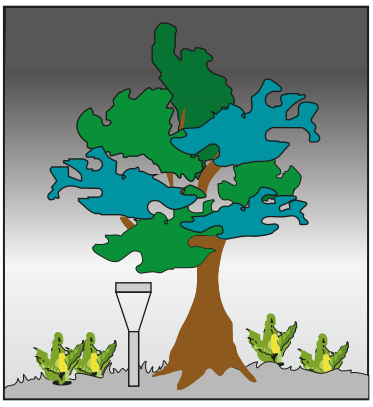


Рисунок 1.D.9. Критерии для осадков для площадок класса 5.

4. ПРИЗЕМНЫЙ ВЕТЕР

4.1 Общая информация

Обычные требования по высоте предусматривают, что датчики должны размещаться на высоте 10 м над уровнем поверхности земли и на открытой местности. Открытая местность в данном случае представляет собой поверхность, на которой препятствия расположены как минимум на расстоянии, равном, по крайней мере, их десятикратной высоте.

4.2 Шероховатость

Измерениям ветра мешают не только окружающие препятствия, шероховатость поверхности также играет свою роль. По определению ВМО, ветер, дующий на геометрической высоте 10 м и с коэффициентом шероховатости 0,03 м, является приземным ветром для наземных станций.

Такой ветер считается эталонным ветром, для которого точно известны условия (высота 10 м и коэффициент шероховатости 0,03 м).

Следовательно, шероховатость вокруг площадки измерения должна быть зафиксирована документально. Шероховатость необходимо использовать для перевода измеренного ветра в эталонный ветер, но эта процедура может применяться только в том случае, если препятствия не находятся слишком близко. Вопросы, связанные с шероховатостью, и процедуры корректировки описываются в настоящем томе, глава 5. Классификация шероховатости из приложения к главе 5 воспроизводится ниже.

Классификация местности по Дейвенпорту (Davenport, 1960), адаптированная Виерингом (Wieringa, 1980*b*) применительно к аэродинамическому коэффициенту шероховатости z_0

Класс	*Краткое описание местности*	z_0 *(м)*
1	Открытое море, протяженность не менее 5 км	0,0002
2	Плоская грязная поверхность, снег; отсутствие растительности, препятствий	0,005
3	Открытая плоская поверхность; трава, редкие отдельно стоящие препятствия	0,03
4	Невысокие сельскохозяйственные культуры; редкие большие препятствия: $x/H > 20$	0,10
5	Высокие сельскохозяйственные культуры; разбросанные препятствия: $15 < x/H < 20$	0,25
6	Парковые насаждения, кусты; многочисленные препятствия: $x/H \approx 10$	0,5
7	Зона обычных больших препятствий (окраина, лес)	1,0
8	Городской центр с высокими и низкими зданиями	≥ 2

Примечание: Здесь x — типичное расстояние до предмета, препятствующего потоку воздуха, а H — высота соответствующих крупных препятствий. Более подробное и доработанное описание классов см. в работе Davenport et al. (2000).

4.3 Классификация условий окружающей среды

Присутствие препятствий, включая растительность, (почти всегда) означает снижение средних показаний ветра, однако значительно в меньшей степени сказывается на определении порывов ветра.

Приведенная ниже классификация предусматривает измерение на высоте 10 м, которая является стандартной высотой для метеорологических измерений.

Когда измерения проводятся на более низкой высоте (например, измерения на высоте 2 м, что иногда необходимо для агроклиматологических целей), следует применять класс 4 или 5 (см. ниже) с пометкой S (специфическая ситуация).

Там, где присутствуют многочисленные препятствия выше 2 м, рекомендуется, чтобы датчики устанавливались на 10 м выше средней высоты препятствий. Данный метод позволяет свести к минимуму влияние близлежащих препятствий. Данный метод является неизменным решением для того, чтобы исключить в какой-то степени влияние некоторых препятствий. Для этого, к сожалению, требуются более высокие мачты, которые не являются стандартными и, следовательно, будут более дорогостоящими. Необходимо учитывать для определенных площадок при их использовании, что препятствия, которые должны учитываться, должны быть выше уровня, расположенного на 10 м ниже датчиков (например, для анемометра, установленного на высоте 13 м, исходным уровнем отсчета для препятствий является высота 3 м; а препятствие высотой 7 м будет иметь эффективную высоту 4 м).

Далее, объект считается препятствием, если его эффективная угловая ширина превышает 10°. Случаи высоких тонких препятствий, т. е. когда их эффективная угловая ширина менее 10°, а высота более 8 м, необходимо также учитывать при рассмотрении классов от 1 до 3, как указывается ниже. В некоторых обстоятельствах скопление высоких узких препятствий будет иметь такой же эффект, как и одно широкое препятствие, и его следует учитывать таким же образом.

Изменения высоты (положительные или отрицательные) ландшафта, которые не являются репрезентативными для данной местности, считаются препятствиями.

4.4 Класс 1

a) Мачта должна быть расположена на расстоянии, равном по крайней мере 30-кратной высоте окружающих препятствий;

b) датчики должны быть расположены как минимум на расстоянии 15-кратной ширины узких препятствий (мачта, тонкие деревья) выше, чем 8 м.

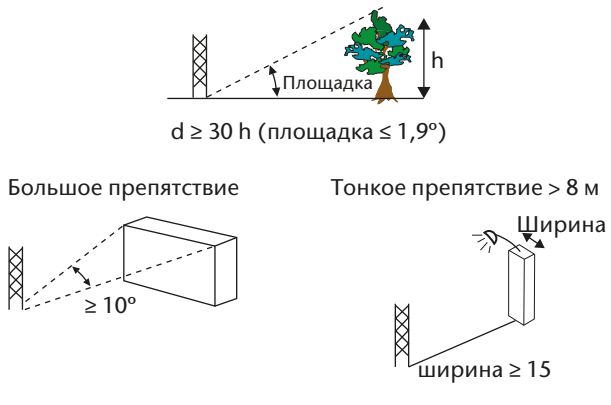


Рисунок 1.D.10. Критерии для приземного ветра для площадок класса 1.

Единичные препятствия ниже 4 м могут не учитываться.

Показатель класса шероховатости равен или меньше 4 (коэффициент шероховатости ≤ 0,1 м).

Единичные препятствия ниже 4 м могут не учитываться.

Показатель класса шероховатости равен или меньше 5 (коэффициент шероховатости ≤ 0,25 м).

4.5 Класс 2 (дополнительная погрешность, обусловленная выбором места для площадки, составляет до 30 %, возможно применение корректировки)

a) Мачта должна быть расположена на расстоянии, равном по крайней мере 10-кратной высоте окружающих препятствий;

b) датчики должны быть расположены как минимум на расстоянии 15-кратной ширины узких препятствий (мачта, тонкие деревья) выше, чем высота 8 м.

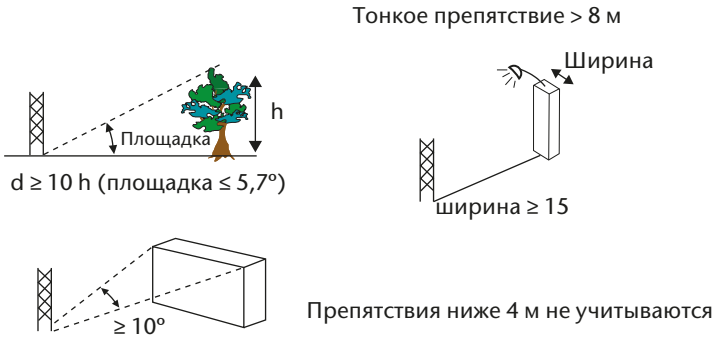


Рисунок 1.D.11. Критерии для приземного ветра для площадок класса 2.

Примечание: когда мачта расположена на расстоянии, равном по крайней мере 20-кратной высоте близлежащих преград, могут быть применены поправки (см. настоящий том, глава 5). Для более близких препятствий поправки могут применяться в некоторых ситуациях.

4.6 Класс 3 (дополнительная погрешность, обусловленная выбором места для площадки, составляет до 50 %, корректировка применяться не может)

a) Мачта должна быть расположена на расстоянии, равном по крайней мере 5-кратной высоте близлежащих препятствий;

b) датчики должны быть расположены как минимум на расстоянии 10-кратной ширины узких препятствий (мачта, тонкие деревья) выше, чем 8 м.

Единичные препятствия ниже 5 м могут не учитываться.

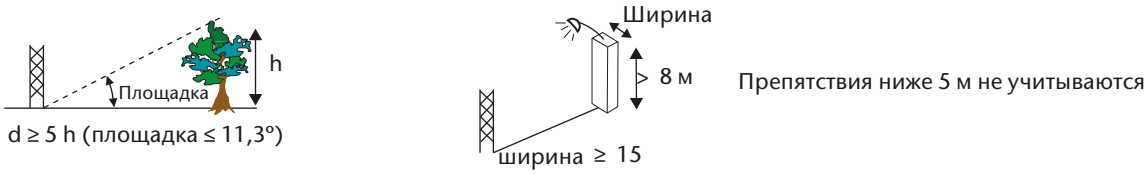


Рисунок 1.D.12. Критерии для приземного ветра для площадок класса 3.

4.7 Класс 4 (дополнительная погрешность, обусловленная выбором места для площадки, составляет до 50 %)

a) Мачта должна быть расположена на расстоянии, равном по крайней мере 2,5-кратной высоте окружающих препятствий;

b) отсутствие препятствий с угловой шириной более 60° и высотой более 10 м на расстоянии до 40 м.

Единичные препятствия ниже 6 м могут не учитываться, только для измерений на высоте 10 м или более.

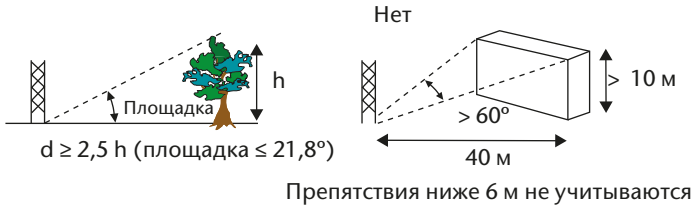


Рисунок 1.D.13. Критерии для приземного ветра для площадок класса 4.

4.8 Класс 5 (дополнительную погрешность оценить невозможно)

Площадка, не отвечающая требованиям класса 4.

5. СУММАРНАЯ И РАССЕЯННАЯ РАДИАЦИЯ

5.1 Общая информация

Необходимо избегать близлежащих препятствий. Тень, обусловленная естественным рельефом, не учитывается в классификации. Неотражающие препятствия ниже видимого горизонта могут не учитываться.

Препятствие считается отражающим, если его альбедо выше 0,5.

Положением отсчета для углов возвышения является чувствительный элемент прибора.

5.2 Класс 1

a) Отсутствие тени, отбрасываемой на датчик, когда солнце находится на угловой высоте выше 5°. Для регионов на широте ≥ 60° этот предел снижается до 3°;

b) отсутствие не имеющих тени отражающих препятствий с угловой высотой выше 5° и общей угловой шириной выше 10°.

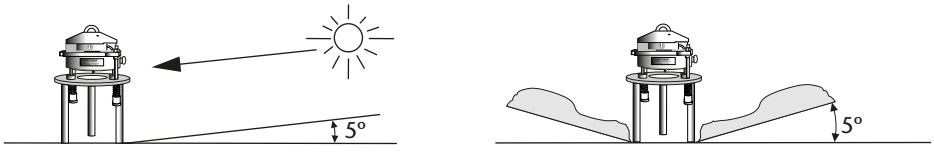


Рисунок 1.D.14. Критерии для глобальной и рассеянной радиации для площадок класса 1.

5.3 **Класс 2**

a) Отсутствие тени, отбрасываемой на датчик, когда солнце находится на угловой высоте выше 7°. Для регионов на широте ≥ 60° этот предел снижается до 5°;

b) отсутствие не имеющих тени отражающих препятствий с угловой высотой выше 7° и общей угловой шириной выше 20°.

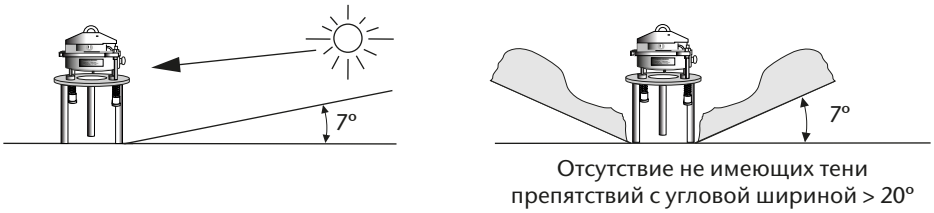


Рисунок 1.D.15. Критерии для глобальной и рассеянной радиации для площадок класса 2.

5.4 **Класс 3**

a) Отсутствие тени, отбрасываемой на датчик, когда солнце находится на угловой высоте выше 10°. Для регионов на широте ≥ 60° этот предел снижается до 7°;

b) отсутствие не дающих тени отражающих препятствий с угловой высотой выше 15° и общей угловой шириной выше 45°.

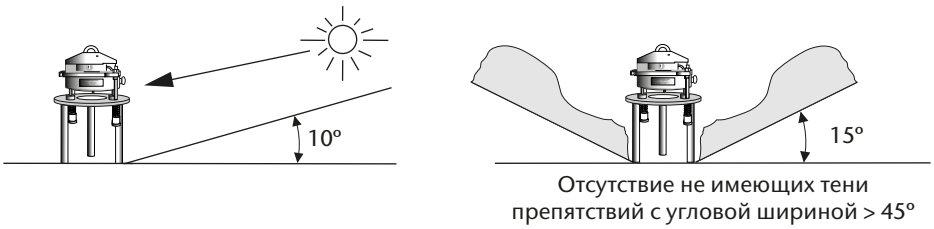


Рисунок 1.D.16. Критерии для глобальной и рассеянной радиации для площадок класса 3.

5.5 **Класс 4**

Отсутствие отбрасываемой тени в течение более чем 30 % дневного времени в любой день года.

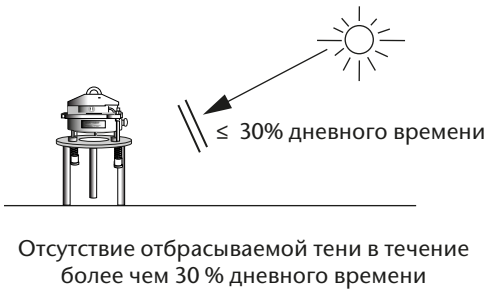


Рисунок 1.D.17. Критерии для глобальной и рассеянной радиации для площадок класса 4.

5.6 **Класс *5***

Отсутствие отбрасываемой тени в течение более чем 30 % дневного времени, по крайней мере, один день в году.

6. ПРЯМАЯ РАДИАЦИЯ И ПРОДОЛЖИТЕЛЬНОСТЬ СОЛНЕЧНОГО СИЯНИЯ

6.1 Общая информация

Необходимо избегать близлежащих препятствий. Тень, обусловленная естественным рельефом, не учитывается в классификации. Препятствия ниже видимого горизонта могут не учитываться.

Положением отсчета для углов возвышения является чувствительный элемент прибора.

6.2 Класс 1

Отсутствие тени, отбрасываемой на датчик, когда солнце находится на угловой высоте выше 3°.

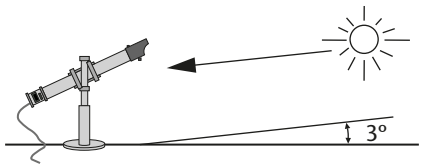


Рисунок 1.D.18. Критерии для прямой радиации и продолжительности солнечного сияния для площадок класса 1.

6.3 Класс 2

Отсутствие тени, отбрасываемой на датчик, когда солнце находится на угловой высоте выше 5°.

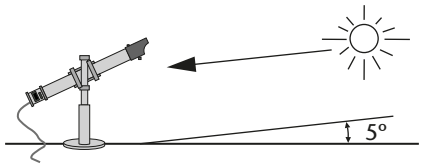


Рисунок 1.D.19. Критерии для прямой радиации и продолжительности солнечного сияния для площадок класса 2.

6.4 Класс 3

Отсутствие тени, отбрасываемой на датчик, когда солнце находится на угловой высоте выше 7°.

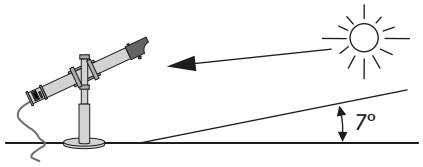
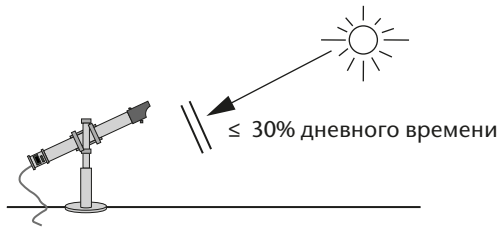


Рисунок 1.D.20. Критерии для прямой радиации и продолжительности солнечного сияния для площадок класса 3.

6.5 **Класс 4**

Отсутствие отбрасываемой тени в течение более чем в 30 % дневного времени в любой день года.



Отсутствие тени в течение
более чем 30 % дневного времени

Рисунок 1.D.21. Критерии для прямой радиации и продолжительности солнечного сияния для площадок класса 4.

6.6 **Класс *5***

Отсутствие отбрасываемой тени в течение более чем в 30 % дневного времени, по крайней мере, один день в году.

ПРИЛОЖЕНИЕ 1.E. ЭКСПЛУАТАЦИЯ ОБОРУДОВАНИЯ В ЭКСТРЕМАЛЬНЫХ УСЛОВИЯХ

Экстремальные погодные явления и суровые климатические условия оказывают прямое воздействие на сети наблюдений и могут привести к прерыванию основных функций НМГС. Повреждение систем наблюдения и мониторинга, действующих в режиме реального времени, во время погодного явления может серьезно ограничить эффективность обслуживания в области прогнозирования и предупреждения. Утрата данных наблюдений, передаваемых с задержкой, влияет на способность планировать экстремальные явления и понимать их климатологию.

Опрос на страновом уровне по СРБ ВМО (2006 г.)[1] показал, что засухи, быстроразвивающиеся паводки и наводнения на реках, экстремальные ветры, сильные штормы, тропические циклоны, штормовые нагоны, лесные и стихийные пожары, волны тепла, оползни и опасные для авиации явления относятся к десяти наиболее опасным явлениям, вызывающим обеспокоенность у всех Членов. Важнейшее значение для применения в области СРБ имеет поддержание высокого качества данных наблюдений (исторических и в реальном времени). Эти наблюдения имеют крайне важное значение с точки зрения:

a) выявления рисков;

b) уменьшения рисков посредством предоставления заблаговременных предупреждений для поддержки готовности к бедствиям и реагирования на них, а также климатического обслуживания для средне- и долгосрочного планирования по секторам;

c) передачи риска с помощью страхования и других финансовых инструментов.

Таким образом, сбои в осуществлении мониторинга по причине ущерба, нанесенного приборам и сетям наблюдений в результате природных опасных явлений, препятствуют возможности НМГС предоставлять эффективное обслуживание не только во время и после бедствий, но и в долгосрочной перспективе, если эти системы не будут восстановлены.

В этой связи на своей шестнадцатой сессии КПМН подчеркнула, что крайне важно обеспечить, чтобы приборное оснащение и сети наблюдений разрабатывались в соответствии со стандартами, которые позволят им противостоять воздействию экстремальных погодных явлений.

Ряд факторов влияют на надежность оборудования, как с точки зрения инфраструктуры, так и датчиков, эксплуатируемых в полевых условиях. Наиболее простой и эффективный способ обеспечить доступность системы заключается в том, чтобы заложить в систему надежность с самого начала ее проектирования. Необходимо учесть следующие факторы:

– Доступность данных — один из первых факторов, который необходимо принять во внимание. Есть ли поблизости другие подобные источники информации? Является ли эта информация единственной доступной прогнозистам и, следовательно, критически важной при экстремальных событиях? Если это так, то потребуется приложить больше усилий при проектировании и планировании станции для обеспечения доступности данных. Какие перебои в работе вы можете выдержать? Имеет ли значение, если данные будут регулярно не доступны в течение пяти минут? Имеет ли значение, если они будут недоступны в течение дня? Все эти вопросы определяют способ проектирования системы для обеспечения ее надежности и методы ее эксплуатации.

[1] https://library.wmo.int/doc_num.php?explnum_id=7049.

– Угрозы — какие экстремальные погодные явления могут оказать воздействие на метеостанцию в конкретном месте? В идеальном мире все параметры контролировались бы на самом высоком уровне. Однако реалии, связанные с финансированием, обычно означают, что это невозможно. Определите критически важные параметры и сосредоточьтесь на обеспечении их доступности.

– Воздействие окружающей среды — каждому месту присущи свои трудности. Изучите топографию, чтобы убедиться, что любые сооружения на земле не будут подвержены водной эрозии. Учтите тип почвы, местные источники загрязнения, близость к морю и солевую коррозию, риск вандализма и тому подобное. Эти угрозы оказывают воздействие как на конструкцию, так и на требования к техническому обслуживанию.

После полного понимания необходимости в наблюдениях и оценки сильных и слабых сторон местоположения можно рассмотреть ряд стратегий по смягчению воздействия для максимизации доступности данных наблюдений и минимизации эксплуатационных затрат. Эти подходы можно разделить на несколько категорий, перечисленных в таблице 1.E.1.

Таблица 1.E.1. Общие подходы к смягчению воздействия экстремальных условий окружающей среды на приборы и инфраструктуру для наблюдения

Подход	*Метод*	*Преимущество*	*Недостаток*
Дублирование участков	Повышение плотности расположения мест проведения измерений и оборудования в критических районах	Повышенная плотность измерений снижает влияние потери информации с одного участка	Увеличение капитальных затрат и усилий по техническому обслуживанию
		Потенциал для применения более дешевых решений	Риск общего снижения качества и надежности данных
		Возможность контролировать качество сети, потенциально снижая затраты на эксплуатацию и прогнозируя отказы системы	
Дублирование приборов	Дублирование чувствительных или уязвимых приборов на определенном участке	Повышенная доступность данных	Увеличение капитальных затрат
		Большая гибкость при управлении ситуацией в случае перебоя и при эксплуатации	
Использование материалов для инфраструктуры, подходящих для условий окружающей среды	Выбор материалов, предназначенных для эксплуатации в экстремальных условиях (например, морская и высококачественная сталь, пластик, устойчивый к ультрафиолетовому излучению, древесина с высоким содержанием масла)	В зависимости от условий эксплуатации такие материалы прослужат дольше и будут более прочными	Как правило, они более дорогие как в виде сырья, так и в строительстве
		Снижение нагрузки при эксплуатации	
	Используйте защитные корпуса и уплотнения с необходимой маркировкой	Снижение риска повреждения оборудования в результате попадания воды или пыли	Краткосрочные затраты могут быть несколько выше

Подход	*Метод*	*Преимущество*	*Недостаток*
Проектирование	Привлечение инженеров-проектировщиков к проектированию объектов инфраструктуры, такой как мачты	Обеспечивает способность объектов инфраструктуры противостоять воздействию экстремальных погодных явлений	Краткосрочные затраты могут быть несколько выше
		Продление срока службы объектов инфраструктуры за счет минимизации нагрузки, вызванной воздействием окружающей среды	
		Сокращение нерациональных проектных решений и сопутствующих расходов	

Конкретные примеры типов событий и угроз, которые они представляют для объектов инфраструктуры и приборов в ближайшей и долгосрочной перспективе, приводятся в таблице 1.E.2. Также представлены методы смягчения этих угроз. Эти меры по смягчению последствий соответствуют четырем подходам, представленным в таблице 1.E.1. Несмотря на их обширность, меры по смягчению последствий не являются исчерпывающими; они представляют собой компиляцию общих знаний и опыта различных НМГС. Применяя любой из этих методов, пользователь должен учитывать влияние на измерения в конкретной ситуации. Хотя меры по смягчению последствий могут сработать для решения конкретной проблемы, они также могут вызвать трудности с точки зрения других параметров. Перед применением любого из этих решений пользователю необходимо принять во внимание особенности конкретной среды.

Таблица 1.E.2. Экстремальные метеорологические явления, примеры связанных с ними уязвимостей объектов инфраструктуры и датчиков, а также меры по смягчению их последствий

Тип явления	**Град**	
Причина	Характеристика погодных систем, таких как грозы	
Соображения	* Как правило, град диаметром менее 2,5 см не считается существенным, в то время как град > 4,5 см образует значительную вмятину на автомобиле, а > 7 см разобьет ветровое стекло * Град имеет диаметр более 2,5 см в менее чем 5 % случаев	
Основная опасность	*Уязвимость или воздействие на инфраструктуру*	*Меры по смягчению последствий*
Воздействие	* Повреждения: обтекатели антенны радиолокатора — вмятины и пробоины; укрытия для наблюдателей — поломка жалюзи; корпуса электроники — вмятины и пробоины; мачты — вмятины, трещины или поломки	* Использование высокопрочных материалов (включая сталь, углеродное волокно) для наружной обшивки защитных корпусов и тому подобного и прочных и хорошо закрепленных конструкций * Использование секционных обтекателей антенны радиолокатора, укрытий, защитных кожухов и тому подобного, чтобы их можно было заменять частями
	* Износ поверхностей с покрытием	* Использование высокопрочных материалов, не требующих окрашивания или нанесения покрытия другими методами
	* Повреждение солнечных панелей	* Использование съемных высокопрочных, жестких защитных перекрытий с опорой на конструкцию
	* Износ окрашенных поверхностей	* Использование высокопрочных и устойчивых к коррозии материалов, не требующих окрашивания или нанесения покрытия другими методами
Основная опасность	*Уязвимость или воздействие на датчики*	*Меры по смягчению последствий*
Воздействие	* Механические анемометры, в частности, повреждение чашек. Маленькие и легкие пластиковые чашки особенно легко повредить	* Использование приборов, изготовленных из прочных материалов и предназначенных для работы в суровых условиях. В зависимости от вида применения можно рассмотреть специализированные материалы, такие как углеродное волокно
	* Ультразвуковые анемометры, повреждение кронштейнов и датчиков, что приводит к нарушению центровки	* Использование приборов, креплений и кронштейнов, изготовленных из прочных материалов и предназначенных для работы в суровых условиях. В зависимости от вида применения можно рассмотреть специализированные материалы, такие как углеродное волокно
	* Приборы для измерения радиации, повреждение их обтекателей	* Применение альтернативных технологий, таких как анемометры на основе трубки Пито, которые имеют аэродинамическую конструкцию и минимально открытые компоненты

Тип явления	**Паводок**	
Причина	Результат значительных погодных систем, включая грозы, циклоны и тому подобное. Паводок может произойти значительно ниже по течению от погодного явления	
Соображения	* Предполагается ли, что система возобновит работу после погружения в воду? * Какое максимальное количество и скорость выпадения осадков можно ожидать? * Подвержен ли участок риску в случае паводка выше по течению?	
Основная опасность	*Уязвимость или воздействие на инфраструктуру*	*Меры по смягчению последствий*
Попадание воды	* Подмывание или смыв установленного на земле оборудования	* Использование систем крепления, которые стабилизируют окружающую почву, распределяя нагрузку. Имеются коммерческие решения, в которых используется погружаемая «тренога» для минимизации возмущения почвы и распределения нагрузки. * Проектирование и выравнивание фундаментов параллельно ожидаемому поверхностному потоку для минимизации гидростатического давления
Коррозия	* Повреждение оборудования в результате воздействия воды или погружения в воду	* Использование таких материалов, как судовая нержавеющая сталь, оцинкованное железо или сталь, подходящие пластмассы; избегайте использования алюминия * Обеспечение, чтобы все разъемы были обернуты гидроизолирующей лентой для предотвращения коррозии * Использование профилактический покрытий и пропитывающих материалов, например, рыбий жир, краска * Использование расходуемых анодов в морской среде
Загрязнение	* Коррозия металлических деталей, особенно соединительных элементов, сварных швов, соединений	* Регулярный мониторинг данных и регулярные инспекции и техническое обслуживание инфраструктуры и оборудования в уязвимых средах для регулирования режима технического обслуживания * Покрытие сварных швов, соединений и гаек смазкой, например силиконовой, и даже маслом
Скачок напряжения	* Потеря данных из-за сбоя электропитания или связи	* Подключение резервной связи через альтернативного поставщика
Обломки	* Повреждения из-за крупных обломков в водотоке, воздействующих на башни и метеорологические будки * Повреждение защитных покрытий	* Укрепление нижних секций башен до ожидаемой высоты паводка * Проверка того, что все порошковое или другое покрытие не имеет язвин и сколов

Тип явления	**Паводок**	
Основная опасность	*Уязвимость или воздействие на приборы*	*Меры по смягчению последствий*
Попадание воды	* Любой датчик, не рассчитанный на работу под водой	* Установка корпуса системы сбора данных как можно выше, чтобы не допускать его погружения в воду (например, гидрологическая станция с уровнемерами) * Проектирование и выравнивание фундаментов параллельно ожидаемому поверхностному потоку для минимизации гидростатического давления * Использование уплотнений и корпусов для оборудования с соответствующим рейтингом IP (защита от внешнего воздействия или международная защита), обычно IP67 и выше для волн и брызг
	* Оборудование, находящееся в непосредственной близости от сильного потока воды (прямой контакт или эрозия), оказывается под водой	* Использование уплотнений и корпусов для оборудования с соответствующим рейтингом IP, обычно IP67 и выше для волн и брызг
Коррозия	* Оборудование, повреждаемое в результате воздействия воды или погружения в воду, особенно соединительные элементы, сварные швы, соединения	* Использование уплотнений и корпусов для оборудования с соответствующим рейтингом IP, обычно IP67 и выше для волн и брызг * Отказ от металлов, которые не поддаются пассивации или подвержены коррозии, например низкокачественная сталь * Регулярный осмотр оборудования, чтобы убедиться, что на всех окрашенных поверхностях и других покрытиях нет язвин и сколов * Защита соединений и клемм с помощью лент, пропитанных смазкой/маслом или аналогичных мер * Тщательный подбор типов металла для стыков или использование изоляторов и смазочных материалов (смазки высокой вязкости) для минимизации электролиза
Загрязнение	* Накопление посторонних химических веществ или загрязнений на чувствительных элементах, таких как датчики относительной влажности	* Регулярные проверки и мониторинг данных для регулирования режима технического обслуживания
Обломки	* Повреждения от крупных обломков в водотоке, воздействующих на башни и метеорологические будки	* Подъем приборов и корпусов выше уровня паводка в районах, подверженных паводкам

Тип явления	**Оползень/грязевой оползень**	
Причина	Результат выпадения осадков в сочетании с нестабильной почвой	
Соображения	* Каков уклон поверхности? * Характерен ли для этого района длительный период умеренных осадков?	
Основная опасность	*Уязвимость или воздействие на инфраструктуру*	*Меры по смягчению последствий*
Попадание воды	* Подмывание или смыв установленного на земле оборудования	* Использование систем крепления, которые стабилизируют окружающую почву, распределяя нагрузку. Имеются коммерческие решения, в которых используется погружаемая «тренога» для минимизации возмущения почвы и распределения нагрузки * Использование уплотнений и корпусов для оборудования с соответствующим рейтингом IP, обычно IP67 и выше для волн и брызг * Установка корпуса системы сбора данных как можно выше, если датчик может оказаться под водой (например, гидрологическая станция с уровнемерами)
Водное течение	* Подмывание или смыв установленного на земле оборудования	* Использование систем крепления, которые стабилизируют окружающую почву, распределяя нагрузку. Имеются коммерческие решения, в которых используется погружаемая «тренога» для минимизации возмущения почвы и распределения нагрузки. * Проектирование и выравнивание фундаментов параллельно ожидаемому поверхностному потоку для минимизации гидростатического давления
Грязь	* Почти все, полное уничтожение	* Установка оборудования на локализованных насыпях или обработка почвы для перенаправления грязи и воды вокруг оборудования
Обломки	* Почти все, полное уничтожение См. также «Паводок»	* Укрепление нижних секций башен до ожидаемой высоты оползня/грязевого оползня
Основная опасность	*Уязвимость или воздействие на приборы*	*Меры по смягчению последствий*
Попадание воды	* Отказ любого датчика, не рассчитанного на работу под водой	* Установка корпуса системы сбора данных как можно выше, если датчик может оказаться под водой (например, гидрологическая станция с уровнемерами) * Использование корпусов датчиков и уплотнений с соответствующим рейтингом IP, обычно IP67 и выше для волн и брызг
Водное течение	* Приборы ломаются или погружаются в грязь	* Установка приборов на высоте, превышающей ожидаемую высоту явления за 20-50 лет
Грязь	* Почти все, полное уничтожение	* Проведение регулярных проверок и мониторинг данных для регулирования режима технического обслуживания

Тип явления	**Сильные ветры**	
Причина	Экстремальные погодные системы, такие как циклон, гроза и тому подобное, со скоростью ветра более 100 км·ч$^{-1}$ (около 27,8 м·с$^{-1}$)	
Соображения	* Какую максимальную среднюю и максимальную мгновенную скорость ветра должна выдерживать система? * Много ли деталей, которые могут стать летающими обломками во время явления?	
Основная опасность	*Уязвимость или воздействие на инфраструктуру*	*Меры по смягчению последствий*
Ветер	* Повреждения: обтекатели антенны радиолокатора — вмятины и пробоины; укрытия для наблюдателей — поломка жалюзи; корпуса электроники — вмятины и пробоины; мачты — вмятины, трещины или поломки	* Использование высокопрочных материалов (включая сталь, углеродное волокно) для наружной обшивки защитных корпусов и тому подобного, а также прочных и надежно закрепленных конструкций * Использование секционных обтекателей антенн радиолокатора, укрытий, защитных кожухов и тому подобного, чтобы их можно было заменять частями
	* Серьезные повреждения конструкций из-за обломков	* Для минимизации повреждений от вибрации использование на мачте башни/треноги оттяжек, закрепленных на подходящих анкерных креплениях, например в бетонном основании или обычном якоре
	* Повреждения конструкций из-за сопротивления и ветровой нагрузки	* Проверка того, что все отсеки/двери надежно закрываются; рассмотрение возможности подключения предупредительной сигнализации об открытии двери * Где это практически возможно, проектировка инфраструктуры с целью снижения ветровой нагрузки с помощью изогнутых и низкопрофильных поверхностей * Изучение аэродинамики конструкции для минимизации сопротивления и стабилизации сооружения
	* Разрушение опор объектов инфраструктуры в результате эрозии и ветровой нагрузки	* Регулярные инспекции, особенно после серьезных явлений, для обеспечения структурной целостности фундаментов и креплений
	* Образование микротрещин, разрушение сварных соединений, ослабление зажимов и тому подобное из-за ветровой вибрации	* Регулярные инспекции, особенно после серьезных явлений, для обеспечения структурной целостности фундаментов и креплений * Обеспечение дополнительных креплений для основных объектов инфраструктуры, таких как оттяжки для мачт, чтобы ограничить изгиб во время сильного ветра.
Обломки	* Серьезное повреждение башен	* Использование башен/штативов с соответствующей максимально допустимой ветровой нагрузкой * Крепление мачт к подходящим анкерным креплениям, например в бетонном основании или обычном якоре

Тип явления	**Сильные ветры**	
Основная опасность	*Уязвимость или воздействие на приборы*	*Меры по смягчению последствий*
Ветер	* Повреждение приборов из-за силы ветра и мелкого мусора	* Использование приборов, предназначенных для работы в суровых условиях * Использование ветровых приборов с небольшим количеством движущихся частей, например приборов на основе трубки Пито, использующих разность давлений, и ультразвуковых ветровых приборов, чтобы устранить уязвимости, связанные с подвижными частями; однако такие приборы также могут быть повреждены из-за летящего мусора * Осмотр приборов до начала явления и проверка того, что они надлежащим образом и надежно закреплены, а дождемеры и метеорологические будки как следует зафиксированы болтами * Закрепление веревками или уборка всех незакрепленных предметов или материалов, которые могут стать летающим мусором во время грозы. Осмотр окружающей местности на предмет деревьев или кустарников с ветвями, которые могут обломиться или упасть во время сильного ветра; принятие мер по их удалению * Использование высокопрочного троса или проволоки для укрепления кронштейна анемометра * Проверка того, что кабельная проводка хорошо закреплена на надежной опоре * Изучение аэродинамики конструкции для минимизации сопротивления и стабилизации конструкции
Обломки	* Повреждение приборов из-за летящих обломков	* Очистка территории вокруг оборудования и уборка всех материалов, которые могут нанести повреждения

Тип явления	**Грозы**	
Причина	Сильные ветры, молнии и ливневые дожди в результате крупных штормов	
Соображения	* Ожидается ли, что системы будут работать после удара молнии?	
Основная опасность	*Уязвимость или воздействие на инфраструктуру*	*Меры по смягчению последствий*
Молния	* Электрические перенапряжения	* Использование защиты от электрических перенапряжений в цепи питания и индивидуальной защиты от перенапряжений на каждом контролируемом канале (например, температура, ветер) * Использование подходящего заземления объектов инфраструктуры через токоприемник (например, громоотвод Франклина или сплайновый сферический громоотвод), идущий к проводнику для отвода на землю Примечание: все соединения должны сохранять высокую проводимость, а изгибы должны составлять не более 45 градусов
Вода	* Коррозия	* Использование соответствующих материалов, таких как нержавеющая или оцинкованная сталь и подходящий пластик * Использование профилактических покрытий и пропитывающих материалов, например рыбьего жира, краски * Использование расходуемых анодов в морской среде * Регулярный осмотр и техническое обслуживание объектов инфраструктуры и оборудования в уязвимых средах
	См. также «Паводок»	
	См. также «Сильный ветер»	

Тип явления	**Грозы**	
Основная опасность	*Уязвимость или воздействие на приборы*	*Меры по смягчению последствий*
Молния	* Приборы, подверженные воздействию прямого или непрямого удара молнии и не способные его выдержать	* Использование заземлителя/заземляющей пластины, наконечников и тому подобного на башне/штативе метеостанции * Использование устройств подавления перенапряжений между приборами и системой сбора данных для защиты системы сбора данных
	* Наведенные помехи	* Отказ от применения длинных неэкранированных кабелей
Вода	* Коррозия разъемов и т.п.	* Защита соединений и клемм с помощью лент, пропитанных смазкой/маслом или аналогичных мер * Тщательный подбор типов металла для стыков или использование изоляторов и смазочных материалов (смазки высокой вязкости) для минимизации электролиза
	* Накопление посторонних химических веществ на чувствительных элементах, таких как датчики относительной влажности	* Проведение регулярных проверок и мониторинг данных для регулирования режима технического обслуживания
	См. также «Паводок»	
	См. также «Сильный ветер»	

Тип явления	**Тропический циклон**	
Причина	Характеристика погодной системы	
Соображения	* Представляют ли вихревые ветры какой-либо дополнительный риск?	
Основная опасность	*Уязвимость или воздействие на инфраструктуру*	*Меры по смягчению последствий*
Ветер	* Вихревые ветры	* Проектирование креплений и кабелей объектов инфраструктуры, которые могут вращаться при сильном ветре, так, чтобы они не вытягивались и не перекручивались свыше допустимых пределов * Закрепление веревками или уборка всех незакрепленных предметов или материалов, которые могут стать летающим мусором во время грозы. Осмотр окружающей местности на предмет деревьев или кустарников с ветвями, которые могут обломиться или упасть во время сильного ветра; принятие мер по их удалению
	См. также «Сильный ветер»	
Обломки	См. также «Сильный ветер»	
Тип явления	**Торнадо**	
Причина	Погодная подсистема, характеризующаяся сильными ветрами и сдуванием обломков	
Соображения	* Представляют ли вихревые ветры какой-либо дополнительный риск?	
Основная опасность	*Примеры воздействия на инфраструктуру*	*Меры по смягчению последствий*
Ветер	* Вихревые ветры	* Проектирование креплений и кабелей объектов инфраструктуры, которые могут вращаться при сильном ветре, так, чтобы они не вытягивались и не перекручивались свыше допустимых пределов
	См. также «Сильный ветер»	
Обломки	См. также «Сильный ветер»	
Тип явления	**Штормовой нагон**	
Причина	Результат циклонов и суровой погоды	
Соображения	Ограничения	
Течение	См. также «Цунами»	
Вода	См. также «Паводок»	
Обломки	См. также «Паводок»	

Тип явления	**Цунами**	
Причина	Не зависит от метеорологических факторов, происходит в результате геологических смещений, подводных оползней или метеоров	
Соображения		
Основная опасность	*Уязвимость или воздействие на инфраструктуру*	*Меры по смягчению последствий*
Течение	* Эрозия или потеря фундаментов	* Проверка того, что фундаменты башен и метеорологических будок укреплены, чтобы противостоять силе воды, движущейся со скоростью от 2 до 20 м · $с^{-1}$. Обратите внимание, что прилив при цунами значительно выше высоты волны * Закрепление мачт и крупных объектов инфраструктуры на близлежащих конструкциях с помощью дополнительных веревок * Закрепление веревками или уборка всех незакрепленных предметов или материалов, которые могут стать летающим мусором во время грозы. Осмотр окружающей местности на предмет деревьев или кустарников с ветвями, которые могут обломиться или упасть во время сильного ветра; принятие мер по их удалению
Вода	См. также «Паводок»	
Обломки	См. также «Паводок»	
Основная опасность	*Уязвимость или воздействие на приборы*	*Меры по смягчению последствий*
Течение	* Почти все, полное уничтожение	* Установка приборов выше вероятной высоты подъема волны цунами в районах, подверженных цунами
	См. также «Паводок»	
	См. также «Паводок»	

Тип явления	**Снег/близзард/обледенение**	
Причина	Системы экстремально холодной погоды, а также связанные с продолжительной холодной и ветреной погодой	
Соображения	* Ожидается ли, что системы продолжат работать после заморозков/оттепели? * Подходят ли приборы или объекты инфраструктуры для работы в условиях устойчивой пониженной температуры?	
Основная опасность	*Уязвимость или воздействие на инфраструктуру*	*Меры по смягчению последствий*
Холод и обледенение	* Разрушение укрытий, мачт и т. п. из-за веса льда/снега	* Изучение использования покрытий и материалов, предотвращающих обледенение
	* Ослабление крепления метеорологических будок и корпусов из-за расширения замерзающей воды в соединениях, трещинах и щелях	* Обеспечение надлежащей эксплуатации метеорологических будок и корпусов; использование материалов, устойчивых к растягивающим нагрузкам и менее подверженных гниению, например нехрупких пластмасс
	* Башни/мачты	* Использование башен/мачт, обладающих некоторой гибкостью и/или слегка вибрирующих, чтобы сбрасывать снег и лед
	* Снежный/ледяной покров на солнечных панелях, что в конечном итоге приводит к потере энергоснабжения	* Наклон солнечных панелей как можно ближе к вертикали для предотвращения налипания снега/льда
Ветер	* Поломка объектов инфраструктуры (например, мачты) при сильном ветре из-за обледенения	* Выбор материалов, сохраняющих эластичность ниже ожидаемой минимальной температуры * Регулярное удаление льда

Тип явления	**Снег/близзард/обледенение**	
Основная опасность	*Уязвимость или воздействие на приборы*	*Меры по смягчению последствий*
Холод и обледенение	* Наледь на приборах, например механических анемометрах, ультразвуковых датчиках, датчиках дождя и дождемерах	* Использование обогреваемых приборов (например, анемометров) и приборов с циклическим нагревом (например, влажность), если это целесообразно. Проверка того, что нагреватель не мешает работе других приборов * Использование непрерывного потока воздуха (в идеале — сухого воздуха) для предотвращения оседания воды или снега или образования льда * Закрепление нагревательной ленты непосредственно на поверхностях (электронагревательные элементы, вмонтированные в гибкий листовой материал, или нихромовая проволока); это наиболее эффективно для датчиков без подвижных частей * Использование приборов с поверхностями или покрытиями, предотвращающими обледенение * Распыление жидкости с низкой температурой замерзания (в частности гликоля или этанола) на датчики во время процесса обледенения; не подходит для датчиков влажности * Установка датчика ветра на мачту, обладающую небольшой гибкостью (например, мачту для виндсерфинга) * В условиях сильного обледенения ни один из этих методов не будет эффективен
	* Снежный/ледяной покров на пиранометрах/ датчиках радиации	* Использование непрерывного потока воздуха (в идеале — сухого воздуха) для предотвращения оседания воды или снега или образования льда
	* Налипание снега/льда на объекты инфраструктуры, что влияет на условия измерений, например снежный/ледяной покров на датчиках температуры и метеорологических будках приводит к некорректным данным (из-за гораздо более высокой постоянной времени), а также вызывает турбулентность вокруг анемометров	* Предотвращение обледенения или регулярное удаление льда с помощью вышеуказанных методов, таких как использование материалов, предотвращающих обледенение, жидкостей с низкой температурой замерзания * Минимизация площади поверхности объектов инфраструктуры

Тип явления	**Лавина**	
Причина	Результат накопления снега в сочетании с определенными наземными и атмосферными условиями	
Соображения	* Каков уклон местности вблизи участка?	
Основная опасность	*Уязвимость или воздействие на инфраструктуру*	*Меры по смягчению последствий*
Масса и обломки	* Разрушение объектов инфраструктуры на пути схода лавины	* Размещение станции выше на склонах гор
	* Снежный/ледяной покров на солнечных панелях, что в конечном итоге приводит к потере энергоснабжения	* Строительство башен с несколькими солнечными батареями на разной высоте * Добавление резервных батарей и сигнализации при потере напряжения и тока в сети
	См. также «Оползень/грязевой оползень»	
Основная опасность	*Уязвимость или воздействие на приборы*	*Меры по смягчению последствий*
Масса и обломки	* Почти все	
	* Снежный/ледяной покров на оптических датчиках	* Строительство башен с несколькими комплектами датчиков на разной высоте
	* Снежный/ледяной покров на пиранометрах/ датчиках радиации	* Рассмотрение возможности автоматической очистки при небольшой зоне охвата
	* Снежный/ледяной покров на температурных датчиках и метеорологических будках приводит к неверным показателям (из-за гораздо более высокой постоянной времени)	* Предотвращение обледенения или регулярное удаление льда с помощью вышеуказанных методов, таких как использование материалов, предотвращающих обледенение, жидкостей с низкой температурой замерзания
	См. также «Снег/близзард/обледенение»	
	См. также «Оползень/грязевой оползень»	

Тип явления	**Пыльная буря**	
Причина	Результат сильного ветра в сочетании с определенным типом почвы	
Соображения	Сколько времени системы должны работать без присмотра или при наличии обслуживания? Какой класс IP мы могли бы ожидать?	
Основная опасность	*Уязвимость или воздействие на инфраструктуру*	*Меры по смягчению последствий*
Абляция	* Оборудование, которое может быть повреждено песком или оказаться под наносом	* Отказ от использования материалов с покрытием; выбор отполированного металла
	* Повреждение или ухудшение состояния защитных покрытий, что может привести к точечной или общей коррозии	* Осмотр окрашенных, пластиковых или порошковых поверхностей на предмет сколов, мелких трещин или растрескивания
Грязь	* Скопление пыли/песка в защитных корпусах	* Использование защитных корпусов с классом защиты IP6X или выше * Проектирование креплений и рам так, чтобы минимизировать накопление песка и грязи
	* Засорение вентилируемой метеорологической будки	* Регулярные осмотры и очистка
	* Потеря электроэнергии или связи	* Добавление резервных батарей и сигнализации при потере напряжения и тока в сети * Подключение резервной связи через альтернативного поставщика
Основная опасность	*Уязвимость или воздействие на датчики*	*Меры по смягчению последствий*
Абляция	* Вентилируемое оборудование, притягивающее пыль	* Остановка вентиляции, когда ветер или количество частиц превышает заданное значение
Грязь	* Засорение невентилируемого оборудования	* Увеличение частоты осмотра оборудования для удаления скоплений пыли * Использование герметичных корпусов (с высокой степенью защиты IP), например IP68, для системы сбора данных * Более частая замена фильтров в пыльных средах * Конструирование датчиков для минимизации площади поверхности и щелей и карманов, в которых может скапливаться грязь
	* Оптическое оборудование и оборудование для солнечного излучения	* Рассмотрение возможности ежедневной автоматической очистки при небольшой зоне охвата

Тип явления	**Пожар**	
Причина	Результат жаркой погоды, удара молнии или вандализма	
Соображения	* Насколько жарким может быть типичный пожар? * Как долго может продолжаться пожар?	
Основная опасность	*Уязвимость или воздействие на инфраструктуру*	*Меры по смягчению последствий*
Тепло и горение	* Деформация металлических и пластиковых компонентов	* Отказ от использования пластмасс с низкой температурой плавления и легких металлов
	* Выход из строя электроники при сильной жаре	* Использование защитных корпусов, обеспечивающих некоторую изоляцию, например с двойной оболочкой * Проверка того, что класс электроники подходит для использования в том климате, в котором она будет действовать, например, на 20 °C-30 °C выше максимальной климатической температуры
	* Повреждения, снижающие класс IP	* Осмотр и замена уплотнений
	* Уничтожение любых горючих материалов	* Строительство из негорючих материалов, таких как металл и бетон * Предотвращение образования трещин и щелей в конструкции кожухов и т.п., куда могут попасть угли и искры. Отверстия должны быть экранированы или закрыты, где это практически возможно
	* Нарушение структурной целостности мачт и других объектов инфраструктуры после явления	* Регулярный осмотр на наличие разрушений из-за напряжения, усталости и роста зерна в металлических деталях
	* Повреждение или ухудшение состояния защитных покрытий, что может привести к точечной или общей коррозии	* Осмотр окрашенных, пластиковых или порошковых поверхностей на предмет сколов, мелких трещин или растрескивания
Обломки	* Повреждения от падающих обломков	* Размещение оборудование в пожароопасных районах на соответствующем расстоянии от конструкций и деревьев, которые могут упасть
Пыль	См. также «Пыльная буря»	

Тип явления	**Пожар**	
Основная опасность	*Уязвимость или воздействие на приборы*	*Меры по смягчению последствий*
Тепло и горение	* Деформация облицовки/корпусов и выход из строя электроники	* Отказ от использования пластмасс с низкой температурой плавления и легких металлов * Использование защитных корпусов, обеспечивающих некоторую изоляцию, например с двойной оболочкой, но отказ от использования горючих изоляционных материалов.
	* Повреждения, снижающие класс IP	* Осмотр и замена уплотнений
	* Уничтожение любых горючих материалов	* Строительство из негорючих материалов, таких как металл и бетон
	* Повреждение датчиков в результате теплового воздействия (чувствительные элементы или кожухи)	* Проверка того, что класс датчиков подходит для использования в том климате, в котором они будут применяться; например, на 20 °C-30 °C выше климатического максимума для электроники и на 5 °C-10 °C выше для диапазона измерений
	* Нарушение структурной целостности мачт и других объектов инфраструктуры после явления	* Регулярный осмотр на наличие разрушений из-за напряжения, усталости и роста зерна в металлических деталях
	* Повреждение или ухудшение состояния защитных покрытий, что может привести к точечной или общей коррозии	* Осмотр окрашенных, пластиковых или порошковых поверхностей на предмет сколов, мелких трещин или растрескивания
Обломки	* Повреждения от падающих обломков	* Размещение оборудования в пожароопасных районах на соответствующем расстоянии от конструкций и деревьев, которые могут упасть
Пыль	См. также «Пыльная буря»	

Тип явления	**Засуха**	
Причина	Результат длительных периодов низкого уровня осадков или полного отсутствия осадков	
Соображения	Должны ли фундаменты быть приспособлены к подвижности грунта?	
Основная опасность	*Уязвимость или воздействие на инфраструктуру*	*Меры по смягчению последствий*
Пыль	* Деградация фундаментов оборудования на глинистых почвах (растрескивание, эрозия)	* Использование систем крепления, стабилизирующих окружающую почву, например, физических анкеров, которые вызывают минимальное возмущение почвы, распределяя нагрузку
Эрозия	См. также «Пыльная буря»	
Основная опасность	*Уязвимость или воздействие на приборы*	*Меры по смягчению последствий*
Пыль	* Выход из строя электроники	* Проверка на наличие сухих соединений в электронике
Эрозия	* Засоренные фильтры	* Более частая замена фильтров в пыльной среде

Тип явления	**Волны тепла/солнечная радиация**	
Причина	Длительные периоды повышенной температуры и/или интенсивного солнечного света	
Соображения	Могут ли приборы или объекты инфраструктуры выдерживать устойчивую повышенную температуру?	
Основная опасность	*Уязвимость или воздействие на инфраструктуру*	*Меры по смягчению последствий*
Жара	* Небольшое, если только наружные поверхности не отличаются низкой допустимой температурой	* Отказ от использования пластмасс с низкой температурой плавления и легких металлов
	* Выход из строя электроники из-за перегрева	* Использование брезента или аналогичных материалов для затенения электроники и снижения тепловой нагрузки на системы * Закапывание контейнера с электронной аппаратурой там, где это целесообразно. Примечание: убедитесь, что внутрь не попадает вода * Использование пассивного охлаждения, например с помощью конструкции с вентилятором и трубой. Примечание: убедитесь, что риск попадания воды не увеличивается, разместив вентиляционное отверстие выше ожидаемого уровня воды; используйте фильтры/будки для предотвращения доступа пыли и животных * Использование активного охлаждения, например, с помощью вентиляторов (обратите внимание на приведенные выше предостережения относительно попадания воды, пыли и доступа животных) * Использование активных охладителей, таких как охлаждающие элементы Пельтье или кондиционеры
	* Старение сварных швов и соединений	* Более частые проверки на предмет усталости и износа металла
Радиация	* Разрушение структуры из-за воздействия ультрафиолета	* Использование материалов, устойчивых к ультрафиолетовому излучению, таких как металлы, твердые породы дерева или пластик, стабилизированный к ультрафиолетовому излучению
	* Обесцвечивание и старение пластмассовых деталей	* Более частые осмотры для выявления деформации и износа, в частности, корпусов и метеорологических будок * Использование брезента или аналогичных материалов для затенения электроники и снижения тепловой нагрузки на системы

Тип явления	**Волны тепла/солнечная радиация**	
Основная опасность	*Уязвимость или воздействие на приборы*	*Меры по смягчению последствий*
Жара	* Повреждение датчиков в результате теплового воздействия (чувствительные элементы или кожухи)	* Проверка того, что класс приборов подходит для использования в том климате, в котором они будут применяться; например, на 20 °C-30 °C выше климатического максимума температуры для электроники и на 5 °C-10 °C выше для диапазона измерений
	* Выход из строя приборов из-за перегрева	* Использование охлаждающих элементов Пельтье или воздушного потока (пассивного и активного) там, где это не помешает измерениям
Радиация	* Разрушение структуры из-за воздействия ультрафиолета	* Использование материалов, устойчивых к ультрафиолетовому излучению, такие как металлы, твердые породы дерева или пластик, стабилизированный к ультрафиолетовому излучению

Тип явления	**Землетрясение/вулкан**	
Причина	Не зависит от метеорологических факторов	
Соображения		
Основная опасность	*Уязвимость или воздействие на инфраструктуру*	*Меры по смягчению последствий*
Извержение	* Вулкан: заглубление в результате выпадения пепла; разрушение в результате прямого контакта с потоком	* Максимальное использование огнестойких материалов
Перемещение земляных масс	* Землетрясение: большая часть объектов инфраструктуры	* Использование систем крепления, стабилизирующих окружающую почву, например, физических анкеров, которые вызывают минимальное возмущение почвы, распределяя нагрузку
	* Вулканическая пыль на солнечных панелях: в конечном итоге потеря энергоснабжения	* Добавление резервных батарей и сигналов тревоги при потере напряжения и тока в сети
Основная опасность	*Уязвимость или воздействие на приборы*	*Меры по смягчению последствий*
Извержение	* Вулкан: пылевое загрязнение	* См. «Пыль» выше
Перемещение земляных масс	* Землетрясение: весовые приборы, ненадежно закрепленные приборы, например плювиограф с опрокидывающимся сосудом.	
	* Вулканическая пыль на оптических датчиках	* Рассмотрение возможности автоматической очистки при небольшой зоне охвата
	* Вулканическая пыль на пиранометрах/датчиках радиации	* Рассмотрение возможности автоматической очистки при небольшой зоне охвата

Тип явления	**Безопасность**	
Причина	Вандализм	
Соображения		
Основная опасность	*Уязвимость или воздействие на инфраструктуру*	*Меры по смягчению последствий*
Вандализм	* Кража или неумышленное повреждение	* Использование ограждений * Использование несъемных креплений для дорогостоящих предметов, таких как солнечные панели * В удаленных районах поощрение понимания местным населением ценности обслуживания, обеспечиваемого оборудованием
Дикая природа	* Порча кабелей	* Использование прочных кабелепроводов или армированных кабелей
	* Поломка объектов инфраструктуры животными, трущимися об оборудование	* Использование надлежащего ограждения от животных
Основная опасность	*Уязвимость или воздействие на приборы*	*Меры по смягчению последствий*
Вандализм	* Кража или неумышленное повреждение	* Использование ограждений * В удаленных районах поощрение понимания местным населением ценности обслуживания, обеспечиваемого оборудованием
Дикая природа	* Нападения птиц на ультразвуковые датчики	* Использование шипов для защиты от птиц там, где они садятся
	* Загрязнение и коррозия из-за птичьего помета	* Использование шипов для защиты от птиц там, где они садятся
	* Поломка или смещение датчиков животными, трущимися об оборудование	* Использование надлежащего ограждения от животных

ПРИЛОЖЕНИЕ 1.F. ОПИСАНИЕ УСТАНОВКИ СТАНЦИИ

Точность, с которой данные наблюдения описывают состояние выделенной части атмосферы, не является такой же, как погрешность прибора, поскольку ценность данных наблюдений также зависит от установки прибора по отношению к атмосфере. Это не является техническим вопросом, и поэтому описание установки также является ответственностью наблюдателя станции или техника. На практике идеальное место размещения встречается редко, и надежность данных наблюдений невозможно установить до тех пор, пока не проведено надлежащее документальное оформление фактической установки (Wieringa and Rudel, 2002).

Метаданные станции должны содержать следующие аспекты установки прибора:

a) высота приборов над поверхностью (или ниже ее, для температуры почвы);

b) тип защиты и степень вентиляции для измерения температуры и влажности;

c) степень помех по стороны других приборов или объектов (мачты, вентиляторы);

d) окружающая обстановка прибора на уровне микромасштаба или местного масштаба, в частности:

   i) состояние поверхности ограждения, влияющее на температуру и влажность; близлежащие крупные препятствия (здания, заборы, деревья) и их размер;

   ii) степень закрытия горизонта для наблюдений за солнечным сиянием и радиацией;

   iii) шероховатость окружающей территории и основная растительность, оказывающие воздействие на ветер;

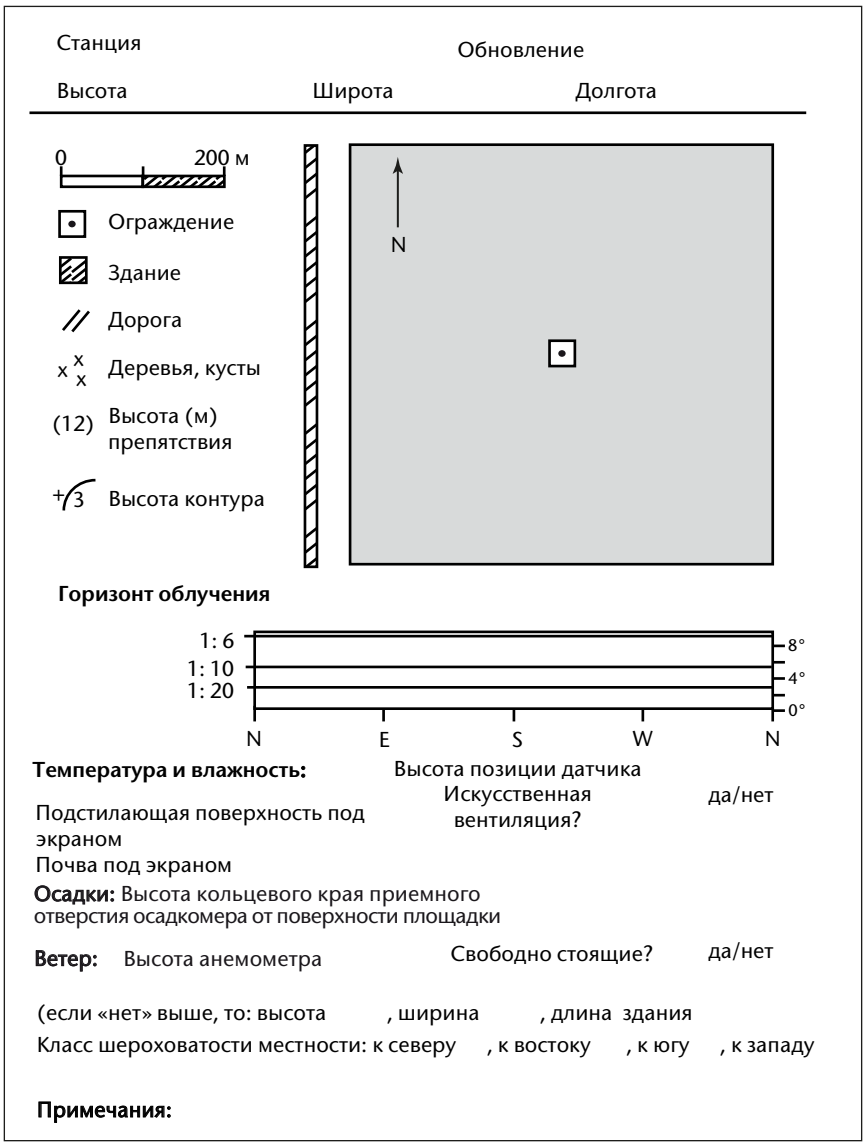
   iv) все характеристики территории в местном масштабе, такие как незначительные уклоны, тротуары, водные поверхности;

   v) основные характеристики территории в мезомасштабе, такие как прибрежные зоны, горы или урбанизация.

Большинство этих вопросов будут носить полупостоянный характер, однако в ведущемся на станции журнале следует регистрировать и датировать любые значительные изменения (рост растительности, новые здания).

Для документирования установки станции в местном масштабе желательна карта с масштабом не более 1:25 000, показывающая контуры с разницами возвышения ≈ 1 м. На этой карте должны быть отмечены места нахождения зданий и деревьев (с указанием высоты), поверхностный покров и смонтированные приборы. По краям карты следует указывать основные дистанционные характеристики территории (например, застроенные районы, леса, открытая вода, холмы). Полезными являются фотографии, если на них не просто показаны ближние планы прибора или метеорологической будки, но если они сделаны на достаточном расстоянии для того, чтобы показать данный прибор и территорию на его заднем плане. Подобные фотографии следует делать со всех главных румбов.

Необходимые минимальные метаданные для установки прибора могут быть обеспечены благодаря заполнению образца, который приводится для каждой станции в сети (см. рисунок ниже). Пример того, как это делается, показан в публикации ВМО (WMO, 2003). Классы, используемые в данной публикации для описания шероховатости территории, приводятся в главе 5 данного тома. Более подробное описание вопросов, касающихся метаданных, дается в публикации ВМО (2017).



Основная форма для метаданных, касающихся месторасположения станции

ПРИЛОЖЕНИЕ 1.G. КЛАССИФИКАЦИИ КАЧЕСТВА ИЗМЕРЕНИЙ ДЛЯ НАЗЕМНЫХ СТАНЦИЙ ПРИЗЕМНЫХ НАБЛЮДЕНИЙ

1. ЦЕЛЬ

Настоящий документ предназначен для использования пользователями метеорологических данных, проектировщиками сетей, исполнителями и руководителями. Целью настоящего документа является определение схемы для:

- количественной оценки качества измерений данных с существующей станции;
- определения оптимальных характеристик системы для получения подходящего для конкретной ситуации решения;
- понимания факторов, влияющих на качество измерений и эффективное управление станциями;
- закупки и оценки измерительных систем; и
- обеспечения разработки решений, отвечающих потребностям пользователей.

2. ВВЕДЕНИЕ

2.1 Данная схема, Классификации качества измерений для наземных станций приземных наблюдений (Схема классификаций качества измерений), в сочетании с Классификациями размещения площадок для станций приземных наблюдений на суше (Схема классификаций размещения площадок) (приложение 1.D), является частью метаданных для измеряемой величины. Эти схемы помогают всем пользователям данных получить оценку общего качества используемых ими данных.

2.2 Эти схемы не определяют, какие измерения являются хорошими или плохими, а скорее указывают, подходит ли измерение для конкретного применения. Кроме того, эти схемы определяют параметры, которые позволяют проводить сравнение между объектами внутри сетей наблюдений или между сетями наблюдений с использованием метаданных, которые собираются стандартизированным образом. Эти схемы позволяют операторам сетей оценивать свои станции, ставить соответствующие цели в отношении качества своих наблюдений и определять области, которые могут нуждаться в улучшении.

2.3 В настоящем документе описывается четырехуровневая схема классификации измерений на основе измеряемых величин. Эти уровни позволяют операторам сети сосредоточиться на требуемом результате и помогают пользователям данных понять качество получаемых ими данных.

3. ВЗАИМОСВЯЗИ

3.1 Настоящая схема классификаций отражает взаимосвязи с различными публикациями ВМО о требованиях. В частности:

- потребности пользователей в наблюдениях (Инструмент анализа и обзора возможностей систем наблюдения (OSCAR)/Потребности), 2020 г.;
- требования к оперативной неопределенности измерений и рабочие характеристики приборов (приложение 1.A);
- классификации размещения площадок для станций приземных наблюдений на суше (приложение 1.D).

3.2 Потребности пользователей транслируются в общую неопределенность измерений посредством применения Схемы классификации качества измерений и Схемы классификации размещения площадок (см. рисунок 1). Классификация измерений отражает реализованную неопределенность системы, а классификация размещения — неопределенность данного типа измерений в зависимости от размещения станции. Совокупность схем определяет общую неопределенность данного типа измерений на данном объекте.

3.3 Все неопределенности измерений в этом документе выражены с доверительной вероятностью 95 % (k=2), если не указано иное.

3.4 Для разработки классов Схемы классификации качества измерений (оранжевая рамка на рисунке 1) были использованы потребности пользователей из OSCAR и других источников (см. примечание 2 к таблице 1). Эта схема охватывает следующие источники неопределенности:

- прибор и калибровка — эксплуатационные характеристики прибора в контролируемых условиях, согласованные с приложением 1.A, например, постоянная времени, разрешение и прослеживаемая калибровка;
- влияние интерфейсов приборов — влияние физических интерфейсов между прибором и окружающей средой, например, будки, датчика статического давления;
- техническое обслуживание и проверка — влияние, которое техническое обслуживание оказывает на неопределенность системы в полевых условиях, например, метод очистки и периодичность проверки;
- воздействие окружающей среды — влияние полевых явлений на работу прибора, например, эффект охлаждения за счет испарения воды с экрана, влияние ветра на измерения осадков и давления. Эти воздействия влияют на точность прибора и не учтены в Схеме классификации размещения.

3.5 Рамка «Воздействие окружающей среды» на рисунке 1 затенена серым цветом, чтобы показать, что это область активных исследований и не все факторы хорошо поддаются количественной оценке.

3.6 Критерии схемы классификации качества измерений приведены в соответствие с OSCAR/Потребности с учетом неопределенности классификации размещения.

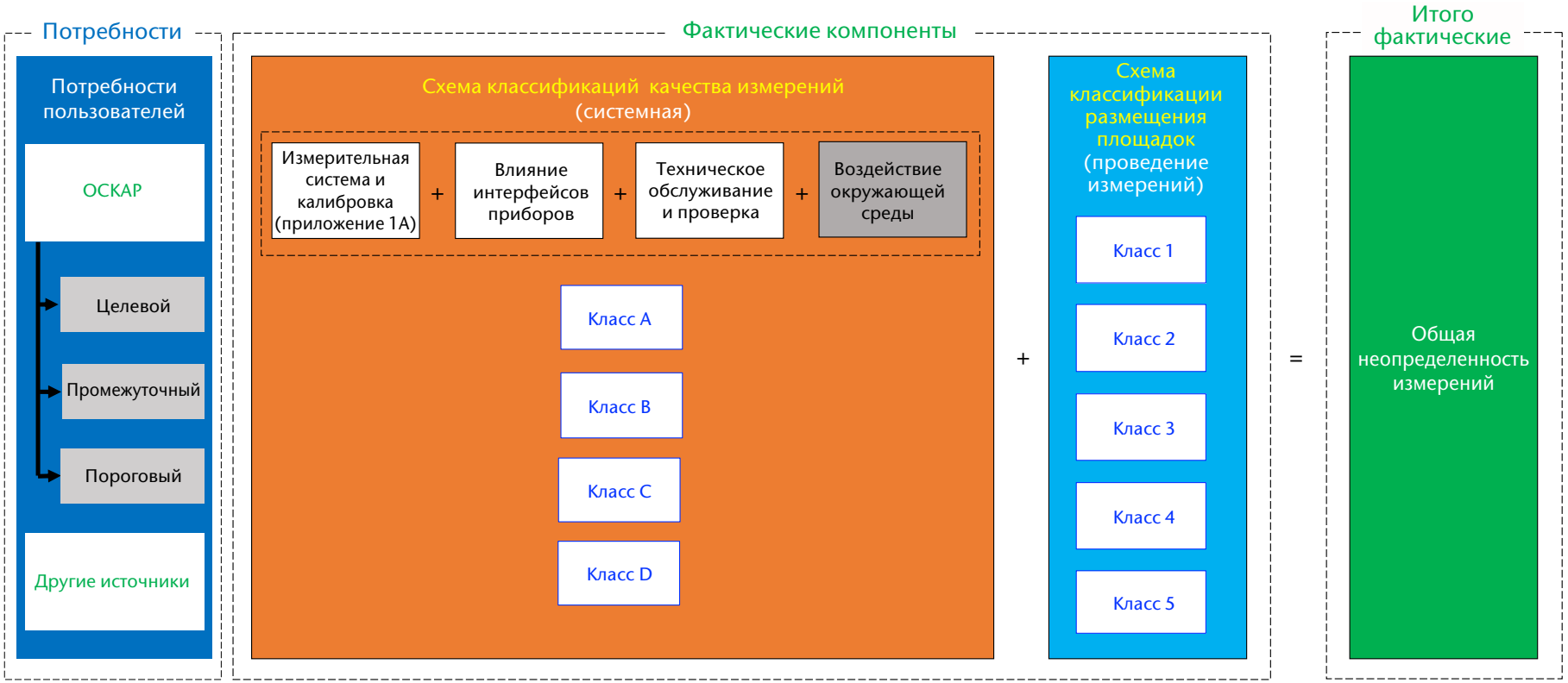


Рисунок 1. Обзор потребностей пользователей и схем классификаций

Таблица 1. Критерии для классификации качества измерений

Измеряемая величина	*Класс A*	*Класс B*	*Класс C*	*Класс D*
Температура воздуха	0,2 K [1a]	0,6 K [1a]	1,0 K [1a]	Больше, чем для класса C, или неизвестно
Относительная влажность	2 % ОВ [1b]	5 % ОВ [1b]	10 % ОВ [1b]	
Атмосферное давление	0,2 гПа [1a]	1,0 гПа [1a]	2,0 гПа [1a]	
Скорость и порывы ветра	Наибольшее из: 1 м·с$^{-1}$ [1b] или 5 % [2b]	Наибольшее из: 2 м·с$^{-1}$ [1b] или 10 % [2a]	Наибольшее из: 5 м·с$^{-1}$ [1b] или 15 % [2b]	
Порог чувствительности	≤ 0,5 м·с$^{-1}$ [2b]	≤ 1,0 м·с$^{-1}$ [2b]	≤ 2,5 м·с$^{-1}$ [2b]	
Направление ветра	5° [2a]	10° [2b]	15° [2b]	
Количество жидких осадков (суточное)	Наибольшее из: 1 мм [1a] или 2 % [2a]	Наибольшее из: 3 мм [1a] или 5 % [2b]	Наибольшее из: 10 мм [1a] или 10 % [2b]	
Интенсивность жидких осадков	Наибольшее из: 0,2 мм·ч$^{-1}$ [1b] или 5 % [2a]	Наибольшее из: 0,5 мм·ч$^{-1}$ [1b] или 10 % [2b]	Наибольшее из: 2 мм·ч$^{-1}$ [1b] или 15 % [2b]	
Порог чувствительности	0,1 мм·ч$^{-1}$ [1c]	0,3 мм·ч$^{-1}$ [1c]	1,0 мм·ч$^{-1}$ [1c]	
Прямое солнечное излучение	1 % + 3 Вт·м$^{-2}$ [3a]	2 % +7 Вт·м$^{-2}$ [3a]	6 % + 15 Вт·м$^{-2}$ [3a]	
Суммарное солнечное излучение	2 % + 15 Вт·м$^{-2}$ [3a]	3 % + 30 Вт·м$^{-2}$ [3a]	8 % + 55 Вт·м$^{-2}$ [3a]	
Рассеянное солнечное излучение	2,5 % + 15 Вт·м$^{-2}$ [3a]	4 % + 30 Вт·м$^{-2}$ [3a]	10 % + 55 Вт·м$^{-2}$ [3a]	
Продолжительность солнечного сияния (суточная)	Наибольшее из: 0,1 ч или 2 % [2a]	Наибольшее из: 0,5 ч или 5 % [2b]	Наибольшее из: 1,0 ч или 10 % [2b]	
Порог длительности солнечного сияния	120 Вт·м$^{-2}$ ± 10 % [2d]	120 Вт·м$^{-2}$ ± 20 % [2c]	120 Вт·м$^{-2}$ ± 30 % [2d]	

Примечания:

1 Классификации для других измеряемых величин из *Наставления по Интегрированной глобальной системе наблюдений ВМО* (ВМО-№ 1160, приложение 5.1) еще не определены из-за отсутствия общих знаний по данному вопросу или справочной информации.

2. Источники значений, приведенных в таблице выше, можно найти в следующих публикациях:
   [1a] OSCAR/Потребности, с использованием самых низких значений неопределенности из всех областей применения;
   [1b] OSCAR/Потребности, с использованием номинальной средней неопределенности из областей применения:
   [1c] OSCAR/Потребности, экстраполировано на имеющиеся в настоящее время технологии:
   [2a] приложение 1.A;
   [2b] приложение 1.A, экстраполировано на имеющиеся в настоящее время технологии;
   [2c] глава 8 настоящего тома;
   [2d] глава 8 настоящего тома, экстраполировано на имеющиеся в настоящее время технологии;
   [3a] ISO 9060:2018.

4. ОПИСАНИЕ КЛАССОВ

4.1 Четыре уровня схемы классификации качества измерений определяются на основе целевой неопределенности системы:

- **класс A** соответствует целевому уровню OCKAP/Потребности;
- **класс B** соответствует промежуточному уровню OCKAP/Потребности;
- **класс C** соответствует пороговому уровню OCKAP/Потребности;
- **класс D** больше, чем неопределенность для класса C, или информация недоступна.

4.2 При наличии OCKAP/Потребности был выбран наиболее низкий или номинальный средний заявленный уровень неопределенности для всех сфер применения (в зависимости от имеющейся в настоящее время технологии), в противном случае использовалось приложение 1.A или соответствующий стандарт (см. примечание 2 к таблице 1).

4.3 Целевая неопределенность системы для всех классов выражается с доверительной вероятностью 95 % (k=2). OCKAP/Потребности были скорректированы соответственно с доверительной вероятности 68 % (k=1).

4.4 Подробные критерии для каждого класса эффективности приведены в таблице 1. Таблица 1 содержит измеряемые величины и показатели целевой неопределенности системы, которые должны обеспечиваться для каждого класса. Для определения класса в отношении некоторых измеряемых величин требуется дополнительное пороговое значение.

5. ПРИМЕНЕНИЕ СХЕМЫ КЛАССИФИКАЦИЙ КАЧЕСТВА ИЗМЕРЕНИЙ

5.1 Каждая организация использует различные датчики и применяет локальные методы для мониторинга и поддержания качества измерений в полевых условиях. Данная Схема классификаций качества измерений обеспечивает универсальный подход для оказания помощи в удовлетворении требований пользователей. Классификация может быть применена к любой наземной измерительной системе для измеряемых величин, указанных в таблице 1. Для поддержания реализованной неопределенности системы с течением времени приборы и связанное с ними оборудование:

- обязательно должны проходить лабораторную калибровку или калибровку на площадке в стабильных, определенных и известных условиях, при наличии, по стандарту, прослеживаемому до СИ. Калибровка должна выполняться в полевом рабочем диапазоне прибора с периодичностью, соответствующей его стабильности. Первоначально периодичность калибровки должна соответствовать рекомендациям производителя, а затем корректироваться на основе анализа результатов калибровки;
- должны проходить полевые проверки или поверки с использованием прослеживаемых стандартов передачи, особенно для более длительных интервалов калибровки. Они выполняются в период между лабораторными калибровками. Если в результате проверки прибора выявляется выход за пределы допустимых отклонений, прибор следует заменить;
- должны быть проверены на работоспособность при удалении с поля;
- обязательно должны проходить техническое обслуживание для поддержания желаемого уровня неопределенности измерений. Периодичность технического обслуживания сначала следует устанавливать на основе рекомендаций изготовителей приборов, а затем корректировать с учетом опыта их эксплуатации.

5.2 Меры по поддержанию качества измерений должны предусматривать: мониторинг данных и технического состояния приборов; обеспечение наличия надежной системы оповещения о неисправностях и реагирования на них; и внедрение всеобъемлющей системы обеспечения качества.

5.3 Качество измерений со временем меняется под влиянием внутренних и внешних факторов. Схема классификаций качества измерений учитывает это, принимая во внимание, насколько сильно измерительная система изменяется между плановым профилактическим обслуживанием, калибровкой и/или проверкой в процессе нормальной эксплуатации.

5.4 Для демонстрации применения этой схемы были разработаны три примера. В таблице 2 показано, как измерительная система, калибровка, техническое обслуживание, проверка и влияние окружающей среды сочетаются для достижения необходимого уровня реализованной неопределенности системы и, следовательно, соответствия требованиям к необходимому классу. Эти примеры предназначены для того, чтобы помочь пользователям таблицы 1 в управлении станциями и оценке своих решений. Данные примеры не являются обязательными рекомендациями.

5.5 Первый и второй сценарии, приведенные в таблице 2, показывают, как комбинация различных по качеству измерительной системы и будки и периодичности технического обслуживания может обеспечить соответствие одному и тому же классу. Третий сценарий показывает, что даже при хорошо поддерживаемой высококачественной измерительной системе другие факторы (в данном случае будка) могут повлиять на способность соответствовать необходимому классу. В этом сценарии альтернативы заключаются в том, чтобы либо устранить негативные факторы, либо присвоить системе другой класс.

6. ИСТОЧНИКИ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ

Ниже приведен перечень некоторых ключевых источников неопределенности для наземных измерительных систем. Он не является исчерпывающим, но представлен в качестве справки для пользователей. Надежная оценка источников неопределенности предусматривает определение измеряемой величины. Дальнейшие указания по внедрению оценки неопределенности см. в ИСО/МЭК (2008)/ОКГМ (2008).

Система измерения и калибровка:

- Качество конструкции и монтажа
- Разрешение
- Калибровка приборов и регистраторов
- Линейность
- Гистерезис
- Постоянная времени
- Температурный дрейф
- Метод выборки
- Периодичность выборки
- Алгоритм обработки данных
- Оцифровка и округление
- Время отклика

Таблица 2. Примеры использования Схемы классификации качества измерений в разных сценариях для класса B

Сценарий для класса B (измеряемая величина: температура воздуха, целевая неопределенность системы: 0,6 K)						
Сценарий	*Использование высококачественного (способного соответствовать классу A) прибора в большой метеорологической будке Стивенсона, но в условиях большой периодичности технического обслуживания*		*Использование прибора среднего качества в маленькой метеорологической будке Стивенсона в условиях хорошего технического обслуживания*		*Использование высококачественного, хорошо откалиброванного прибора (способного соответствовать классу A) в небольшой пластмассовой будке в условиях хорошего технического обслуживания*	
Разрешение	0,01 K		0,10 K		0,01 K	
Периодичность калибровки	5 лет		2 года		3 года	
Периодичность проверки	3 года		1 год		1 год	
Периодичность технического обслуживания	3 года		1 год		1 год	
Общая оценка неопределенности измерения						
Измерительная система и калибровка (k=1)	Прибор: Разрешение: Калибровка: Регистратор:	0,03 K 0,005 K 0,07 K 0,03 K	Прибор: Разрешение: Калибровка: Регистратор:	0,05 K 0,05 K 0,07 K 0,03 K	Прибор: Разрешение: Калибровка: Регистратор:	0,03 K 0,005 K 0,07 K 0,01 K
Влияние интерфейсов приборов (k=1)	Будка: 0.05 K		Будка: 0.10 K		Будка: 0.35 K	
Техническое обслуживание и проверка (k=1)	Техническое обслуживание: Дрейф/ старение:	0,15 K 0,025 K (0,005 K/год)	Техническое обслуживание: Дрейф/ старение:	0,05 K 0,060 K (0,030 K/год)	Техническое обслуживание: Дрейф/ старение:	0,03 K 0,015 K (0,005 K/год)
Воздействие окружающей среды (k=1)		0,24 K		0,24 K		0,35 K

Суммарная неопределенность (k=1)	0,30 K	0,29 K	0,50 K
Реализованная неопределенность системы (k=2)	0,60 K	0,58 K	1,00 K
Соответствие классу B	Да	Да	НЕТ

Примечания:
1. значения дрейфа/старения определяются путем умножения годового темпа изменения (в скобках) на интервал калибровки.
2. в данном примере предполагается, что отдельные компоненты неопределенности независимы и следуют функции нормального распределения. Суммарная неопределенность рассчитывается как квадратный корень из суммы квадратов величин отдельных компонентов неопределенности.

Влияние интерфейсов приборов:

- Радиационный экран
- Датчик статического давления
- Экран осадкомера

Техническое обслуживание и проверка:

- Периодичность технического обслуживания;
- Качество технического обслуживания
- Дрейф приборов и системы со временем
- Старение приборов и системы
- Неисправности приборов и системы (которые влияют на данные, но не вызывают отказов)
- Чистота прибора и площадки

Воздействие окружающей среды:

- Ударное воздействие на датчики при транспортировке и эксплуатации
- Испарение осадков с экрана
- Влияние ветра на измерения
- Образование конденсата на температурном приборе
- Влияние солнечного излучения на измерение

7. ОПРЕДЕЛЕНИЯ

Определения суммарной неопределенности измерений, коэффициента охвата и расширенной неопределенности измерений см. в документе *Оценивание данных измерений — Руководство по выражению неопределенности измерения* (ОКРМ 100).

Целевая неопределенность системы это максимальная допустимая неопределенность для измеряемой величины, соответствующая конкретному классу Схемы классификаций качества измерений (см. таблицу 1).

Примечание: целевая неопределенность системы не учитывает внешнего воздействия на приборы, так как они охватываются Схемой классификации размещения площадок (см. ниже).

Реализованная неопределенность системы это фактическая реализация пользователем требований к целевой неопределенности системы.

Примечание: эта оценка неопределенности рассчитывается пользователем с учетом используемых приборов, а также процессов управления и технического обслуживания, как указано в разделе Источники неопределенности. Реализованная неопределенность системы должна быть ниже или равна целевой неопределенности системы для заявленного класса.

Неопределенность измерений в зависимости от размещения это неопределенность, связанная с внешними воздействиями на приборы, как описано в приложении 1.D.

Примечание: этот параметр отражает влияние близлежащих объектов на окружающую среду измерения (например, деревья, стены, заборы, большие водоемы или тротуар).

Общая неопределенность измерений это сочетание реализованной неопределенности системы и неопределенности измерений в зависимости от размещения.

СПРАВОЧНАЯ И ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ЛИТЕРАТУРА

Всемирная метеорологическая организация, 1992: *Международный метеорологический словарь* (ВМО-№ 182), Женева.

———, 2008: *Руководство по гидрологической практике. Гидрология: от измерений до гидрологической информации* (ВМО-№ 168). Женева.

———, 2010*a*: *Сокращенный окончательный отчет третьей сессии Совместной технической комиссии ВМО/МОК по океанографии и морской метеорологии* (ВМО-№ 1049). Женева.

———, 2010*b*: *Руководство по агрометеорологической практике* (ВМО-№ 134). Женева.

———, 2010*c*: *Наставление по Глобальной системе обработки данных и прогнозирования* (ВМО-№ 485). Женева.

———, 2011*a*: *Руководство по климатологической практике* (ВМО-No. 100). Женева.

———, 2011*b*: *Технический регламент, том I — Общие метеорологические стандарты и рекомендуемые практики* (ВМО-№ 49). Женева.

———, 2021: *Наставление по Интегрированной глобальной системе наблюдений ВМО* (ВМО-№ 1160). Женева.

———, 2021: *Руководство по Интегрированной глобальной системе наблюдений ВМО* (ВМО-№ 1165). Женева.

Объединенный комитет по руководствам в области метрологии, 2012: *Международный словарь метрологии — Основные и общие понятия и связанные термины* (VIM), ОКРМ 200:2012.

Программа Организации Объединенных Наций по окружающей среде, 2017 год: Минаматская конвенция о ртути, https://www.mercuryconvention.org/sites/default/files/2021-06/Minamata-Convention-booklet-rus-full.pdf

Brooks, C. E. P.; Carruthers, N. *Handbook of Statistical Methods in Meteorology*, MO 538; Meteorological Office: London, 1953.

Bureau International des Poids et Mesures. *The International System of Units (SI)*. BIPM: Sèvres/Paris, 2006.

Cohen, E. R.; Giacomo, P. *Symbols, Units, Nomenclature and Fundamental Constants in Physics*; SUNAMCO Document IUPAP-25, reprinted from Physica 146A; International Union of Pure and Applied Physics, 1987.

Davenport, A. G. Rationale for Determining Design Wind Velocities. *Journal of the Structural Division* **1960**, *86* (5), 39–68. https://doi.org/10.1061/JSDEAG.0000521.

Davenport, A. G.; Grimmond, C. S. B.; Oke, T.R.; Wieringa, J. Estimating the roughness of cities and sheltered country. In *Preprints of the Twelfth American Meteorological Society Conference on Applied Climatology*, Asheville, United States, 8–12 May 2000, pp. 96–99.

Eisenhart, C. Realistic Evaluation of the Precision and Accuracy of Instrument alibration Systems. *Journal of Research of the National Bureau of Standards–C, Engineering and Instrumentation* **1963**, *67C* (2), 161–195.

International Civil Aviation Organization (ICAO). *World Geodetic System – 1984 (WGS-84) Manual*; ICAO Doc 9674–AN/946; ICAO: Montreal, 2002.

International Organization for Standardization (ISO). *Accuracy (Trueness and Precision) of Measurement Methods and Results – Part 1: General Principles and Definitions*; ISO 5725-1:1994/Cor.1:1998, 1994a.

International Organization for Standardization (ISO). *Accuracy (Trueness and Precision) of Measurement Methods and Results – Part 2: Basic Method for the Determination of Repeatability and Reproducibility of a Standard Measurement Method*; ISO 5725-2:1994, 1994b.

International Organization for Standardization (ISO). *Quantities and Units – Part 1: General*; ISO 80000-1:2009, 2009.

International Organization for Standardization (ISO)/International Electrotechnical Commission (IEC). *Uncertainty of Measurement – Part 3: Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement*; ISO/IEC Guide 98-3:2008, Incl. Suppl. 1:2008/Cor 1:2009, Suppl. 1:2008, Suppl. 2:2011, 2008. (Equivalent to: Joint Committee for Guides in Metrology, 2008: *Evaluation of Measurement Data – Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement*, JCGM 100:2008, Corrected in 2010.)

Kok, C. J. *On the Behaviour of a Few Popular Verification Scores in Yes/No Forecasting*; WR-2000-04; KNMI: De Bilt, Netherlands, 2000.

Linacre, E. *Climate Data and Resources – A Reference and Guide*; Routledge: London, 1992.

Murphy, A. H.; Katz, R. W., Eds. *Probability, Statistics and Decision Making in the Atmospheric Sciences*; Westview Press: Boulder, USA, 1985.

Natrella, M. G. *Experimental Statistics*; National Bureau of Standards Handbook 91; Washington, DC, 1966.

Orlanski, I., 1975: A rational subdivision of scales for atmospheric processes. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 56:527–530.

Preston-Thomas, H. The International Temperature Scale of 1990 (ITS-90). *Metrologia* **1990**, *27* (1) 3–10. https://doi.org/10.1088/0026-1394/27/1/002.

Thompson, A.; Taylor, B. N. *Guide for the Use of the International System of Units (SI)*; NIST Special Publication No. 811; National Institute of Standards and Technology: Gaithersburg, USA, 2008.

Wieringa, J. Representativeness of wind observations at airports. *Bulletin of the American Meteorological Society* **1980**, *61*, 962–971. https://doi.org/10.1175/1520-0477(1980)061<0962:ROWOAA>2.0.CO;2.

Wieringa, J.; Rudel, E. Station Exposure Metadata Needed for Judging and Improving the Quality of Observations of Wind, Temperature and other Parameters. In *Papers Presented at the WMO Technical Conference on Meteorological and Environmental Instruments and Methods of Observation (TECO-2002)* (WMO/TD-No. 1123). WMO: Geneva, 2002.

World Meteorological Organization (WMO). *International Meteorological Tables* (WMO-No. 188). Geneva, 1966.

World Meteorological Organization (WMO). *Performance Requirements of Aerological Instruments: An Assessment Based on Atmospheric Variability* (WMO-No. 267). Geneva, 1970.

World Meteorological Organization (WMO). *Siting and Exposure of Meteorological Instruments* (WMO/TD-No. 589). Geneva, 1993.

World Meteorological Organization (WMO). *Lecture Notes for Training Agricultural Meteorological Personnel* (WMO-No. 551), Second edition. Geneva, 2001.

World Meteorological Organization (WMO). *Guidelines on Climate Metadata and Homogenization* (WMO/TD-No. 1186). Geneva, 2003.

World Meteorological Organization (WMO). *Capacity Assessment of National Meteorological and Hydrological Services in Support of Disaster Risk Reduction*. Geneva, 2008.

World Meteorological Organization (WMO). *Guide to Hydrological Practices : Hydrology – From Measurement to Hydrological Information* (WMO-No. 168), Geneva, 2008.

World Meteorological Organization (WMO). *Guide to Agricultural Meteorological Practices* (WMO-No. 134). Geneva, 2010.

World Meteorological Organization (WMO). *Manual on the Global Data-processing and Forecasting System* (WMO-No. 485). Geneva, 2010.

World Meteorological Organization (WMO). *Guide to Climatological Practices* (WMO-No. 100). Geneva, 2011.

World Meteorological Organization (WMO). *Technical Regulations, Volume I: General Meteorological Standards and Recommended Practices* (WMO-No. 49), Geneva, 2011.

World Meteorological Organization (WMO). *Guide to Meteorological Observing and Information Distribution Systems for Aviation Weather Services* (WMO-No. 731). Geneva, 2014.

World Meteorological Organization (WMO). *Manual on the WMO Integrated Global Observing System* (WMO-No. 1160). Geneva, 2021.

World Meteorological Organization (WMO). *Guide to the WMO Integrated Global Observing System* (WMO-No. 1165). Geneva, 2019.

World Meteorological Organization (WMO)/Intergovernmental Oceanographic Commission of UNESCO (IOC). *Joint WMO/IOC Technical Commission for Oceanography and Marine Meteorology (JCOMM) –Third Session: Abridged final report with resolutions and recommendations* (WMO-No. 1049). Geneva, 2010.

ГЛАВА 2. ИЗМЕРЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ

2.1 ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

2.1.1 Определение

Термодинамическая температура, T, — это физическая величина, характеризующая среднюю энергию хаотического движения молекул вещества. Прямое измерение T с помощью так называемых первичных термометров является экспериментально сложным и даже в национальных институтах измерений проводится лишь периодически. Вместо этого Консультативный комитет по термометрии (ККТ) МБМВ рекомендует использовать МТШ-90 для получения практических приближений к термодинамической температуре (BIPM 1989, 1990)[1]. МТШ-90 обобщает наши знания о первичной термометрии в 1990 году и рекомендует значения точек замерзания, плавления или тройных точек чистых веществ, которые могут быть использованы для калибровки стандартных ПТС (СПТС). В температурном диапазоне, представляющем метеорологический интерес (от -80 °C до 60 °C), МТШ-90 определяет, каким образом изменяется электрическое сопротивление СПТС между этими фиксированными точками температуры. Было показано, что приближенные значения термодинамической температуры, полученные с помощью МТШ-90, имеют погрешность менее ±0,01 °C во всем диапазоне, представляющем интерес с точки зрения метеорологии (Underwood et al., 2017).

Для метеорологических целей измеряют температуру ряда компонентов окружающей среды. Наиболее распространенной измеряемой переменной величиной является температура воздуха (на различных высотах). Также измеряется температура поверхности грунта, подповерхностная температура почвы, минимальная температура воздуха над травяным покровом и температура пресной и морской воды. В публикации WMO (1992) температура воздуха определяется как «температура, измеренная с помощью термометра, установленного на открытом воздухе в месте, защищенном от прямой солнечной радиации». Несмотря на то, что данное определение нельзя использовать для определения термодинамической величины как таковой, оно пригодно для большинства применений.

2.1.2 Единицы измерения и шкалы

Единицей измерения термодинамической температуры T является кельвин (K). Один кельвин определяется как 1/273,16 часть термодинамической температуры тройной точки воды. Таким образом, согласно определению, тройная точка воды возникает при 0,01 °C и парциальном давлении водяного пара точно 611,657 Па; для большинства метеорологических целей используется температура (t) в градусах по Цельсию, определяемая с помощью уравнения 2.1:

$$t/°\mathrm{C} = T/\mathrm{K} - 273{,}15 \qquad (2.1)$$

Часто для калибровки используется равновесие между тающим льдом и насыщенной воздухом водой («точка льда»). При стандартном атмосферном давлении (101,325 кПа) точка льда возникает при температуре 273,150 K (0,000 °C) и изменяется на $-9{,}91 \times 10^{-5}$ K кПа$^{-1}$. Таким образом, изменение составляет менее ±0,001 °C при изменении атмосферного давления с 111 кПа до 92 кПа (Harvey et al., 2013).

Один °C равен одному K. Необходимо отметить, что обозначение K используется без символа, употребляемого для обозначения градусов (°).

---

[1] Авторитетным органом по вопросам, связанным с этой шкалой, является МБМВ; см. http://www.bipm.org. ККТ является исполнительным органом, отвечающим за разработку и осуществление МТШ.

Результаты измерений температуры по термодинамической шкале выражаются по отношению к абсолютному нулю (0 K) — температуре, при которой тепловая энергия молекул любого вещества равна нулю. МТШ-90 дает практическое приближение термодинамической температуры (см. приложение), которая основана на значениях температуры ряда воспроизводимых состояний равновесия (см. таблицу в приложении) и на определенных эталонных приборах, градуированных по этим значениям температуры (Nicholas and White, 1993; Quinn, 1990). Большинство термометров для метеорологических видов применения градуируются путем сопоставления либо с термометром, проградуированным в соответствии с МТШ-90, либо со вторичным стандартом, который, в свою очередь, был откалиброван в соответствии с МТШ-90 (BIPM/CCT, 1990; Nicholas and White, 1993; Bentley, 1998).

2.1.3 Метеорологические требования

2.1.3.1 *Общие сведения*

Для метеорологии требуются в основном следующие измерения температуры:

a) воздуха вблизи поверхности земли;

b) подстилающей поверхности;

c) почвы на различных глубинах;

d) поверхности морей и озер (см. главу 4 тома III настоящего Руководства);

e) верхних слоев атмосферы (см. главу 12 настоящего тома).

Результаты этих измерений, совместных или независимых, локальных или в глобальном масштабе, используются в численных моделях прогноза погоды (ЧПП), для синоптического анализа, для решения гидрологических и сельскохозяйственных задач, а также в качестве показателей изменчивости климата. Локальная температура также оказывает прямое физиологическое влияние на ежедневную деятельность людей на всем земном шаре. Могут потребоваться как непрерывные измерения температуры (регистрация), так и через различные временные интервалы. В этой главе рассматриваются измерения температуры, указанные в пунктах (a), (b) и (c).

2.1.3.2 *Погрешность измерений*

В главе 1 этого тома подробно описаны требования к диапазону, разрешающей способности и погрешности измерений температуры. Метеорологические термометры должны градуироваться в соответствии с лабораторным эталоном, и по мере необходимости в их показания могут вноситься поправки. Необходимо ограничить величину поправок, чтобы остаточная погрешность измерений не превышала установленные пределы. Кроме того, следует выбирать такой рабочий диапазон термометра, который соответствует местному климатическому диапазону изменения температуры.

Все термометры должны быть снабжены либо свидетельством с данными о погрешности измерения или техническими характеристиками, либо свидетельством о поверке, содержащим поправки, которые следует применять для достижения необходимой точности. Первичные, а также плановые испытания и калибровка должны проводиться в лаборатории, аккредитованной по стандарту ИСО/МЭК 17025.

2.1.3.3 *Инерционность*

Для обычных метеорологических наблюдений неудобно использовать термометры, постоянные времени или коэффициенты инерции которых чрезвычайно малы, так как температура воздуха непрерывно меняется, иногда на один-два градуса за несколько секунд. Поэтому для получения репрезентативных значений температуры с помощью такого термометра необходимо взять среднее ряда его показаний. Термометр с большей постоянной времени сглаживает быстрые флуктуации, однако слишком большая постоянная времени может привести к погрешностям при медленных изменениях температуры. Рекомендуется, чтобы постоянная времени — время, необходимое для того, чтобы термометр регистрировал 63,2 % пошагового изменения температуры воздуха, — составляла порядка 20 секунд. При этом постоянная времени термометра уменьшится при быстром воздушном потоке над датчиком.

2.1.3.4 *Регистрация условий, в которых производятся измерения*

Температура является одной из метеорологических величин, точность измерения которой в значительной степени зависит от экспозиции. В частности, при изучении климата необходимо учитывать, что результаты измерения температуры определяются состоянием окружающей среды, наличием растительности, источниками тепла, такими как строения и другие объекты, состоянием подстилающей поверхности, состоянием и изменением радиационной защиты или экрана, а также другими изменениями в оборудовании (WMO, 2011). Важно осуществлять регистрацию не только температурных данных, но и условий, в которых производятся измерения. Такая информация называется метаданными (данными о данных; см. этот том, глава 1, приложение 1.F).

2.1.4 Методы измерений и наблюдений

Излучение солнца, облаков, земли и других окружающих объектов проходит сквозь воздух без какого-либо заметного изменения его температуры, но термометр, установленный на открытом пространстве, может поглощать значительное количество радиации. Вследствие этого собственная температура термометра может отличаться от истинной температуры воздуха. Различие зависит от соотношения между поглощением и излучением радиации и термического контакта с воздухом. Влияние излучения можно минимизировать, используя блестящие термометры, которые отражают, а не поглощают радиацию, и имеют небольшой диаметр, благодаря чему они эффективно охлаждаются воздухом (Çengal and Ghajar, 2014; Incropera and de Witt, 2011; Erell et al., 2005; Harrison, 2015). Для очень тонкой проволоки, используемой в термометре сопротивления без защиты, разность с истинной температурой воздуха может быть очень небольшой или даже пренебрежимо малой. Было установлено (Harrison and Pedder, 2001; Harrison and Rogers, 2006; Harrison, 2010), что нагревание термометра, изготовленного из платиновой проволоки длиной 500 мм и диаметром 0,025 мм, закрепленной на каркасе и открытой непосредственному воздействию солнца, вследствие излучения составляет менее 0,07 °C/100 Вт $м^{-2}$ при скорости ветра более 1 $м \cdot с^{-1}$. Погрешность такого термометра, как правило, будет менее 1 °C при полном солнечном свете. Подобное воздействие было продемонстрировано и для очень тонких термопар (Bugbee et al., 1995).

Однако у обычных рабочих термометров при очень неблагоприятных условиях разность может достигать 25 K. Таким образом, для того чтобы показания термометра как можно точнее отражали истинную температуру воздуха, необходимо защитить его от воздействия радиации; это достигается путем установки термометров в естественно вентилируемой будке либо — в радиационной защите, которая также обычно служит средством крепления термометра (см. 2.5).

Защита также предохраняет термометр от осадков, обеспечивает свободную циркуляцию воздуха вокруг него и предотвращает случайные повреждения термометра. Если на датчик попадают осадки, то датчик будет охлаждаться в результате испарения, а степень охлаждения будет определяться местным воздушным потоком. Это охлаждение

аналогично поведению смоченного термометра в психрометре (см. настоящий том, глава 4). Однако обеспечение свободной циркуляции может быть затруднительным в условиях обледенения. Методы сокращения погрешностей наблюдений в таких условиях могут быть различными и включать использование экранов или приборов для измерения температуры специальной конструкции, включая использование искусственной вентиляции.

Однако при использовании искусственной вентиляции следует соблюдать осторожность, так как на термометр может попасть влага. Во время осадков, мороси и тумана осаждение влаги в сочетании с испарением может приводить к аномальным показаниям. В публикации Sparks (1970) приводится обзор методов измерения температуры, пригодных для оперативного применения. Примером передовой практики размещения термометров являются «трижды дублированные» вентилируемые датчики (Diamond et al., 2013).

2.1.4.1 ***Общие принципы измерений***

Измерения температуры предмета или вещества можно разделить на контактные и бесконтактные.

При контактной термометрии термометр помещается в физический контакт с предметом, и в идеале (при термодинамическом равновесии) он достигает той же температуры, что и предмет, и, таким образом, температуру предмета можно определить по температуре самого термометра. В качестве принципа действия термометра можно использовать любое свойство вещества, зависящее от температуры. Наиболее широко используемыми в метеорологических термометрах свойствами являются изменение электрического сопротивления металлов с температурой и тепловое расширение жидкостей и твердых тел.

В качестве приборов для измерения температуры рекомендуется пользоваться электрическими термометрами. Они уже приобрели большую популярность в метеорологии для измерения температуры и имеют потенциал для автоматических и непрерывных измерений. Чаще всего принципом измерения служит зависимость температуры от электрического сопротивления металла. Термопары редко используются в системах метеорологического наблюдения. В основу их работы положен принцип «эффекта Сибека», который создает напряжение, зависящее от температуры.

Принцип теплового расширения металлов используется в механических термографах с биметаллическими датчиками или датчиками с трубкой Бурдона. Эти приборы используются тогда, когда не так важна точность, но необходимо отслеживать тенденции. Они считаются устаревшими и должны быть заменены на альтернативные варианты, если это возможно.

Большая разность между тепловым расширением жидкостей и стекла используется в жидкостных стеклянных термометрах. На протяжении многих веков для измерения температуры в таких устройствах использовались ртуть или спирт. Стеклянные ртутные термометры, используемые в диапазоне от -30 °C до 50 °C, были широко распространены ранее, но больше не рекомендуются. Учитывая Минаматскую конвенцию о ртути (см. 2.1.4.5), НМГС рекомендуется принять надлежащие меры для скорейшей замены стеклянных ртутных термометров на современные альтернативы.

В бесконтактной термометрии для оценки температуры используется тепловое излучение, испускаемое поверхностью предмета. Обычно это излучение наиболее интенсивно в ИК или микроволновой области электромагнитного спектра. Кроме того, температуру воздуха в области пространства можно измерять без физического контакта путем определения характеристик передачи звуковых, ультразвуковых или электромагнитных волн через воздух (WMO, 2002*a*). Бесконтактные термометры не часто применяются для метеорологических измерений, но могут давать преимущества при некоторых специализированных видах применения.

Значительный объем исследований направлен на разработку бесконтактных методов измерения температуры воздуха. Ультразвуковые анемометры дают параметр под названием «акустическая температура», который может отслеживать колебания температуры воздуха со скоростью до 100 показаний в секунду. Такие быстрые измерения полезны для оценки теплового потока (Schotanus et al., 1983), но их общая точность невысока (Richiardone et al., 2002). Были разработаны и другие акустические и оптические методы (например, Underwood et al., 2017), но они пока не подходят для оперативной метрологии.

Термометры, показывающие текущее значение температуры, часто называют обычными термометрами, а указывающие экстремальные значения температуры за некоторый промежуток времени — максимальными либо минимальными термометрами. Если измерение температуры производится с помощью электрических термометров, максимальная и минимальная температура может быть определена на основе измеренных данных в том случае, если обеспечена непрерывная запись и достаточная частота измерений. Поскольку единственной жидкостью для жидкостных стеклянных максимальных термометров является ртуть, следует использовать электрические альтернативы.

Описание конструкций приборов и лабораторных методов измерения температуры можно найти в различных сборниках (например, Harrison, 2015; Jones, 1992). При рассмотрении методов термометрии, следует учитывать, что для метеорологических задач применимы только специальные технологии в связи с ограничениями, обусловленными характерными особенностями климата или окружающей среды.

2.1.4.2 ***Общие требования к размещению***

2.1.4.2.1 **Измерение температуры воздуха**

Для получения репрезентативных результатов при сравнении показаний термометра в различных местах и в разное время также крайне необходимо стандартное расположение будки и самого термометра. При проведении обычных метеорологических наблюдений измеряемая температура должна отражать условия ненарушенного потока воздуха на высоте между 1,25 и 2 м над уровнем земли на возможно большей площади, окружающей станцию. В целях обеспечения сопоставимости измерения должны проводиться над естественной поверхностью земли, предпочтительно над травяным покровом. Высота над уровнем земли указывается потому, что в более низких слоях атмосферы могут существовать значительные вертикальные градиенты температуры, что может повлиять на измерение температуры. Следовательно, наиболее подходящее место для проведения измерений находится над уровнем земли. Оно должно быть открыто воздействию солнца и ветра и не заслоняться деревьями, зданиями и другими препятствиями. Места на крутом склоне или в низине подвержены воздействию нетипичных условий, и их следует избегать. В больших и малых городах местные особенности более ярко выражены, чем в сельских районах. Данные наблюдений за температурой на крышах зданий имеют сомнительную точность и ценность вследствие наличия переменного вертикального градиента температуры и влияния самого здания на распределение температуры.

Классификация выбора места для наземных станций приземных наблюдений (см. настоящий том, глава 1, приложение 1.D) предоставляет дополнительное методологическое руководство по выбору места и расположению термометра в этом месте для обеспечения оптимальной репрезентативности.

2.1.4.2.2 **Измерение температуры почвы**

Температура почвы измеряется на следующих стандартных глубинах: 5, 10, 20, 50 и 100 см ниже поверхности; кроме перечисленных, можно устанавливать термометры и на других глубинах (например, 2 см). Такие измерения должны проводиться на ровном участке оголенной земли (размером примерно 2 м x 2 м), являющимся типичным для

почвы, по которой необходима информация. Если земля покрыта снегом, желательно производить также измерения температуры снежного покрова. Там, где снег неплотный, его можно удалить перед снятием показаний, а затем вернуть на место.

При описании места для измерения температуры почвы следует указать тип почвы, почвенный покров, а также степень и направление уклона поверхности земли. По возможности необходимо указывать физические постоянные почвы, такие, как объемная плотность, удельная теплопроводность и полевая влагоемкость. Следует также указывать уровень грунтовых вод (при залегании в пределах 5 м от поверхности) и структуру почвы. Это важно для оценки потока тепла в почве при ЧПП.

На агрометеорологических станциях желательно вести непрерывную запись температуры почвы, а также температуры воздуха на различных уровнях приземного слоя (от уровня земли до примерно 10 м над верхней границей преобладающей растительности).

2.1.4.2.3 **Измерение минимальных температур (травостой или оголенная почва)**

Минимальная температура воздуха в травостое является самой низкой температурой, которой достигает за ночь термометр, установленный под открытым небом непосредственно над низкой травой. Минимальная температура воздуха в травостое должна измеряться на высоте 5 см над травой или поверхностью, характерной для данной местности.

Если ведутся наблюдения минимальной температуры почвы, лишенной растительности, эти измерения следует проводить на 5 см выше естественного уровня оголенной почвы.

Если земля покрыта снегом, термометр следует устанавливать над поверхностью снега — как можно ближе к поверхности снега, но так, чтобы он не касался ее. На станциях с устойчивым снежным покровом различной высоты можно использовать подставки, позволяющие поднимать или опускать термометры с целью установки их на правильной высоте над поверхностью снега.

2.1.4.3 ***Источники погрешностей — общие замечания***

Погрешности при измерении температуры могут быть вызваны следующими причинами:

a) прямое и косвенное излучение от различных источников, например, солнца, облаков, почвы и окружающих предметов и озер;

b) погрешность чувствительного элемента, прибора и для электрических измерений, выполненных другими техническими устройствами в цепочке данных;

c) недостаточная вентиляция термометрической будки (скорость ветра менее 1 $м \cdot с^{-1}$), особенно в условиях высокой солнечной радиации;

d) психрометрическое охлаждение из-за влажных поверхностей термометрической будки и/или датчика;

e) загрязнение датчика, например, грязью, брызгами морской воды;

f) неправильная эксплуатация, например, пренебрежение необходимостью достижения устойчивого равновесия или ошибки считывания показаний наблюдателем.

Постоянная времени датчика, время усреднения выходного результата и потребности в данных должны быть взаимно согласованными.

Восприимчивость различных типов температурных датчиков к каждому из вышеперечисленных факторов различается, так же, как и значимость этих факторов; эти особенности рассматриваются далее в соответствующих разделах этой главы.

Ввиду высокой значимости погрешностей, связанных с излучением, для температурных измерений, в следующих параграфах они рассматриваются более подробно.

Погрешности, связанные с излучением, возникают из-за прямого нагрева термометра электромагнитным излучением (ЭМИ), которое свободно проходит через воздух. Эффект нагрева возникает как в результате прямого облучения — из-за видимого света, проникающего в будку термометра, — так и в результате теплового излучения из-за разности температур между термометром и окружающей его средой. Поглощение излучения в этих двух диапазонах определяет величину радиационной «нагрузки» на датчик. Нагрузка определяется интенсивностью излучения в каждом диапазоне и излучательной способностью поверхности датчика, которая обычно меняется в зависимости от длины волны излучения. Тем не менее, тепловая нагрузка всегда минимизируется за счет полированной (то есть блестящей) поверхности с низкой излучающей способностью.

Измерение температуры воздуха с помощью контактных датчиков особенно чувствительно к радиационной нагрузке из-за слабого теплового контакта между датчиками и воздухом, особенно при медленном движении воздуха. Тепловой поток между термометром и воздухом характеризуется коэффициентом теплопередачи *h* (Çengal and Ghajar, 2014; Incropera and de Witt, 2011), который зависит от скорости воздуха, проходящего рядом с термометром, и диаметра термометра. Для многих термометров цилиндрической или сферической формы перенос тепла выражается как квадратный корень скорости воздуха рядом с термометром и обратно пропорционален квадратному корню диаметра термометра (Ney et al., 1960; Erell et al., 2005; Harrison, 2015). Таким образом, при любой скорости воздуха погрешность, связанная с излучаемой тепловой нагрузкой, уменьшится в два раза, если диаметр датчика уменьшить в четыре раза.

Сила радиационной связи между термометром и окружающей средой нередко занижается. Для цилиндрических датчиков с корпусом из нержавеющей стали будка, которая на 3 °C теплее воздуха, при скорости ветра 0,1 м·с$^{-1}$ даст погрешность ~0,5 °C для датчика диаметром 6 мм, но только ~0,2 °C для датчика диаметром 1 мм.

2.1.4.4 *Уход за приборами — общие положения*

Рассмотрим следующие процедуры по техническому обслуживанию приборов:

a) датчики и их защитные оболочки должны содержаться в чистоте для уменьшения погрешности, связанной с излучением;

b) если используются будки с искусственной вентиляцией, необходимо регулярно проверять состояние вентилятора, вручную или, предпочтительно, автоматически;

c) все датчики температуры и, если применимо, электрические интерфейсы необходимо регулярно калибровать. В промежутках между калибровкой следует проводить проверки в полевых условиях;

d) при использовании аналого-цифровых преобразователей (АЦП) их следует регулярно проверять с помощью омического сопротивления, чтобы определить, соответствуют ли они по-прежнему требованиям.

Подробные требования к обслуживанию различных типов описываемых в настоящей главе термометров приводятся в соответствующих разделах.

2.1.4.5 *Последствия Минаматской конвенции с точки зрения измерения температуры*

Минаматская конвенция ЮНЕП о ртути вступила в силу во всем мире в августе 2017 года и запрещает любое производство, импорт и экспорт стеклянных ртутных термометров (см. настоящий том, глава 1, 1.4.1). В связи с этим больше не рекомендуется применять стеклянные ртутные термометры, и настоятельно поощряются надлежащие меры для их скорейшей замены на современные альтернативы. Электрические термометры сопротивления представляют собой экономичную, точную и надежную альтернативу своим опасным ртутным предшественникам и обеспечивают значительные преимущества в плане хранения данных и отображения информации в режиме реального времени.

2.2 ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ТЕРМОМЕТРЫ

2.2.1 Общее описание

Электрические приборы приобретают все большую популярность в метеорологии при измерении температуры. Основное их достоинство заключается в том, что выходной сигнал можно использовать в дистанционной индикации, записи, хранении и передаче данных температуры. Наиболее часто используются такие чувствительные элементы, как ПТС, но также применяются полупроводниковые термометры (термисторы) и термопары.

2.2.1.1 *Металлические термометры сопротивления*

Во всем метеорологическом диапазоне температур от -80 °C до 60 °C электрическое сопротивление большинства чистых металлов является почти линейной функцией температуры. Хотя в термометрии могли бы применяться многие чистые металлы, чаще всего для электрических термометров сопротивления используется платина из-за ее исключительной устойчивости к коррозии. Сверхчистая платина без напряжений используется для так называемых ЭПТС, которые применяются для интерполяции между фиксированными точками при реализации МТШ-90 в эталонных лабораториях. Однако эти термометры слишком хрупкие, чтобы применять их в полевых условиях.

Наиболее распространенный формат ПТС называется Pt100, поскольку датчики разработаны так, что их сопротивление R_0 близко к 100 Ом при 0 °C. В этих датчиках используется чуть менее чистая платина, и они гораздо более надежны, чем ЭПТС. Как правило, датчики состоят из платиновой проволоки, обмотанной вокруг керамического сердечника, и помещены внутрь корпуса из керамики, стекла или нержавеющей стали (рис. 2.1 a)). В качестве альтернативы, тонкие платиновые пленки наносятся в виде лабиринта на керамическую подложку, а затем, как правило, помещаются в корпус из нержавеющей стали (рис. 2.1 b)).



Рисунок 2.1. a) ПТС с проволочной намоткой; b) тонкопленочный ПТС

В диапазоне от -80 °C до 60 °C электрическое сопротивление ПТС может быть представлено уравнением Каллендара — Ван Дьюзена:

$$R = R_0\left(1 + At + Bt^2 + C\left(t - 100\right)t^3\right) \tag{2.2}$$

где t – температура в °C.

Датчики Pt100 обычно характеризуются допуском, в пределах которого они соответствуют стандартам, таким как МЭК 60751 (DIN EN 60751) или ACTM E1137. Для термометра, близко соответствующего спецификации МЭК 60751, коэффициенты Каллендара — Ван Дьюзена составляют R_0 = 100 Ом, A = 3,908 x 10^{-3}·°C^{-1} и B = -5,80 x 10^{-7}·°C^{-2}, а коэффициент C принимает различные значения выше и ниже 0 °C. Ниже 0 °C его значение составляет C = 4,27 x 10^{-12}·°C^{-4}, а выше 0 °C C в точности равен нулю.

Сопротивление и чувствительность датчика Pt100 по стандарту МЭК показаны на рисунке 2.2.

Чувствительность термометров Pt100 описывает изменение сопротивления при изменении температуры и обычно задается значением (альфа), определяемым следующим образом:

$$\alpha = \frac{R_{100} - R_0}{100°C * R_0} \tag{2.3}$$

Чувствительность (рис. 2.2 b)) практически не зависит от температуры и составляет 0,3952 Ом·°C^{-1} при -40 °C, 0,3909 Ом·°C^{-1} при 0 °C и 0,3863 Ом·°C^{-1} при 40 °C, что составляет всего 2,3 % в диапазоне 80 K. Для термометров, соответствующих стандарту МЭК 60751, это значение близко к 3850 x 10^{-6}·°C^{-1}.

Классы допуска МЭК 60751 или ACTM E1137 приведены в таблице 2.1 и изображены на рисунке 2.3. Также выпускаются датчики с меньшим допуском, который обычно указывается в виде доли одного из стандартов, приведенных в таблице 2.1.

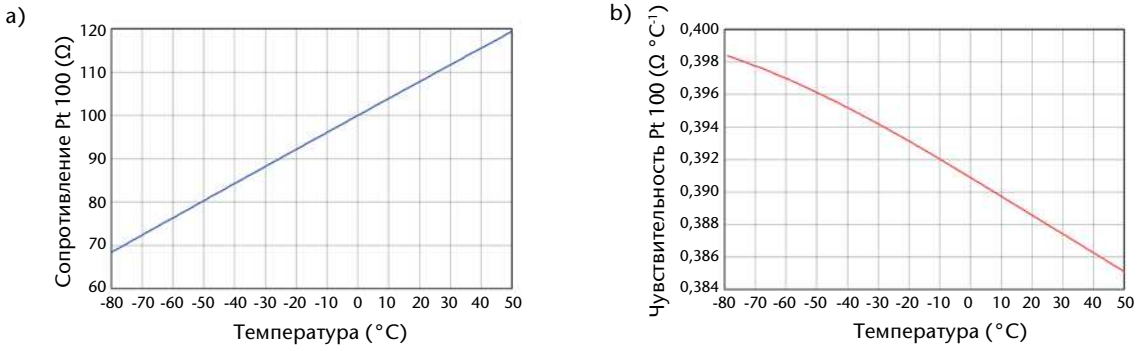


Рисунок 2.2. a) Сопротивление в зависимости от температуры для датчика Pt 100, соответствующего стандарту МЭК 60751; b) чувствительность в зависимости от температуры для датчика Pt 100, соответствующего стандарту МЭК 60751

Таблица 2.1. Классы допуска по МЭК 60751 или ACTM E1137.

МЭК 60751 (2008 г.)		*ACTM E1137*	
Класс допуска	Определение	Класс точности	Определение
F0,3 (старый класс B)	±(0,3 + 0,005 |*t*|)	B	±(0,25 + 0,0042 |*t*|)
F0,15 (старый класс A)	±(0,15 + 0,002 |*t*|)	A	±(0,13 + 0,0017 |*t*|)
Примечание: в спецификации МЭК символ F обозначает тонкопленочный датчик и заменен на символ W, который обозначает датчик с проволочной обмоткой. |*t*| обозначает абсолютное значение температуры в градусах Цельсия.			

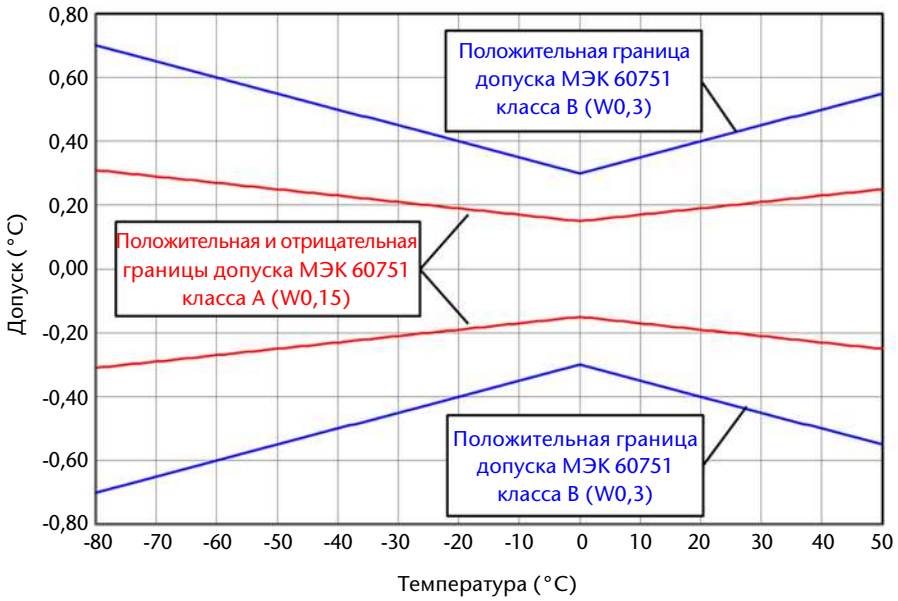


Рисунок 2.3. Диапазоны допусков для датчика Pt100, соответствующего стандарту МЭК 60751.

Например, МЭК 60751 для датчика W0,3 (старый класс B) описывает датчик с проволочной обмоткой, который соответствует кривой МЭК 60751 в пределах ±(0,3 + 0,005t) °C, и при температуре 20 °C датчик класса B будет гарантированно находиться в пределах 0,400 °C от кривой МЭК.

Уравнение Каллендара — Ван Дьюзена (уравнение 2.2) не имеет простого обратного уравнения, в котором температура была бы выражена как функция сопротивления, $t(R)$. Есть два решения этой проблемы. Во-первых, для температур выше -40 °C член C в уравнении 2.2 соответствует менее чем 0,01 °C и во многих видах практического применения им можно разумно пренебречь. В этом случае уравнение Каллендара — Ван Дьюзена может быть аппроксимировано следующим образом:

$$R = R_0\left(1 + At + Bt^2\right) \tag{2.4}$$

Более того, его обратная величина может быть вычислена с помощью стандартных квадратичных формул:

$$t = -\frac{A}{2B} + \frac{A}{2B}\sqrt{1 - \frac{4B}{A^2}\left(1 - \frac{R}{R_0}\right)} \tag{2.5}$$

Погрешность при использовании этой формулы по-прежнему составляет менее 0,1 °C при -80 °C. В качестве альтернативы уравнение 2.4 можно использовать для получения начальной оценки температуры, которая затем итеративно уточняется путем повторного использования прямого уравнения для R.

Перед калибровкой для установки в метеорологических условиях датчики Pt100 обычно «состариваются» (производителями) путем циклического изменения температуры в пределах от точки замерзания до 20 °C. Смысл этой процедуры в том, чтобы выявить любые дефекты производства до установки датчика и снять напряжение с проводов, которые впоследствии будут работать в полевых условиях.

2.2.1.2 *Термисторы*

Другим типом термометра сопротивления, который имеет широкое использование, является термистор. Хотя существуют термисторы с положительными температурными коэффициентами сопротивления, у наиболее распространенной и удобной формы

большие отрицательные коэффициенты сопротивления. Состав термисторов представляет собой коммерческую тайну, но обычно они изготавливаются из порошкообразных окисей металлов в виде небольших дисков, брусков или шариков и часто имеют стеклянное покрытие для предотвращения химических реакций с воздухом, особенно с влажным.

Зависимость сопротивления R термистора от температуры качественно можно описать следующим образом:

$$R = R_0 \exp\left(-\beta\left[\frac{1}{T_0} - \frac{1}{T}\right]\right) \tag{2.6}$$

где R_0 — сопротивление термистора при абсолютной температуре T_0 (в кельвинах), а T — температура термистора в кельвинах. Термисторы обычно обозначаются по значению R_0 при температуре 25 °C, то есть T_0 = 25 + 273,15 = 298,15 K, которая указывается в кельвинах. Типичные значения составляют $R_0 \approx 1$ кОм и $\beta \approx 4000$ K (например, см. рис. 2.4).

Есть три ключевых отличия в поведении термисторов по сравнению с датчиками Pt100.

Во-первых, это высокое сопротивление термисторов, часто достаточно высокое, чтобы можно было пренебречь сопротивлением соединительных проводов. Это практически никогда не относится к датчикам Pt100, для которых всегда необходимо проводить измерения с помощью четырех проводов.

Второе отличие состоит в высокой чувствительности по сравнению с датчиками Pt100. Хотя это является преимуществом при любой конкретной температуре, тот факт, что чувствительность изменяется с температурой, представляет собой трудности и приводит к нелинейному поведению, а весьма высокий динамический диапазон датчиков также создает проблемы при обработке сигнала.

Наконец, датчики могут быть очень маленькими, поэтому они могут иметь малую постоянную времени и высокие коэффициенты теплопередачи (Erell et al., 2005). Однако у очень маленьких термисторов имеется недостаток, который заключается в более высоком

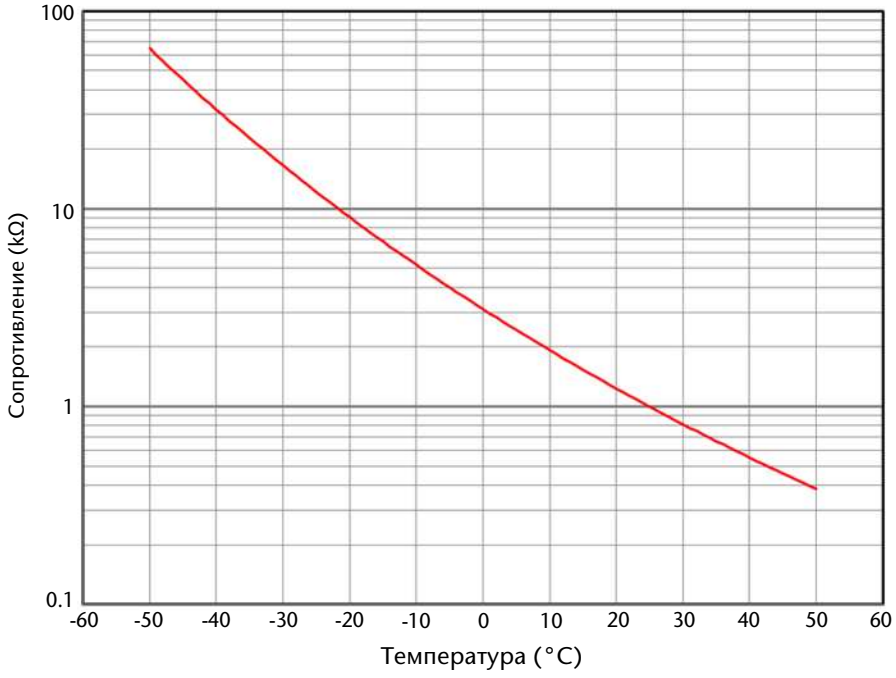


Рисунок 2.4. Зависимость сопротивления от температуры для термистора с R_0 = 1 кОм и 3700 K. (Обратите внимание, что вертикальная ось логарифмическая.)

эффекте самонагревания при заданной энергии диссипации, чем у более крупных термометров. Таким образом, необходимо принимать меры для того, чтобы поддерживать энергию диссипации на низком уровне.

Следует отметить, что хотя уравнение 2.6 описывает общее поведение термисторов и полезно для интерполяции на небольших интервалах температур, оно недостаточно точно, чтобы использовать его для метеорологических целей. Несколько выражений общего вида:

$$R = R_0 \exp\left(A + \frac{B}{T} + \frac{C}{T^2} + \frac{D}{T^3}\right) \tag{2.7}$$

обычно используются для более точного описания поведения термисторов, чем уравнение 2.6. Частный случай уравнения 2.7, когда коэффициент C равен нулю, известен как уравнение Стейнхарта — Харта. Для каждого датчика путем калибровки должны быть определены коэффициенты R_0, A, B, C (если используются) и D. Эквивалентным обратным выражением для температуры является следующее:

$$T = \left(A' + B' \ln\left(\frac{R}{R_0}\right) + C' \ln\left(\frac{R}{R_0}\right)^2 + D' \ln\left(\frac{R}{R_0}\right)^3\right)^{-1} \tag{2.8}$$

где параметры A', B', C' и D' полностью отличаются от параметров A, B, C и D в уравнении 2.7. Необходимо помнить, что в обоих уравнениях 2.7 и 2.8 температура T должна быть выражена в кельвинах.

В общем случае обратная формула не так точна, как прямая, и если для расчета температуры используется компьютер, то часто целесообразно повторять прямую формулу (уравнение 2.7), чтобы получить правильный результат. Было разработано множество итерационных схем, которые были оптимизированы для точности и скорости, а ниже изложен типичный подход. Согласно этой процедуре, сначала предполагается, что правильная температура находится в средней точке диапазона калибровки, и сопротивление, соответствующее этому предположению, рассчитывается с помощью уравнения 2.7.

Если это сопротивление больше измеренного, то делается новое предположение о температуре в верхней половине диапазона калибровки.

Если это сопротивление меньше измеренного, то делается новое предположение о температуре в нижней половине диапазона калибровки.

Исходя из второго предположения о температуре рассчитывается новое значение сопротивления, и в зависимости от величины этого сопротивления по сравнению с измеренным сопротивлением делается третье предположение о температуре. Для прекращения процесса итерации должны быть выполнены критерии итерации. Таким образом, температура может быть определена по измеренному сопротивлению с использованием только прямой формулы 2.7.

2.2.1.3 ***Термопары***

Эффект Зеебека описывает явление, при котором градиент температуры в металле приводит к появлению сопутствующего электрического поля. Величина сопутствующего электрического поля всегда пропорциональна градиенту температуры, но зависит от коэффициента Зеебека, обусловленного материалом и температурой (Nicholas and White, 1993; Bentley, 1998). Так, проволока из чистого материала в градиенте температуры самопроизвольно приобретает напряжение на концах, величина которого равна интегральному напряжению Зеебека вдоль проволоки.

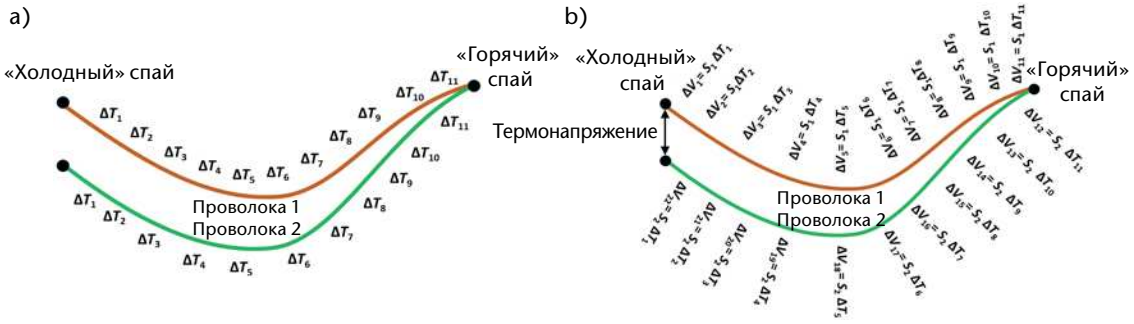


Рисунок 2.5. При градиенте температуры (a) напряжение генерируется (b) по всей длине обоих проводов.

Термопара (рис. 2.5) изготавливается из двух проводов из разных материалов с разными коэффициентами Зеебека, соединенных на одном конце — так называемом «горячем спае». Обычно открытые концы спаев подключаются к клеммам вольтметра высокого разрешения.

Термонапряжение термопары генерируется непрерывно по всей длине проводов. Можно считать, что каждый провод в термопаре испытывает последовательность небольших изменений температуры, ΔT_i (рис. 2.5 a)). При каждой небольшой разности температур ΔT_i возникает напряжение ΔV_i пропорциональное ΔT_i и коэффициенту Зеебека, S, обусловленному материалом и температурой (рис. 2.5 b)). Термонапряжение, измеренное на открытых концах термопар, пропорционально разности температур между открытыми концами проволоки и спаем термопары, даже если на спае не генерируется напряжение. Обратите внимание, что термины «горячий» и «холодный» спай совершенно условны, так как термопары могут измерять температуру даже тогда, когда «горячий спай» холоднее «холодного спая».

Важно подчеркнуть, что термонапряжение генерируется по всей длине проводов термопары и что напряжение не генерируется на самом спае — там, где измеряется температура. Спай термопары просто соединяет два провода термопары вместе и может быть получен путем сварки или спайки двух проволок. Необходимо только создать достаточно прочное электрическое соединение между проволоками.

Провода термопары можно провести очень узко, а спаи сделать очень маленькими, что обеспечивает три потенциальных преимущества. Во-первых, можно изготовить термопары, время отклика которых в воздухе будет значительно меньше одной секунды. Во-вторых, малый размер также улучшает теплообмен с воздухом, что приводит к меньшим погрешностям при облучении термопары (Bugbee et al., 1996). Наконец, снижается эффект теплопроводности вдоль проводов термопары.

Термопары изготавливаются либо из «простых металлов» (обычно сплавы меди или никеля), либо из «благородных металлов» (обычно сплавы платины, родия или золота). В метеорологических применениях использование термопар из благородных металлов не дает преимуществ. Термопары обычно приобретаются в виде готового изделия с двумя проводами, предварительно выбранными из стандартных комбинаций сплавов, которые имеют буквенное обозначение.

В метеорологических применениях наиболее часто используются следующие типы по классификации МЭК 60584-1:2013:

– тип K: изготавливается из двух никелевых сплавов — хромеля и алюмеля;

– тип J: изготавливается из железа и константана (медно-никелевый сплав);

– тип T: изготавливается из меди и константана.

В метеорологическом диапазоне температур использование того или другого типа не дает особых преимуществ. Тип K является наиболее распространенным, и при температуре 20 °C он производит сигнал приблизительно 40 мкВ $°C^{-1}$. Тип J имеет чуть более высокую чувствительность (приблизительно 50 мкВ $°C^{-1}$), но часть из чистого железа потенциально подвержена коррозии при длительном воздействии. Тип T имеет такую же чувствительность, как и тип K, но медная проволока имеет высокую теплопроводность, что может привести к ошибкам при некоторых обстоятельствах.

Таблицы зависимости термонапряжения от температуры для стандартных типов термопар можно получить у производителей и в органах по стандартизации.

2.2.2 Порядок проведения измерений

2.2.2.1 *Электрические термометры сопротивления*

Электрические термометры сопротивления могут подключаться к различным электрическим измерительным цепям. Исторически сложилось так, что многие варианты мостовых схем для измерения сопротивления использовались как в равновесном, так и в неравновесном виде. В таких схемах одно измерение напряжения или тока позволяет сравнить неизвестное сопротивление термометра с известными эталонными резисторами, не зависящими от температуры.

Отличное разрешение и линейность современных АЦП, а также измерительный компонент в вольтметрах и мультиметрах позволяют использовать альтернативные подходы. Неизвестное сопротивление термометра оценивается по результатам двух измерений; измерение тока, протекающего через датчик температуры; и измерение напряжения на датчике температуры. Это позволяет измерять сопротивление около 100 Ом с погрешностью всего в несколько мОм.

Необходимо также учитывать сопротивление проводов, соединяющих датчик с АЦП. Обычно электрическое сопротивление таких проводов составляет несколько десятых долей ома на метр. Для датчика Pt100 дополнительное сопротивление в 0,39 Ом эквивалентно ошибке в 1 °C. Поэтому для датчиков Pt100 необходимо проводить измерения с помощью четырехпроводной конфигурации, в которой дополнительная пара проводов определяет напряжение (рис. 2.6).

Погрешность термистора, обусловленная соединительными проводами, сильно колеблется в зависимости от температуры, но, как правило, она гораздо менее значительна, чем для датчиков Pt100. Для датчика с R_0 = 1 кОм и температурой β= 3700 K, показанного на рис. 2.4, при -20 °C сопротивление датчика составляет 9,08 кОм, а чувствительность -542 Ом $°C^{-1}$, т.е. изменение составляет 6,0 % $°C^{-1}$, в то время как при 20 °C сопротивление датчика составляет 1,24 кОм, а чувствительность -55 Ом $°C^{-1}$, т.е. изменение составляет 4,4 % $°C^{-1}$. Таким образом, при -20 °C дополнительное сопротивление 0,39 Ом эквивалентно погрешности в 0,0007 °C, а при 20 °C — погрешности в 0,007 °C, что во многих случаях можно считать незначительным.



Рисунок 2.6. Четырехпроводная схема для считывания показаний датчика Pt100

Чтобы сохранить преимущества термисторов, такие как быстрый отклик и высокий коэффициент теплопередачи, но избежать недостатков высокого динамического диапазона и меняющейся чувствительности, термисторы часто используются в схемах «линеаризации». Существует большое количество таких схем, но самая простая из них состоит из параллельного постоянного резистора (White, 2015, 2017).

2.2.2.2 *Термопары*

Исторически термопары использовались в самых различных конфигурациях, в которых открытые концы термопары — так называемый «холодный спай» — нужно было погружать в тающий лед (рис. 2.7 a)). Затем температура горячего спая вычислялась из стандартных таблиц для пары металлов, используемых в термопаре. На практике поддерживать точку замерзания неудобно, и сейчас это делается крайне редко.

Вместо этого измерения соотносятся с температурой клемм цифрового вольтметра. В этом методе, который называется компенсацией холодного спая, необходимо измерять температуру клемм вольтметра с помощью термистора или ПТС (рис. 2.7 b)). Затем рассчитывается дополнительное ожидаемое напряжение термопары при использовании точки замерзания, которое добавляется к измеренному напряжению. Затем эта сумма используется для определения температуры с помощью интерполяции стандартных таблиц. При использовании компенсации холодного спая необходимо соблюдать особую осторожность вблизи стыков вольтметра, где небольшая разность температур между клеммами может вызывать паразитные напряжения.

Обычно покупная термопара имеет недостаточную длину для подключения к вольтметру в изолированном от воздействия окружающей среды корпусе, и для этого нужен так называемый «удлинительный кабель». Как отмечалось выше, термонапряжение генерируется по всей длине термопары, включая любой удлинительный кабель. Поскольку температурные градиенты в кабеле нередко выше всего вблизи огороженного пространства, где находится оборудование для сбора данных, термонапряжения, генерируемые в удлинительном кабеле, настолько же существенны, что и термонапряжения, генерируемые вблизи горячего спая термопары. По этой причине термопары обычно не выбирают для обычного метеорологического использования.

В метеорологии термопары используются для термометрии в двух особых случаях. Во-первых, они используются тогда, когда для особых исследовательских задач необходим термометр с малой массой и очень малой постоянной времени (см., например, Bugbee et al., 1996). Во-вторых, они применяются для измерения небольших разностей температур; для этого термопара подключается встречно как две термопары (рис. 2.8 a)). В такой конфигурации измеряемое напряжение чувствительно только к разности температур двух спаев. «Термоэлектрическая батарея» представляет собой модификацию

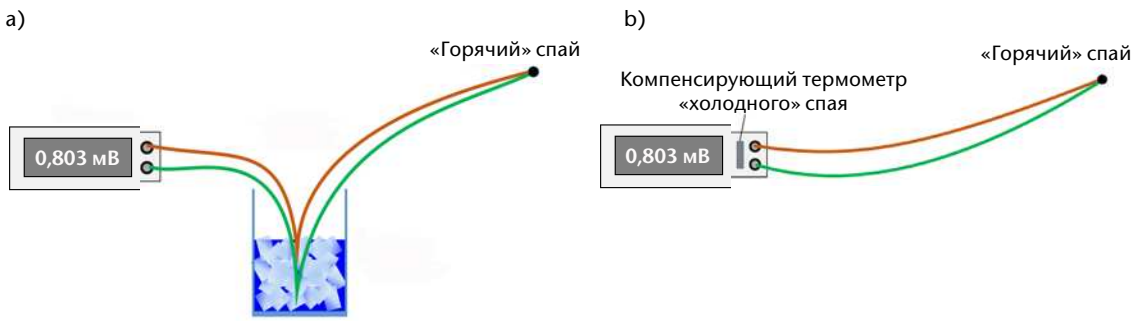


Рисунок 2.7. Схемы для считывания показаний термопары: a) одно из нескольких традиционных приспособлений, в котором холодный спай погружается в тающий лед; b) современный вариант, в котором термистор или термометр Pt100 измеряет температуру «холодного спая».

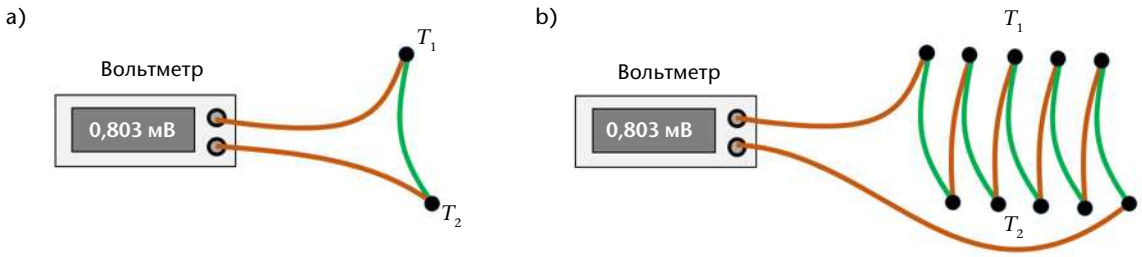


Рисунок 2.8. Использование термопары в дифференциальном режиме: a) дифференциал между двумя спаями; b) термоэлектрическая батарея

дифференциальной термопары (рис. 2.8 b)) и состоит из большого количества дифференциальных термопар, соединенных последовательно. Выходное напряжение от термобатареи из N спаев в N раз превышает выходное напряжение от одной термопары, а для 10 спаев оно может приближаться к 400 мкВ·°C^{-1}. Это позволяет с высоким разрешением определять очень малые разности температур, например, такие, которые возникают в пиранометре.

2.2.3 Размещение и установка

Общие требования к размещению и установке термометров описаны в разделе 2.1.4.2. Дополнительные требования включают следующее:

a) измерение экстремальных температур: если электрический термометр соединить с непрерывно действующей системой записи данных, то максимальные и минимальные термометры больше не потребуются;

b) измерение приземных температур (минимальный термометр для измерения температуры оголенной почвы или травостоя): по своим радиационным свойствам электрические термометры отличаются от жидкостных стеклянных термометров. Электрические термометры, установленные для измерения минимальной температуры воздуха в травостое (или на другой поверхности), будут записывать значения температур, отличные от показаний, установленных таким же образом обычных термометров. Эти различия можно свести к минимуму посредством установки электрического термометра в стеклянной защитной оправе того же диаметра, что и заменяемые термометры;

c) измерение температуры почвы: электрические термометры помещаются в латунные оправы и погружаются на необходимую глубину в ненарушенный вертикальный слой почвы, полученный в результате проходки открытым способом. Электрические соединения помещают в пластиковые трубки, проходящие в шурфе, который затем заполняют таким образом, чтобы по возможности восстановить первоначальный слой почвы и ее дренажные характеристики.

2.2.4 Источники ошибки

2.2.4.1 *Электрические термометры сопротивления*

Основными источниками погрешностей при измерении температуры электрическими термометрами сопротивления являются:

a) самонагревание элемента термометра;

b) неадекватная компенсация сопротивления выводов;

c) неадекватная компенсация нелинейности датчика или обрабатывающего прибора;

d) резкие изменения контактного сопротивления при переключении.

Самонагревание происходит вследствие того, что при прохождении тока через элемент сопротивления он нагревается и, следовательно, температура элемента термометра становится выше, чем температура окружающей среды. При токе в 1 мА (10 мА) в датчике Pt100 нагрев составляет приблизительно 0,1 мВт (10 мВт). Для датчика диаметром 6 мм и длиной 30 мм при скорости ветра 1 $м \cdot с^{-1}$ коэффициент теплопередачи составит приблизительно 40 $Втм^{-2} \cdot K^{-1}$, а результирующий нагрев датчика составит от 0,004 K до 0,4 K.

Сопротивление соединительных проводов вносит погрешность в показания термометра. Эта погрешность становится более значительной при длинных проводах, например, когда термометры сопротивления расположены на некотором расстоянии от измерительного прибора; различные погрешности возникают также при изменении температуры кабеля. Для уменьшения погрешностей настоятельно рекомендуется использовать измерения с помощью четырехпроводных термометров Pt100.

Ни электрический термометр сопротивления, ни термистор не отвечают требованиям линейности во расширенном диапазоне измеряемых температур. Если для электрических термометров сопротивления выходной сигнал можно считать приближенно линейным для ограниченного диапазона, то для термисторов необходимо предусмотреть соответствующую компенсацию таких нелинейностей (White, 2016).

По мере старения переключателей могут возникнуть резкие изменения контактного сопротивления при переключении. Изменения могут варьировать и могут остаться незамеченными, если не проводить регулярные поверки системы (см. раздел 2.2.5).

2.2.4.2 *Термопары*

Основная неопределенность, возникающая при использовании термопар, связана с распределенным характером генерации термонапряжения. Как показано на рисунке 2.5, измеряемое напряжение генерируется по всей длине термопары вместе с ее удлинительными проводами. Для этого состав сплава тонких проволок должен быть крайне однородным. Кроме того, затем термопару необходимо откалибровать с учетом температурных градиентов, которым она будет подвергаться в процессе эксплуатации.

Кроме того, вторичное измерение температуры, используемое для компенсации холодного спая, вносит неизвестную погрешность, основанную на окружающей среде АЦП в вольтметре или системе сбора данных.

Для метеорологических установок нецелесообразно проводить надлежащую калибровку, а эффективность компенсации холодного спая нельзя оценить без дополнительной информации. По этим причинам не рекомендуется применять термопары для в стандартных метеорологических применениях.

2.2.5 Сравнение и калибровка

2.2.5.1 *Электрические термометры сопротивления*

Необходимо регулярно проводить калибровку термометров в лабораторных условиях в поверочных лабораториях, имеющих аккредитацию ИСО/МЭК 17025. Термометры следует сравнивать с эталонными термометрами, что обычно осуществляется в перемешиваемой жидкой ванне, камере искусственного климата или сухоблочном калибраторе в необходимом диапазоне температур. Дополнительная информация приводится в 2.6.

Поскольку измерительный прибор является составной частью электрического термометра, то его градуировку необходимо проверить, заменив термометр

сопротивления прецизионным откалиброванным эталоном сопротивлений и устанавливая сопротивления, эквивалентные приращениям температуры (например, 10 K) в пределах рабочего диапазона температуры. Погрешность в любой точке не должна превышать 0,1 K. Обычно эта работа выполняется специалистом технической службы.

2.2.5.2 *Термопары*

Для калибровки и проверки термопар необходимо поддерживать горячие и холодные спаи при точно известных температурах и изменять градиент между этими температурами для оценки неоднородности коэффициента Зеебека. Способы и средства измерения, необходимые для проведения этой работы, очень специфичны и здесь не приводятся (Bentley, 1998; Nicholas and White, 1993; ASTM, 1993).

2.2.6 **Поправки**

При изготовлении электрические термометры должны сопровождаться одним из следующих документов:

a) паспорт с указанием даты, подтверждающий соответствие определенному стандарту;

b) свидетельство о поверке с указанием даты поверки и значений фактического сопротивления или температуры (с использованием стандартных параметров Каллендара — Ван Дьюзена МЭК) в реперных точках диапазона температур. Эти значения сопротивления/температур должны использоваться для проверки погрешности измерительного прибора или интерфейса системы до и во время работы. Значение отклонения сопротивления от номинального обычно не должно превышать эквивалентную ему температурную погрешность 0,1-0,2 K.

После каждой калибровки для датчика Pt100 будет сформирована таблица значений сопротивления, R_i, при заданных температурах T_i. Эти значения можно использовать для составления таблицы поправок (ΔR_i или ΔT_i) для использования с термометром. На основе этих данных калибровки можно проверять соответствие конкретному стандарту (например, МЭК 60751), классу или диапазону допусков. Однако, чтобы правильно оценить соответствие в пределах диапазона допуска, пользователи должны дополнительно учитывать влияние погрешности измерения, u_T, связанного с калибровкой. Следует рассмотреть три случая:

– В первом случае поправка $\pm u_T$ полностью попадает в диапазон соответствия. В этом случае термометр может быть признан соответствующим спецификации. В этом случае термометр можно вернуть в эксплуатацию и вычислять его температуру по стандартной кривой МЭК 60751 со стандартными коэффициентами Каллендара — Ван Дьюзена. Для примера на рисунке 2.9 так произойдет при погрешности $u_T = 0{,}05$ °C.

– Во втором случае поправка $\pm u_T$ вообще не попадает в диапазон соответствия. Термометр может быть признан несоответствующим спецификации. В этом случае термометр нельзя вернуть в эксплуатацию, а датчик обычно выбрасывается.

– В третьем случае поправка $\pm u_T$ перекрывает диапазон соответствия, так что присутствует значительная вероятность того, что датчик не соответствует требованиям. В этом случае дальнейшие действия зависят от степени перекрывания. Если, по оценке, вероятность несоответствия достаточно мала, термометр может быть возвращен в эксплуатацию, а его температура определена по стандартной кривой МЭК 60751 со стандартными коэффициентами Каллендара — Ван Дьюзена. Для примера на рисунке 2.9 так произойдет при погрешности $u_T = 0{,}15$ °C.

Обратите внимание, что соответствие или несоответствие может зависеть от коэффициента охвата, приписываемого погрешности.

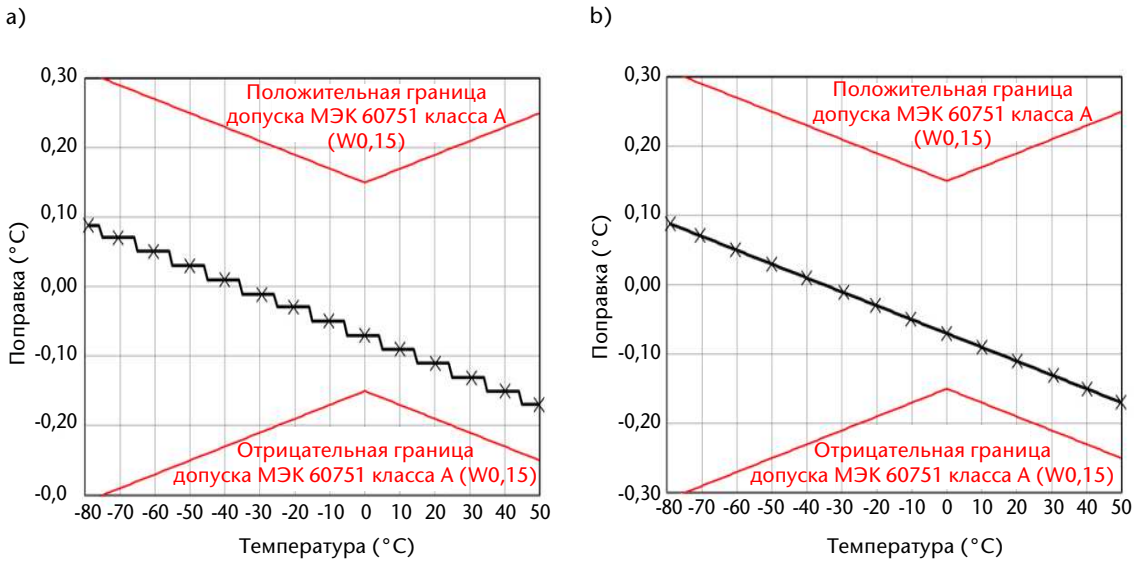


Рисунок 2.9. Схемы применения поправок, полученных на основе данных калибровки: a) ступенчатая; b) линейная

В простейшей схеме, в которой применяются поправки, предполагается, что поправки при определенной температуре применяются ко всем температурам, которые находятся ближе к этой точке калибровки, чем к любой другой точке калибровки. Таким образом, температура определяется по сопротивлению с помощью стандартной кривой, а затем добавляется поправка. Недостаток этой схемы (рис. 2.9 a)) заключается в том, что на кривой зависимости температуры от сопротивления посередине между точками калибровки возникает разрыв.

Линейная интерполяция улучшает простую схему поправок (рис. 2.9 b)). Поправка, применяемая к конкретному измерению, рассчитывается путем линейной интерполяции между поправками из точек калибровки выше и ниже выбранной температуры. Преимущество этого метода состоит в получении непрерывной кривой зависимости температуры от сопротивления.

Более сложная обработка данных заключается в использовании этих данных для создания пользовательских параметров Каллендара — Ван Дьюзена для конкретного термометра. Эта процедура описана в (Nicholas and White, 1993).

2.2.7 Обслуживание

Регулярные проверки в условиях эксплуатации должны выявлять любые изменения в градуировке системы. Они могут быть вызваны изменениями электрических характеристик термометра со временем, старением электрических кабелей или их соединений, изменением контактного сопротивления переключателей или электрических характеристик измерительного оборудования. Для точного определения источника таких погрешностей и их корректировки требуется специальное оборудование и обучение, и эту работу должен выполнять только сотрудник по техническому обслуживанию и ремонту.

2.3 ЖИДКОСТНЫЕ СТЕКЛЯННЫЕ ТЕРМОМЕТРЫ

Ртутные стеклянные термометры получили широкое распространение, но после принятия Минаматской конвенции о ртути (см. 2.1.4.5) они больше не рекомендуются. НМГС рекомендуется принять надлежащие меры для замены ртутных стеклянных термометров на современные альтернативы (например, электрические термометры сопротивления).

Учитывая то, как развивалась термометрия в прошлом и остаточное использование ртутных стеклянных термометров, следующий текст также относится и к ртутным стеклянным термометрам.

2.3.1 **Общие положения**

Для обычных наблюдений за температурой воздуха, включая максимальную и минимальную температуру, а также температуру смоченного термометра, все еще широко используются жидкостные стеклянные термометры. Принцип работы таких термометров основан на различном термическом расширении чистой жидкости и стеклянного резервуара. Капилляр представляет собой трубку, тонкий внутренний канал которой соединен с резервуаром термометра; резервуар полностью заполнен термометрической жидкостью, а капилляр — лишь частично при всех измеряемых температурах.
С изменением объема жидкости в резервуаре меняется и высота столбика жидкости в капилляре. При градуировке такого термометра с использованием эталонного термометра шкала наносится либо непосредственно на капилляр, либо на отдельную пластинку, прочно прикрепленную к капилляру.

Использование той или иной жидкости определяется необходимым диапазоном измерения температуры; ртуть[2] применялась для измерения температур, превышающих ее точку замерзания (–38,9 °C), тогда как для измерения более низких температур используется этиловый спирт или другие чистые органические жидкости. Стекло должно быть обычным или боросиликатным, которые допускаются к применению в термометрах. Для того чтобы улучшить проводимость тепла от стеклянного резервуара термометра к его содержимому, стенки резервуара делают как можно тоньше с учетом практических соображений сохранения достаточной прочности. Более узкий внутренний канал капилляра обеспечивает и более быстрое перемещение жидкости в нем при заданном изменении температуры, но при этом уменьшается рабочий диапазон измерения температуры термометра при фиксированной длине капилляра. Перед градуировкой термометры необходимо подвергнуть термической обработке (обжигу), чтобы свести к минимуму медленно протекающие изменения, связанные со старением стекла.

Существуют четыре основных типа конструкции метеорологических термометров:

a) термометр в защитной оболочке со шкалой, нанесенной на капилляре термометра;

b) термометр в защитной оболочке со шкалой, нанесенной на пластинке из молочного стекла, прикрепленной к термометру внутри защиты;

c) термометр без защитной оболочки со шкалой на капилляре и прикрепленный к металлической, фарфоровой или деревянной оправе обратной цифровой шкале стороной;

d) термометр без защитной оболочки со шкалой, нанесенной на капилляре.

Капилляры некоторых термометров снабжены линзами для увеличения изображения столбика жидкости.

Типы (a) и (b) имеют то преимущество перед типами (c) и (d), что их шкалы предохранены от стирания. У термометров типа (c) и (d) шкалы, вероятно, время от времени придется подкрашивать. Однако такие термометры легче сделать, чем термометры типов (a) и (b). Типы (a) и (d) имеют преимущество, заключающееся в том, что они менее подвержены погрешностям вследствие параллакса (см. раздел 2.3.4). В публикации Управления

[2] Рекомендации относительно безопасного использования ртути приведены в части I, глава 3, 3.2.7. Минаматская конвенция о ртути Программы ООН по окружающей среде вступила в силу в октябре 2013 г. и окажет значительное влияние на использование ртути для метеорологических применений.

по изданию официальных документов Ее Королевского Величества/Метеорологического бюро (1980) приведен обзор термометров, предназначенных для использования в метеорологической деятельности.

В любом типе защита или оправа должна иметь малую теплоемкость, т. е. не должна быть чрезмерно громоздкой. В то же время она должна быть достаточно прочной, чтобы выдерживать нагрузки, испытываемые при эксплуатации и перевозках.

Для ртутных стеклянных термометров, особенно максимальных, важно, чтобы вакуум над столбиком ртути был близок к идеальному. Все термометры, за исключением термометров для измерения температуры почвы, должны градуироваться при полном погружении. Требования к термометрам, предназначенным для различных целей, рассматриваются в соответствующих разделах ниже.

2.3.1.1 ***Обычные (станционные) термометры***

Ранее применялись очень точные ртутные стеклянные термометры. Деление его шкалы соответствует 0,2 K или 0,5 K, а шкала его длиннее, чем у других метеорологических термометров.

Обычный термометр размещается в метеорологической будке с тем, чтобы избежать погрешностей за счет радиации. Термометр устанавливается на подставке в вертикальном положении резервуаром вниз. Резервуар должен иметь форму цилиндра или сферы.

Пара обычных термометров может использоваться в качестве психрометра, если один из них обернут тканью (смоченный термометр)[3] (см. настоящий том, глава 4, 4.3).

2.3.1.2 ***Максимальные термометры***

В качестве максимального термометра рекомендовалось использовать ртутный стеклянный термометр, имеющий сужение внутреннего канала трубки между резервуаром и основанием шкалы. Это сужение не дает ртутному столбику смещаться вниз при понижении температуры. Термометр, однако, можно возвратить в исходное состояние — наблюдатель должен крепко держать его резервуаром вниз и стряхивать до тех пор, пока ртутный столбик не соединится. Максимальный термометр следует устанавливать под углом примерно два градуса к горизонтали, причем резервуар должен быть наклонен вниз для того, чтобы ртутный столбик проходил сужение не под действием силы тяжести. Желательно, чтобы в верхней части капилляра внутренний канал имел расширение для того, чтобы разделившийся на части ртутный столбик можно было легко соединить при стряхивании. Поскольку единственной жидкостью, подходящей для жидкостных стеклянных максимальных термометров, является ртуть, для измерения максимальной температуры следует использовать электрические альтернативы (см. 2.2).

2.3.1.3 ***Минимальные термометры***

Что касается минимальных термометров, то наиболее распространенным типом такого термометра является спиртовой термометр с темным стеклянным штифтом длиной около 2 см, погруженным в спирт. Так как некоторое количество воздуха остается в трубке спиртового термометра, в верхнем ее конце должно быть предусмотрено расширение достаточных размеров для того, чтобы прибор смог выдерживать температуру 50 °C или выше без повреждений. Минимальные термометры должны устанавливаться таким же образом, как и максимальные термометры — в почти горизонтальном положении. В минимальных термометрах можно использовать различные жидкости, такие, как этиловый спирт, пентан и толуол. Важно, чтобы жидкость была как можно чище, так как

[3] Подробное описание смоченных термометров приведено в настоящем томе, глава 4.

присутствие некоторых примесей увеличивает тенденцию жидкости к полимеризации под воздействием света, что с течением времени приводит к изменению градуировки. Например, при использовании этилового спирта последний не должен содержать ацетона.

Минимальные термометры используются также для измерения минимальной температуры воздуха в травостое (см. 2.1.4.2.3).

2.3.1.4 *Почвенные термометры*

Для измерения температуры почвы на глубинах до 20 см широко применялись ртутные термометры, капилляры которых изогнуты под прямым или другим углом ниже наименьшей отметки шкалы. Резервуар термометра погружается в землю на требуемую глубину таким образом, чтобы снятие показаний осуществлялось без изменения положения термометра. Такие термометры градуируются при погружении до той глубины, на которой измеряется температура почвы. Так как остальная часть термометра находится под воздействием температуры воздуха, в конце капилляра должно быть предусмотрено расширение на случай увеличения объема ртути.

Для измерения температуры на глубинах, превышающих 20 см, рекомендовалось использовать ртутные стеклянные термометры, заключенные в деревянные, стеклянные либо пластмассовые оправы; резервуары таких термометров были покрыты воском или окрашены металлической краской. Термометры в оправе помещают в тонкостенные металлические либо пластмассовые трубки и погружают в землю на нужную глубину. В условиях холодного климата высота надземной части трубки должна быть выше наибольшей высоты снежного покрова.

Вертикальные металлические трубки не используются при измерении дневного колебания температуры почвы, особенно засушливой, так как расчеты ее тепловых свойств на основе этих измерений могут быть неправильными, потому что такие трубки будут служить в качестве проводников тепла с земной поверхности.

Большая постоянная времени, обусловленная повышенной теплоемкостью, позволяет при вынимании термометра из трубки, в которую он вставлен, сохранять показания во время снятия отсчетов

Если земля покрыта снегом, то рекомендуется возведение небольшого помоста, расположенного параллельно ряду термометров для того, чтобы наблюдатель мог приблизиться к термометрам, не нарушая снежного покрова. Этот помост должен быть спроектирован таким образом, чтобы настил можно было убирать в промежутках между наблюдениями, не нарушая снежного покрова.

2.3.2 Порядок проведения измерений

2.3.2.1 *Снятие показаний обычных термометров*

Для того чтобы избежать изменений температуры из-за присутствия наблюдателя, показания термометра следует снимать как можно быстрее. Так как мениск жидкости или штифт и шкала термометра не находятся в одной плоскости, следует быть внимательным во избежание ошибок вследствие параллакса. Это происходит, если глаз наблюдателя не находится на линии, перпендикулярной к капилляру термометра и проходящей через мениск или штифт термометра. Так как шкалы термометров обычно не имеют делений менее одной пятой градуса, снятие показаний с точностью до одной десятой градуса, что является важным для психрометрии, необходимо производить на глаз. Если имеются шкаловые поправки, то их нужно вводить в показания. Устанавливать и снимать показания максимальных и минимальных термометров следует, по крайней мере, два раза в день. Их показания надо постоянно сравнивать с показаниями обычных термометров для того, чтобы убедиться в отсутствии серьезных погрешностей.

2.3.2.2 *Измерение минимальной температуры воздуха в травостое*

Температуру измеряют минимальным термометром такого типа, который описан в разделе 2.3.1.3. Термометр следует устанавливать на соответствующих подставках так, чтобы угол его наклона к горизонтали составлял примерно 2°, причем резервуар должен быть ниже капилляра термометра; термометр должен находиться на высоте 50 мм над землей.

Обычно термометр устанавливают в последний час наблюдений перед заходом солнца, а показания снимают на следующее утро. В течение дня прибор хранится в будке или в помещении. Однако на станциях, где наблюдатель не работает в период захода солнца, приходится оставлять термометр под открытым небом на весь день. При значительной солнечной радиации это может привести к дистилляции спирта и сбору его в верхней части капилляра термометра. Этот эффект можно свести к минимуму, поместив черный металлический экран, обвернутый хлопчатобумажным лоскутом, над резервуаром термометра; такой экран поглощает больше радиации и, следовательно, достигает более высокой температуры, чем сам термометр. Таким образом, небольшое количество пара будет конденсироваться в верхней части капилляра над столбиком спирта.

2.3.3 Размещение и установка термометров

Как обычные, так и максимальные и минимальные термометры всегда помещают в психрометрическую будку, как это описано в разделе 2.2.3. Экстремальные термометры устанавливают на соответствующих подставках так, чтобы угол их наклона к горизонтали составлял примерно 2°, причем резервуары должны быть ниже капилляра термометра.

Выбор места и установка минимальных термометров для измерения температуры воздуха в травостое описаны в разделе 2.1.4.2.3 и 2.3.2.2.

2.3.4 Источники погрешностей жидкостных стеклянных термометров

К числу основных источников погрешностей, характерных для всех жидкостных стеклянных термометров, относятся следующие:

a) погрешности упругости;

b) погрешности, вызываемые капиллярной трубкой термометра;

c) погрешности параллакса и грубые ошибки при снятии показаний;

d) изменения объема резервуара термометра под воздействием внешнего или внутреннего давления;

e) капиллярность;

f) ошибки в делении и градуировке шкалы;

g) различное расширение жидкости и стекла в рассматриваемом диапазоне.

Три последние погрешности могут быть сведены к минимуму изготовителем и включены в поправки, вводимые к наблюдаемым величинам. Определенного внимания требуют первые три погрешности. Погрешность (d) обычно не имеет места при использовании термометров в метеорологических целях.

2.3.4.1 *Погрешности упругости*

Существует два вида погрешностей упругости: обратимые и необратимые. Первые имеют значение лишь при воздействии на термометр температур широкого диапазона в течение короткого промежутка времени. Таким образом, если термометр поверяется при температуре кипения воды, а через короткий промежуток времени при температуре замерзания воды, то его показания будут сначала несколько ниже правильной отметки, а затем температура медленно поднимется до нее. Эта погрешность зависит от качества используемого в термометре стекла и может достигать 1 K, но при использовании высококачественного стекла она должна составлять лишь 0,03 K, при этом она может пропорционально уменьшаться при меньших диапазонах температур. Это явление не имеет значения для метеорологических измерений, за исключением возможной ошибки при начальной градуировке.

Необратимые изменения могут иметь большее значение. Резервуар термометра имеет тенденцию со временем уменьшаться в объеме, что приводит к повышению нулевой отметки. Наибольшие изменения происходят в течение первого года, после чего темпы изменений постепенно понижаются. Степень этих изменений можно сократить посредством тепловой обработки резервуара термометра и использования более подходящего стекла. Но даже при использовании высококачественного стекла это изменение может первоначально составлять порядка 0,01 K в год. Для обеспечения точных показаний, особенно при работе с инспекторскими или контрольными термометрами, следует периодически проверять нулевую отметку и производить необходимые корректировки.

2.3.4.2 *Погрешности, вызываемые капиллярной трубкой термометра*

Термометр, используемый для измерения температуры воздуха, обычно полностью находится в воздушной среде приблизительно одинаковой температуры, а его градуировка производится при погружении термометра полностью или до верхней отметки жидкостного столбика (т. е. градуировка при полном или частичном погружении). Если такой термометр используется для определения температуры среды, не требующей полного погружения термометра, то действительная температура трубки отличается от температуры резервуара, что приводит к погрешности.

При применении в метеорологических целях вероятнее всего это может произойти при проверке градуировки обычного термометра в сосуде с жидкостью, температура которой значительно отличается от температуры окружающей среды, и при погружении только резервуара или нижней части капиллярной трубки.

2.3.4.3 *Ошибки параллакса и грубые ошибки при снятии показаний*

Если при снятии показаний термометра смотреть на него в плоскости, которая не перпендикулярна к капиллярной трубке термометра, то возникает ошибка параллакса. Эта ошибка находится в прямой зависимости от толщины капиллярной трубки термометра и величины угла между фактической и правильной линиями визирования. Ошибки можно избежать лишь при очень тщательном снятии показаний. При работе с вертикально расположенными в метеорологической будке стеклянными ртутными термометрами глаз наблюдателя должен находиться на горизонтальной линии, проходящей через верхнюю точку ртутного столбика.

Ошибки при снятии показаний, кроме того, могут быть обусловлены присутствием наблюдателей, в какой-то мере нарушающих состояние окружающей среды. Поэтому необходимо, чтобы наблюдатели за максимально короткое время сняли показания с точностью до десятых долей градуса. Грубые ошибки при снятии показаний составляют обычно 1°, 5° или 10°. Таких ошибок можно избежать, если наблюдатели перепроверяют десятые доли градуса и целые значения после снятия показаний.

2.3.4.4 *Погрешности, обусловленные различным расширением*

Коэффициент объемного расширения ртути равен $1{,}82 \cdot 10^{-4}\ K^{-1}$, а для большей части стекол он колеблется от $1{,}0 \cdot 10^{-5}$ до $3{,}0 \cdot 10^{-5}\ K^{-1}$. Коэффициент расширения стекла, таким образом, является значимым компонентом и не может не приниматься в расчет. Поскольку ни коэффициент объемного расширения ртути и стекла, ни площадь поперечного сечения отверстия капиллярной трубки не являются абсолютно неизменными в пределах используемых диапазонов температур и длины капиллярной трубки, цена деления шкалы капиллярной трубки варьирует в зависимости от того или иного участка капиллярной трубки, поэтому изготовитель должен градуировать термометр по эталонному термометру до начала его использования.

2.3.4.5 *Погрешности спиртовых термометров*

Коэффициент расширения жидкостей, используемых в спиртовых термометрах, значительно выше, чем коэффициент расширения ртути, а точка их замерзания значительно ниже (этиловый спирт замерзает при –115 °C). Спирт используется в минимальных термометрах потому, что он бесцветен и имеет более высокий коэффициент расширения, что позволяет использовать капиллярную трубку с большим отверстием. Спиртовые термометры менее точные, чем ртутные термометры той же стоимости и качества. Кроме общих недостатков, присущих всем жидкостным стеклянным термометрам, спиртовые термометры имеют свои, присущие только им недостатки:

a) адгезия спирта на стекле: в отличие от ртути, органические жидкости обычно смачивают стекло. Следовательно, в случае резкого падения температуры определенное количество жидкости может остаться на стенках капилляра, вызывая этим понижение показаний термометра. Если термометр подвешен вертикально, то постепенно жидкость стекает в нижнюю часть капилляра;

b) разрыв столбика жидкости: в верхней части капиллярной трубки термометра в результате испарения и конденсации часто образуются капельки жидкости. Они могут соединиться с основным столбиком, однако в период от начала этого процесса и до момента его обнаружения могут возникнуть ошибки. Разрыв столбика часто происходит также при транспортировке. Эту ошибку сокращают в процессе производства за счет запаивания термометра при самых низких значениях температуры, когда в капилляре содержится максимальное количество воздуха;

c) медленно протекающие изменения в жидкости: органические жидкости обычно имеют тенденцию к полимеризации с течением времени и под воздействием света, что приводит к постепенному сокращению объема жидкости. Присутствие примесей ускоряет этот процесс; в частности, наличие ацетона в этиловом спирте имеет весьма пагубные последствия. В этой связи подготовка жидкости для термометров требует особой тщательности. Кроме того, использование красителей для подкрашивания жидкости с целью улучшения ее зрительного восприятия повышает возможность возникновения этого явления.

Вопросы сокращения ошибок, связанных с разрывом столбика жидкости, а также ухода за спиртовыми термометрами, рассматриваются в этой главе ниже.

2.3.5 Сравнение и калибровка в лабораторных условиях и в условиях эксплуатации

2.3.5.1 *Калибровка в лабораторных условиях*

Калибровку термометров в лабораторных условиях должны проводить аккредитованные согласно ИСО/МЭК 17025 поверочные лаборатории. Для жидкостных стеклянных термометров следует использовать контейнер, наполненный жидкостью, в котором можно поддерживать любую желаемую температуру в необходимых пределах. Скорость

изменения температуры внутри жидкости не должна превышать рекомендуемые пределы, а калибровочные приборы должны быть снабжены средствами для перемешивания жидкости. Эталонные контрольные термометры и калибруемые термометры, подвешенные в контейнере, не должны касаться его стенок.

Необходимо провести достаточное количество измерений, с тем чтобы быть уверенным, что необходимые корректировки соответствуют характеристикам термометра в нормальных условиях, когда ошибки, обусловленные интерполяцией, в любой промежуточной точке не превышают несистематические погрешности (см. том V, глава 4 настоящего Руководства).

2.3.5.2 ***Проверка в полевых условиях***

Во всех жидкостных стеклянных термометрах происходит постепенное изменение нулевой отметки. По этой причине желательно проверять их через регулярные интервалы времени — обычно один раз в два года. До начала процесса проверки их следует оставить в вертикальном положении при комнатной температуре не менее чем на 24 часа.

Температуру замерзания можно проверить, наполнив сосуд Дьюара измельченным льдом из дистиллированной воды и доливая дистиллированную воду. В пространстве между кусочками льда и между льдом и дном сосуда не должно быть воздуха. Уровень воды должен быть на 2 см ниже поверхности льда. Для определения точки замерзания большинства термометров можно использовать обычный термос. Термометры следует размещать таким образом, чтобы возможно меньшая часть столбика ртути или спирта возвышалась надо льдом. Перед снятием показаний термометра следует сделать по меньшей мере 15-минутную паузу для того, чтобы дать возможность термометру принять температуру тающего льда. Каждый термометр следует двигать взад и вперед в этой смеси и немедленно снимать показания с точностью до десятой доли деления шкалы. Последующие показания следует снимать через 5-минутные интервалы времени, а затем рассчитать их среднее значение.

Остальные точки в диапазоне температур можно определить по переносному эталону или инспекционному термометру. Следует сделать сравнение эталонного термометра и одного или нескольких проверяемых термометров посредством погружения их в глубокий сосуд с водой. Как правило, лучше работать в помещении, особенно в солнечную погоду, а наилучшие результаты получаются в том случае, если температура воды соответствует температуре окружающей среды или близка к ней.

Каждый термометр сравнивают с эталонным, а термометры одного типа можно сравнивать друг с другом. При каждом сравнении термометры следует размещать так, чтобы их резервуары были по возможности ближе друг к другу, двигать их в воде взад и вперед в течение 1 минуты, а затем снимать показания. Термометры следует располагать таким образом, чтобы можно было снимать показания, не изменяя глубины погружения, при этом резервуары термометров должны быть погружены в воду как можно глубже. Большинство метеорологических термометров калибруются в лабораторных условиях при полном погружении, однако корректировка за счет неполного погружения капиллярной трубки должна быть незначительной при условии, что разность температур воды и воздуха составляет не более 5 K. Часто при расположении резервуаров термометров на одинаковой глубине верхние отметки столбиков ртути (или другой жидкости) в эталонном и поверяемом термометрах находятся довольно далеко друг от друга. В таких случаях следует проявить особую тщательность во избежание ошибок параллакса.

Сравнения следует сделать по меньшей мере три раза для каждой пары термометров. Для каждой серии сравнений среднее значение разности между показаниями термометров не должно превышать определенные погрешности, указанные в настоящем томе, глава 1, приложение 1.A.

Почвенные термометры можно проверять таким же способом, но их следует оставлять в воде не менее 30 минут с тем, чтобы покрытые воском резервуары термометров приняли

температуру воды. Большая постоянная времени почвенного термометра затрудняет проведение качественной проверки, если невозможно поддерживать постоянную температуру воды. Если проверка проводится тщательно в воде, температура которой изменяется не более чем на 1 K в течение 30 минут, то разность между поверяемым термометром и скорректированным показанием эталонного термометра не должна превышать 0,25 K.

2.3.6 **Поправки**

При изготовлении термометры, идентифицируемые по серийному номеру, должны быть снабжены либо сертификатом с указанием даты изготовления, подтверждающим соответствие требованиям к погрешности измерений, или сертификатом поверки с указанием даты и поправок, которые следует применять к показаниям для получения требуемой точности.

Если погрешности в выбранных точках в диапазоне показаний термометров (например, 0 °C, 10 °C, 20 °C) не превышают ±0,05 K, то нет необходимости в поправках, и термометры могут использоваться в качестве станционных термометров, устанавливаемых в естественно вентилируемых будках, а также в качестве максимальных, минимальных, почвенных термометров и термометров для измерения минимальной температуры в травостое. Если погрешности в выбранных точках составляют более 0,05 K, наблюдатель должен быть снабжен таблицей поправок к показаниям, а также четкими инструкциями о том, как эти поправки применять.

Сертификатами должны быть снабжены следующие термометры:

a) для использования в вентилируемых психрометрах;

b) для использования в качестве переносных эталонов сравнения;

c) для использования в качестве эталонных термометров для калибровки в лабораторных условиях;

d) для использования в специальных целях, для которых применение поправок обосновано.

Для психрометрических целей следует выбирать два идентичных термометра.

2.3.7 **Обслуживание**

2.3.7.1 ***Разрыв столбика жидкости***

Наиболее часто встречающимся недостатком является разрыв столбика жидкости, особенно во время транспортировки. Это чаще случается со спиртовыми (минимальными) термометрами. Другими проблемами, характерными для этих термометров, являются адгезия спирта на стекле и образование капелек спирта за счет дистилляции в капилляре.

Разрыв столбика жидкости обычно можно ликвидировать, держа термометр резервуаром вниз и слегка постукивая им о пальцы руки или какой-либо предмет, эластичный и не слишком твердый. Постукивание необходимо продолжать в течение некоторого времени (в течение 5 минут, если это необходимо), а затем подвесить термометр, либо поставить его вертикально в подходящий контейнер резервуаром вниз по крайней мере на час, для того чтобы дать возможность спирту, прилипшему к стенке стекла, стечь вниз к основному столбику. Если подобный метод не приносит успеха, то более эффективным методом является охлаждение резервуара в холодной смеси льда и соли при сохранении верхней части капилляра в тепле. Тогда жидкость будет медленно возвращаться к основной части столбика. Кроме того, резервуар термометра можно поместить в сосуд с теплой водой и, держа термометр вертикально, одновременно постукивать или

стряхивать воду с капилляра до тех пор, пока верхняя часть столбика спирта не достигнет расширенной верхней части капилляра. Этим методом следует пользоваться с особой осторожностью, так как существует риск растрескивания термометра, если спирт попадает в расширение капилляра.

2.3.7.2 *Нечеткость шкалы*

Другим недостатком жидкостных стеклянных термометров, не снабженных футлярами, является то, что со временем шкала становится нечеткой. Это можно исправить на станции, потерев шкалу темным литографическим либо черным графитовым карандашом.

2.3.8 Безопасность

Ртуть, которая чаще всего использовалась в жидкостных стеклянных термометрах, является ядовитой и может вызвать отравление при проглатывании или вдыхании ее паров. Если термометр разбит, а капельки ртути не удалены, то существует опасность для здоровья, особенно в закрытых помещениях. Более подробная информация о мерах предосторожности при использовании ртути приводится в настоящем томе, глава 3, приложение 3.A. Существуют также ограничения при транспортировке ртутных стеклянных термометров самолетом или особые меры предосторожности, которые следует предпринять для предотвращения утечки ртути в случае поломки термометра. За консультацией следует обратиться в администрацию соответствующей инстанции или перевозчика.

2.4 МЕХАНИЧЕСКИЕ ТЕРМОГРАФЫ

2.4.1 Общие положения

Биметаллические термографы и термографы с трубкой Бурдона являются приборами, которые все еще широко применяются вследствие их относительной дешевизны, надежности и портативности. Однако их нелегко приспособить для дистанционной или электронной регистрации. В состав таких термографов входит вращающийся ленточный механизм, обычный для группы классических самописцев. В целом термографы должны работать в диапазоне примерно 60 K или даже 80 K, если они используются в условиях континентального климата. Требуется такая цена деления шкалы, чтобы можно было без труда производить считывание значений температуры с погрешностью не более 0,2 K на ленте среднего размера. Для выполнения этого требования следует предусмотреть возможность переустановки нулевой отметки прибора в зависимости от сезона. Максимальная погрешность термографа не должна превышать 1 K.

2.4.1.1 *Биметаллический термограф*

В биметаллическом термографе движение записывающего пера регулируется за счет изменения кривизны биметаллической пластинки или пружины, один конец которой жестко скреплен с кронштейном, укрепленным на корпусе. Должно быть предусмотрено регулировочное устройство для того, чтобы при необходимости можно было менять нулевую отметку прибора. Кроме того, в приборе должно быть предусмотрено изменение цены деления шкалы за счет регулировки длины рычага, передающего движение биметаллической пластинки перу; регулировку должен производить персонал, имеющий на это разрешение. Биметаллический элемент нужно соответствующим образом предохранить от коррозии; это лучше всего сделать за счет покрытия из меди, никеля либо хрома, хотя для некоторых типов климата достаточным, вероятно, является покрытие лаком. Прибор имеет постоянную времени около 25 с при скорости ветра 5 $м \cdot с^{-1}$.

2.4.1.2 *Термограф с трубкой Бурдона*

По своему устройству прибор в целом похож на прибор биметаллического типа, но температурный датчик имеет форму изогнутой металлической трубки плоского эллиптического сечения, наполненной спиртом. Трубка Бурдона менее чувствительна, чем биметаллический элемент, и обычно требует наличия рычажного механизма усиления для того, чтобы получить необходимую цену деления шкалы. Прибор имеет типичную постоянную времени, равную примерно 6 с при скорости ветра 5 $м \cdot с^{-1}$.

2.4.2 Порядок проведения измерений

Для улучшения разрешающей способности термографы в различное время года часто настраиваются на один или два разных диапазона с применением соответствующих лент. Точная дата перехода с одного комплекта лент на другой будет изменяться в зависимости от условий местонахождения. Однако при осуществлении этого перехода прибор требуется отрегулировать. Регулировка должна производиться либо в метеорологической будке в облачный ветреный день при практически постоянной температуре, либо в помещении с постоянной температурой. Регулировка производится посредством отпускания винта, с помощью которого рычаг пера крепится к его стержню, и установления рычага пера в правильное положение с последующим затягиванием винта. Прибор оставляют до повторной проверки и дальнейших регулировок, которые могут потребоваться.

2.4.3 Размещение и установка

Эти приборы должны устанавливаться в больших психрометрических будках (например, в метеорологической будке Стивенсона с внутренней измерительной камерой размером 450 x 700 x 400 мм).

2.4.4 Источники погрешностей

Трение является основным источником погрешностей механизма термографа. Одной из причин трения является плохая центровка спирали по отношению к стержню. Если не установить спираль точно, то она действует как мощная пружина, а при жестком закреплении она прижимает основной стержень к одной стороне подшипников. В современных приборах это не должно вызывать серьезных проблем. Трение между пером и лентой можно свести к минимуму посредством соответствующей регулировки подвески рабочего механизма.

2.4.5 Сравнение и калибровка

2.4.5.1 *Калибровка в лабораторных условиях*

Существует два основных метода лабораторной калибровки биметаллических термографов. Их можно проверять, установив неподвижно в соответствующее положение и поместив биметаллический элемент в водяную ванну. Можно также поместить термограф в поверочную камеру промышленного типа, снабженную механизмом контроля температуры воздуха, вентилятором и эталонным термометром.

Сравнения следует сделать при двух значениях температуры и, исходя из этого, можно выявить изменения нулевой отметки на ленте. Регулировка шкалы должна проводиться персоналом, имеющим на это разрешение, и только с учетом положений инструкции изготовителя прибора.

2.4.5.2 *Сравнение в условиях эксплуатации*

Постоянная времени прибора может быть равна лишь половине постоянной времени обычного ртутного термометра, поэтому показания сухого термометра и термографа в определенное время не будут совпадать, даже если прибор работает прекрасно. Лучше всего произвести проверку показаний прибора в тот день и в то время, когда температура почти постоянна (обычно облачный, ветреный день); можно также сравнить минимальные показания записей термографа с показаниями минимального термометра, установленного в той же будке. Затем можно произвести любую необходимую регулировку посредством установочного винта.

2.4.6 Поправки

Термографы обычно не снабжаются сертификатом поправок. Если в результате проверок на станции выявляются погрешности, превышающие допустимые, и они не могут быть устранены на месте, прибор должен быть возвращен в соответствующую поверочную лабораторию для ремонта и повторной поверки.

2.4.7 Обслуживание

Текущее обслуживание включает в себя проверку внешнего состояния, свободного хода подшипников, угла наклона записывающего рычага, установки пера и угла между рычагами усиления и записи, а также проверку настройки часового механизма, вращающего барабан с лентой. Такие проверки должны проводиться в соответствии с рекомендациями изготовителя. Со спиралью следует обращаться осторожно во избежание механического повреждения и содержать ее в чистоте. Подшипники оси должны содержаться в чистоте, умеренно смазываться часовым маслом через определенные промежутки времени. Прибор очень простой в механическом отношении, и, поскольку предусмотренные предосторожности направлены на сведение к минимуму трения и на предохранение от коррозии, он должен хорошо работать.

2.5 РАДИАЦИОННЫЕ ЗАЩИТЫ

Радиационная защита или экран должны быть спроектированы таким образом, чтобы обеспечить огороженное пространство, имеющее равномерную температуру, которая являлась бы такой же, как температура окружающего воздуха. Защита должна полностью окружать термометры и исключать возможность воздействия на них теплового излучения, осадков и других явлений, которые могут повлиять на измерение.

Экраны с принудительной вентиляцией, при использовании которых воздух направляется на элемент термометра с помощью вентилятора, могут помочь уменьшить погрешности измерения в тех случаях, когда микроклимат внутри огороженного пространства отклоняется от микроклимата окружающей воздушной массы. Такое отклонение наиболее велико при очень низкой скорости естественного ветра (< 1 м с $^{-1}$). При использовании принудительной вентиляции следует принять меры, чтобы предотвратить осаждение аэрозолей и капель дождя на датчик температуры, под воздействием которых температура, показываемая датчиком, понижается до температуры, показываемой смоченным термометром. Средства радиационной защиты с принудительной вентиляцией должны иметь четкий индикатор состояния фактического режима работы вентилятора непосредственно на экране или на контролирующем устройстве либо на регистраторе данных, чтобы предоставить возможность обслуживающему техническому персоналу проверять правильность работы вентилятора с помощью визуального контроля. Кроме того, сведения о состоянии режима работы вентилятора и предпочтительно о частоте его вращения должны содержаться в выходных данных для целей автоматического контроля.

В качестве материала для защиты подходит неокисляющийся металл с тщательно отполированной поверхностью, так как он обладает высокой отражательной способностью и низкой теплоемкостью. Тем не менее, широко используются пластиковые материалы с низкой теплопроводностью в связи с несложными требованиями к их техническому обслуживанию. Если система основана на принципе естественной вентиляции, то в обязательном порядке следует также использовать материал с низкой теплопроводностью.

Эффективность работы защиты (реагирование на воздействие и микроклиматические факторы, ведущие к нежелательным погрешностям измерения) зависит, главным образом, от ее конструкции, в которой необходимо обеспечить как защиту от радиации, так и достаточный уровень вентиляции. С тех пор, как начали производить метеорологические измерения температуры, были предложены самые разные типы конструкций защиты. После того, как температуру стали измерять с помощью АМС, разнообразие конструкций значительно возросло (см. WMO, 1998*a*). Из-за различий в специфике применений, степени автоматизации и климатических условиях, трудно рекомендовать один конкретный тип конструкции, подходящий для проведения измерений по всему миру. Хороший обзор конструкций и эффективности их функционирования приведен в публикации WMO (1972). Результаты взаимных сравнений защит термометров описаны в публикациях Andersson and Mattison (1991), Sparks (2001), WMO (1998*b*; 1998*c*; 1998*d*; 2000*a*; 2000*b*; 2002*b*; 2002*c*; 2002*d*) и в публикации Zanghi (1987).

В соответствии с международным стандартом (ISO/DIS 17714) определяются наиболее соответствующие требованиям типы защит и описываются методы оценки и сравнения эффективности их функционирования (ISO, 2007).

Поскольку радиационная защита может обеспечить значительный вклад в общую оценку погрешности измерений температуры, необходимо оценить и рассчитать влияние различных метеорологических ситуаций (например, восход солнца после ясной ночи, морозные узоры или снег внутри и снаружи, конденсат внутри и снаружи, влияние жидких осадков).

2.5.1 Жалюзийные будки

В большинстве различных типов жалюзийной будки используется принцип естественной вентиляции. Стены такой будки должны иметь двойные жалюзи, а пол должен быть сделан из досок, идущих уступами. Можно найти и другие типы конструкций, отвечающих вышеуказанным требованиям. Крыша должна быть двухслойной с вентилируемым воздушным пространством между слоями. В условиях холодного климата из-за высокой отражательной способности снега (до 88 %) будка должна иметь двойной пол. В то же время пол должен легко опускаться либо наклоняться с тем, чтобы можно было удалить снег, попавший внутрь во время метели.

Размеры и конструкция будки должны быть такими, чтобы обеспечить как можно более низкую теплоемкость, а также достаточное пространство между приборами и стенами. Последнее требование исключает всякую вероятность непосредственного контакта чувствительных элементов термометра со стенами и приобретает особую важность в тропиках, где солнечная радиация может нагреть стены до такой степени, что вызовет заметный температурный градиент в будке. Следует избегать также непосредственного контакта между чувствительными элементами и креплением термометра. Будка должна быть выкрашена внутри и снаружи белой негигроскопичной краской.

При двойных стенах воздух между ними служит для уменьшения количества тепла, которое в противном случае поступало бы за счет теплопроводности от внешней стены внутрь будки, особенно при значительной солнечной радиации. При ветре воздух между стенами непрерывно меняется и поступление тепла от внешних стен внутрь будки еще сильнее уменьшается.

Свободная циркуляция воздуха в будке способствует тому, что температура внутренней стены меняется в соответствии с изменениями температуры окружающего воздуха. Таким образом, уменьшается влияние внутренней стены на температуру термометра. Кроме того, свободная циркуляция воздуха внутри будки способствует тому, что термометр быстрее реагирует на изменения температуры окружающего воздуха, чем в условиях только радиационного обмена. Однако воздух, циркулирующий в будке, определенное время контактирует с внешними стенами и поэтому его температура может отличаться от температуры воздуха, окружающего будку. Эти отличия становятся заметными, когда ветер слаб, а температура внешней стены значительно отличается от температуры окружающего воздуха. Таким образом, можно ожидать, что температура воздуха в будке днем при сильном солнечном сиянии и слабом ветре будет выше истинной температуры воздуха, а в ясную тихую ночь — несколько ниже, причем в экстремальных случаях погрешности могут достигать 2,5 и –0,5 K соответственно. Дополнительные погрешности могут быть вызваны охлаждением за счет испарения с мокрой поверхности будки после дождя. Все эти факторы оказывают влияние и на показания других приборов, находящихся в будке, таких, как гигрометры, испарители и т. п.

Погрешности, возникающие вследствие изменений естественной вентиляции, можно уменьшить, если установить в будке соответствующим образом спроектированную систему принудительной вентиляции, которая обеспечивает постоянную и определенную скорость вентилирования, по крайней мере при малых скоростях ветра. Следует обратить особое внимание на конструкцию таких систем с тем, чтобы тепло от вентилятора или другого электрического двигателя не влияло на температуру в будке.

В целом необходима лишь одна дверь при условии, что будка расположена таким образом, что солнце не светит на термометры, когда дверь открыта во время наблюдения. В тропиках необходимы две двери, используемые в различные периоды года. В полярных районах (где солнце светит под низким углом) также следует принять меры по защите внутренней части будки от прямых солнечных лучей; сделать это можно с помощью затенения или использования экрана, закрепленного таким образом, чтобы его можно было поворачивать под соответствующим углом в то время, когда дверь открыта для снятия показаний.

Хотя большинство будок все еще изготавливается из дерева, некоторые последние модели, выполненные с применением пластиковых материалов, имеют более эффективную радиационную защиту благодаря усовершенствованию жалюзи, обеспечивающих более интенсивную циркуляцию воздуха. В любом случае будка и подставка должны быть сделаны из твердых материалов и неподвижно закреплены с таким расчетом, чтобы свести к минимуму погрешности максимальных и минимальных термометров, вызываемые ветровой вибрацией. В тех местах, где нельзя полностью избавиться от ветровой вибрации, рекомендуется использовать кронштейны гибкого крепления. Земля под будкой должна иметь травяное покрытие, а в тех местах, где трава не растет, — естественное покрытие, характерное для данного района.

Будка должна содержаться в чистоте и регулярно перекрашиваться; во многих районах достаточно проводить покраску один раз в два года, но в районах, подверженных атмосферному загрязнению, необходимо делать это, по крайней мере, один раз в год.

2.5.2 Другие искусственно вентилируемые средства защиты

Основной альтернативой установкой термометра в жалюзийной будке с естественной или искусственной вентиляцией является защита резервуара термометра от прямой солнечной радиации двумя концентрическими цилиндрами и создание потока воздуха, проходящего (со скоростью между 2,5 и 10 $м \cdot с^{-1}$) между ними и обтекающего резервуар термометра. Такой тип установки обычен для аспирационных психрометров (см. настоящий том, глава 4). В принципе, защита должна быть изготовлена из термоизоляционного материала, хотя в психрометре Асмана щитки сделаны из чисто отполированного металла для того, чтобы уменьшить количество поглощаемой ими солнечной радиации. При измерениях внутренний щиток поддерживается в соприкосновении с потоком воздуха,

перемещающимся вокруг него с таким расчетом, чтобы его температура и, следовательно, температура термометра могли являться максимальным приближением к температуре воздуха. Подобные щитки обычно крепятся таким образом, чтобы их оси имели вертикальное положение. Количество излучения, поступающего через основание таких щитков от земли, невелико и может быть уменьшено за счет значительного удлинения щитков ниже резервуара термометра. Когда искусственная вентиляция обеспечивается с помощью электрического вентилятора, следует принять меры для того, чтобы предотвратить поступление тепла от мотора и вентилятора к термометрам.

В конструкции эталонного психрометра ВМО особое значение придается влиянию радиации и использованию искусственной вентиляции, а также экранированию с целью поддержания элемента термометра в равновесии с истинной температурой воздуха (см. часть I, глава 4).

2.6 ОБЕСПЕЧЕНИЕ ПРОСЛЕЖИВАЕМОСТИ И КАЛИБРОВКА

Национальная метеорологическая или другая аккредитованная поверочная лаборатория должны иметь в качестве рабочего эталона высококачественный ПТС, соответствующий национальному и международному эталонам (WMO, 2010). Высококачественный ПТС может представлять собой ПТС или ЭПТС. ЭПТС должны прослеживаться до национального и международного уровня путем внешней калибровки по выбранным реперным точкам (см. таблицу в приложении). Поскольку ЭПТС представляют собой современные термометры с самой низкой погрешностью, для проведения лабораторных процедур необходимо дополнительное лабораторное оборудование (измерительный мост, эталонные резисторы и т. д.) и методы, обеспечивающие наилучшее использование возможностей прибора. Работоспособность ЭПТС можно периодически проверять в камере тройной точки воды. Тройная точка воды может воспроизводиться в камере тройной точки воды с погрешностью $1 \cdot 10^{-4}$ K. ПТС должны прослеживаться до национального и международного уровня путем внешней сравнительной калибровки в интересующем метеорологическом диапазоне. ЭПТС или ПТС используются в лабораториях калибровки для распространения значений на рабочие эталоны и/или калибруемые приборы, обычно с помощью сравнительной калибровки. Все лабораторное оборудование, используемое в процессе калибровки, вносит вклад в погрешность измерений и должно прослеживаться до СИ в соответствии со стратегией прослеживаемости (см. настоящий том, глава 1, приложение 1.B).

Сравнительная калибровка обычно выполняется путем измерения эталонного стандарта и сопротивления или напряжения калибруемого прибора при воздействии стабильной температуры во всем интересующем температурном диапазоне. По сути, требуется четыре типа инструментов:

– контрольный эталон;

– система сбора данных для контрольного эталона;

– система сбора данных для калибруемого прибора;

– источник стабильной температуры.

Перед использованием контрольный эталон следует проверить в точке замерзания или тройной точке воды, чтобы убедиться, что с момента предыдущей калибровки прибора сопротивление существенно не изменилось. Внешняя калибровка контрольного эталона должна проводиться с интервалами, зависящими от частоты использования и температурного диапазона. Необходимо применять внутренние процедуры обеспечения качества (избыточные проверки стабильности).

При калибровке термометра сопротивления по контрольному ПТС или ЭПТС технические требования к считывающим устройствам будут одинаковы как для калибруемых приборов,

так и для контрольного термометра. При наличии системы мультиплексирования одно устройство считывания обычно может использоваться для обеих систем. Это возможно в том случае, если устройство считывания предназначено для калибровки температуры (а не только для измерения температуры) и имеет переменные настройки (ток, время и так далее). Однако если считывающее устройство не предназначено для калибровки температуры и/или отсутствует система переключения, то потребуется два считывающих устройства или более. Наилучшие результаты будут получены при использовании считывающих устройств, специально предназначенных для калибровки термометров. В отношении ПТС и ЭПТС необходимо учитывать два важных момента:

– убедитесь, что считывающее устройство имеет диапазон сопротивления, соответствующий эталонному термометру и калибруемым приборам, для которых оно предназначено. Многие современные устройства для снятия показаний термометров разработаны таким образом, чтобы охватывать этот интервал в едином диапазоне;

– убедитесь, что в считывающем устройстве используется надлежащий ток источника. Неправильный ток источника приведет к чрезмерному саморазогреву и неправильной калибровке.

Во время калибровки термометры помещаются в теплоноситель в источнике температуры. Теплоносителем может служить перемешиваемая жидкость, металлический блок или воздух. Теплоноситель поддерживает постоянную и равномерную температурную среду, что позволяет сравнивать показания тестируемого термометра с показаниями более точного термометра. Калибровочную ванну или камеру нельзя считать полностью стабильной во времени и однородной по всему объему, особенно когда калибровка температуры путем сравнения проводится при самых малых погрешностях. Это обычно представляет собой значительный вклад в общую погрешность процедуры калибровки. Для уменьшения этого вклада в погрешность в калибровочных ваннах можно использовать выравнивающие блоки. Размер такого блока определяется размером ванны.

Погрешность измерения при калибровке термометра зависит от используемого метода калибровки, вклада в погрешность эталонов, характеристик используемого измерительного оборудования и характеристик калибруемого прибора.

В целом, интервалы между калибровками зависят от условий эксплуатации. Поскольку различные устройства для измерения температуры могут использоваться в самых разных условиях, не всегда можно установить точные интервалы калибровки. В таких случаях необходимо иметь данные (например, результаты регулярных проверок «между калибровками»), чтобы продемонстрировать, что интервалы калибровки выбраны таким образом, чтобы калибровка проводилась до значительного изменения калибровочных поправок.

ПРИЛОЖЕНИЕ. ОПРЕДЕЛЕНИЕ РЕПЕРНЫХ ТОЧЕК МЕЖДУНАРОДНОЙ ТЕМПЕРАТУРНОЙ ШКАЛЫ, ПРИНЯТОЙ В 1990 ГОДУ

Реперные точки МТШ-90, представляющие интерес для метеорологических измерений, приведены в таблице ниже.

Стандартный метод интерполяции реперных точек заключается в использовании формул, применяемых для установления связи между показаниями эталонных приборов и значений МТШ-90 (BIPM, 1990). Эталонным прибором, применяемым в диапазоне от –259,34 °C до 961,78 °C, является ПТС.

Альтернативным практическим методом аппроксимации МТШ-90 при калибровке ПТС (определение R_0, A, B и C, см. уравнение ниже) является получение данных о зависимости сопротивление-температура путем сравнения с градуированным ЭПТС при различных температурах в диапазоне, представляющем интерес, а потом выбор полинома для данных с помощью метода наименьших квадратов.

Связь между сопротивлением ПТС, проходящего калибровку, и температурой, измеренной с использованием эталонного термометра, описывается с помощью уравнения интерполяции. Уравнение Каллендара —Ван Дьюзена в общем и целом признается в качестве уравнения интерполяции для промышленных ПТС (определено в МЭК 60751 (2008)), а не для ЭПТС:

$$R = R_0\left(1 + At + Bt^2 + C\left(t - 100\right)t^3\right)$$

где R — сопротивление платиновой проволоки при температуре t, R_0 — ее сопротивление при 0 °C (температура таяния льда), а A, B и C ($C = 0$ для $t > 0$ °C) — константы, которые получают, используя метод наименьших квадратов на основании данных, полученных во время калибровки.

Определение реперных точек по МТШ-90 в метеорологическом диапазоне

Состояние равновесия	*Присвоенное значение МТШ*	
	K	°C
Равновесие между твердой, жидкой и парообразной фазами аргона (тройная точка аргона)	83,805 8	–189,344 2
Равновесие между твердой, жидкой и парообразной фазами ртути (тройная точка ртути)	234,315 6	–38,834 4
Равновесие между твердой, жидкой и парообразной фазами воды (тройная точка воды)	273,160 0	0,01
Равновесие между твердой и жидкой фазами галлия (точка замерзания галлия)	302,914 6	29,764 6
Равновесие между твердой и жидкой фазами индия (точка замерзания индия)	429,748 5	156,598 5

СПРАВОЧНАЯ И ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ЛИТЕРАТУРА

Andersson, T. and I. Mattison, 1991: *A Field Test of Thermometer Screens*. SMHI Report No. RMK 62, Norrköping.

ASTM, 1993: *ASTM Manual on The Use of Thermocouples in Temperature Measurement*. Philadelphia, ASTM.

Bentley, R.E. (Ed.), 1998: *Temperature and Humidity Measurement*. Singapore, Springer-Verlag.

Bugbee, B., O. Monje and B. Tanner, 1996: Quantifying energy and mass transfer in crop canopies. *Advances in Space Research*, 18:149–156.

Bureau International des Poids et Mesures, 1989: *Procès-Verbaux du Comité International des Poids et Mesures*, 78th meeting, 1989, Paris (available from http://www.bipm.org/utils/common/pdf/its-90/ITS-90.pdf).

Bureau International des Poids et Mesures/Comité Consultatif de Thermométrie, 1990: The International Temperature Scale of 1990 (ITS-90) (H. Preston-Thomas). *Metrologia*, 27:3–10 (amended version) (available from http://www.bipm.org/utils/common/pdf/its-90/ITS-90_metrologia.pdf).

Çengal, Y.A. and A.J. Ghajar, 2014: *Heat and Mass Transfer: Fundamentals and Application.* Fifth edition. New York, McGraw-Hill Education.

Diamond, H. J., T.R. Karl, M.A. Palecki, C.B. Baker, J.E. Bell, R.D. Leeper, D.R. Easterling, J.H. Lawrimore, T.P. Meyers, M.R. Helfert, G. Goodge and P.W. Thorne, 2013: U.S. Climate Reference Network after one decade of operations: status and assessment. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 94:489–498, doi: 10.1175/BAMS-D-12-00170.1.

Erell, E., V. Leal and E. Maldonaldo, 2005: Measurement of air temperature in the presence of a large radiant flux: an assessment of passively ventilated thermometer screens. *Boundary Layer Meteorology*, 114:205–231.

Harrison, R.G., 2010: Natural ventilation effects on temperatures within Stevenson screens. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 136(646)A:253–259, DOI: 10.1002/qj.537.

———, 2015: *Meteorological Measurements and Instrumentation.* Chichester, Wiley.

Harrison R.G. and M.A. Pedder, 2001: Fine wire thermometer for air measurement. *Review of Scientific Instruments*, 72(2):1539–1541.

Harrison, R.G. and G.W Rogers, 2006: Fine wire thermometer amplifier for atmospheric measurements. *Review of Scientific Instruments*, 77(11):116112.

Harvey, A.H., M.O. McLinden and W.L. Tew, 2013: Thermodynamic analysis and experimental study of the effect of atmospheric pressure on the ice point. *AIP Conference Proceedings.* 1552:221, doi: 10.1063/1.4819543.

Her Majesty's Stationery Office/Meteorological Office, 1980: *Handbook of Meteorological Instruments*, Volume 2: Measurement of temperature. London.

Incropera, F.P. and D.P. de Witt, 2011: *Fundamentals of Heat and Mass Transfer.* Chichester, Wiley.

International Electrotechnical Commission, 2008: *Industrial Platinum Resistance Thermometers and Platinum Temperature Sensors*, IEC 60751:2008. Geneva.

International Organization for Standardization, 2007: *Meteorology – Air Temperature Measurements – Test Methods for Comparing the Performance of Thermometer Shields/Screens and Defining Important Characteristics*, ISO/DIS 17714:2007. Geneva.

Jones, E.B., 1992: *Jones' Instrument Technology.* Volume 2: Measurement of temperature and chemical composition, Butterworths-Heinemann, Oxford.

Middleton, W.E.K. and A.F. Spilhaus, 1960: *Meteorological Instruments*. University of Toronto Press.

Ney, E.P., R.W. Maas and W.F. Huch, 1960: The measurement of atmospheric temperature. *Journal of Meteorology*, 18:60–80.

Nicholas, J.V. and D.R. White, 1993: *Traceable Temperatures*. Second edition. Chichester, Wiley.

Quinn, T.J., 1990: *Temperature.* Second edition. San Diego, Academic Press.

Richiardone, R., M. Manfrin, S. Ferrarese, C. Francone, V. Fernicola, R. M. Gavioso and L. Mortarini, 2012: Influence of the Sonic Anemometer Calibration on Turbulent Heat-Flux Measurements. *Boundary-Layer Meteorology*, 142(3):425–442.

Schotanus, P., F.T.M. Nieuwstadt and H.A.R e Bruin, 1983: Temperature measurement with a sonic anemometer and its application to heat and moisture fluxes. *Boundary-Layer Meteorol.* 26:81–93.

Sparks, W.R., 1970: Current concepts of temperature measurement applicable to synoptic networks. *Meteorological Monographs*, 11(33):247–251.

———, 2001: Field trial of Metspec screens. *Technical Report TR19*, Met Office/OD, Wokingham, United Kingdom of Great Britain and Northern Ireland.

Underwood, R., M. de Podesta, G. Sutton, L. Stanger, R. Rusby, P Harris, P. Morantz and G. Machin, 2017: Further estimates of ($T - T_{90}$) close to the triple point of water. *International Journal of Thermophysics*, 38:44.

Underwood, R., T. Gardiner, A. Finlayson, S. Bell and M. de Podesta, 2017: An improved non-contact thermometer and hygrometer with rapid response. *Metrologia*, 54(1):S9.

Underwood, R., T. Gardiner, A. Finlayson, J. Few, J. Wilkinson, S. Bell, J. Merrison, J.J. Iverson and M. de Podesta, 2015: A combined non-contact acoustic thermometer and infrared hygrometer for atmospheric measurements. *Meteorological Applications*, 22:830–835.

White, D.R., 2015: Temperature errors in linearizing resistance networks for thermistors. *International Journal of Thermophysics*, 36:3404–3420, DOI 10.1007/s10765-015-1968-2.

———, 2017: Interpolation errors in thermistor calibration equations. *International Journal of Thermophysics*, 38(4):59, DOI 10.1007/s10765-017-2194-x.

World Meteorological Organization, 1972: *The Effect of Thermometer Screen Design on the Observed Temperature* (W.R. Sparks). (WMO-No. 315). Geneva.

———, 1992: *Measurement of Temperature and Humidity: Specification, Construction, Properties and Use of the WMO Reference Psychrometer* (R.G. Wylie and T. Lalas). Technical Note No. 194 (WMO-No. 759). Geneva.

———, 1998*a*: *Recent Changes in Thermometer Screen Design and their Impact* (A. Barnett, D.B. Hatton and D.W. Jones). Instruments and Observing Methods Report No. 66 (WMO/TD-No. 871). Geneva.

———, 1998*b*: An investigation of temperature screens and their impact on temperature measurements (J. Warne). Paper presented at the WMO Technical Conference on Meteorological and Environmental Instruments and Methods of Observation (TECO-98). Instruments and Observing Methods Report No. 70 (WMO/TD-No. 877). Geneva.

———, 1998*c*: A thermometer screen intercomparison (J.P. van der Meulen). Paper presented at the WMO Technical Conference on Meteorological and Environmental Instruments and Methods of Observation (TECO-98). Instruments and Observing Methods Report No. 70 (WMO/TD-No. 877). Geneva.

———, 1998*d*: Comparison of meteorological screens for temperature measurement (G. Lefebvre). Paper presented at the WMO Technical Conference on Meteorological and Environmental Instruments and Methods of Observation (TECO-98). Instruments and Observing Methods Report No. 70 (WMO/TD-No. 877). Geneva.

———, 2000*a*: A comparison of air temperature radiation screens by field experiments and computational fluid dynamics (CFD) simulations (A. Spetalen, C. Lofseik and P. Ø. Nordli). Paper presented at the WMO Technical Conference on Meteorological and Environmental Instruments and Methods of Observation (TECO-2000). Instruments and Observing Methods Report No. 74 (WMO/TD-No. 1028). Geneva.

———, 2000*b*: Temperature measurements: Some considerations for the intercomparison of radiation screens (J.P. van der Meulen). Paper presented at the WMO Technical Conference on Meteorological and Environmental Instruments and Methods of Observation (TECO-2000). Instruments and Observing Methods Report No. 74 (WMO/TD-No. 1028). Geneva.

———, 2002*a*: Measurement of temperature with wind sensors during severe winter conditions (M. Musa, S. Suter, R. Hyvönen, M. Leroy, J. Rast and B. Tammelin). Paper presented at the WMO Technical Conference on Meteorological and Environmental Instruments and Methods of Observation (TECO-2002). Instruments and Observing Methods Report No. 75 (WMO/TD-No. 1123). Geneva.

———, 2002*b*: Norwegian national thermometer screen intercomparison (M.H. Larre and K. Hegg). Paper presented at the WMO Technical Conference on Meteorological and Environmental Instruments and Methods of Observation (TECO-2002). Instruments and Observing Methods Report No. 75 (WMO/TD-No. 1123). Geneva.

———, 2002*c*: Results of an intercomparison of wooden and plastic thermometer screens (D.B. Hatton). Paper presented at the WMO Technical Conference on Meteorological and Environmental Instruments and Methods of Observation (TECO-2002). Instruments and Observing Methods Report No. 75 (WMO/TD-No. 1123). Geneva.

———, 2002*d*: Temperature and humidity measurements during icing conditions (M. Leroy, B. Tammelin, R. Hyvönen, J. Rast and M. Musa). Paper presented at the WMO Technical Conference on Meteorological and Environmental Instruments and Methods of Observation (TECO-2002). Instruments and Observing Methods Report No. 75 (WMO/TD-No. 1123). Geneva.

———, 2010: *Guidance on Instrumentation for Calibration Laboratories, Including Regional Instrument Centres* (D. Groselj) (WMO/TD-No. 1543). Instruments and Observing Methods Report No. 101. Geneva.

———, 2011: *WMO Field Intercomparison of Thermometer Screens/Shields and Humidity Measuring Instruments* (M. Lacombe, D. Bousri, M. Leroy and M. Mezred). Instruments and Observing Methods Report No. 106 (WMO/TD-No. 1579). Geneva.

Zanghi, F., 1987: *Comparaison des Abris Météorologiques*. Technical Memorandum No. 11, Météo-France/SETIM, Trappes.

ГЛАВА 3. ИЗМЕРЕНИЕ АТМОСФЕРНОГО ДАВЛЕНИЯ

3.1 ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

3.1.1 Определение

Атмосферное давление на данную горизонтальную поверхность — это сила, действующая на единицу площади этой поверхности, обусловленная весом вышележащей атмосферы. Давление, таким образом, равно весу вертикального столба воздуха с основанием в единицу площади, простирающегося от рассматриваемой поверхности до внешней границы атмосферы.

Кроме фактического давления следует также определять изменение давления или барическую тенденцию. Барическая тенденция — это характер и величина изменения атмосферного давления за трехчасовой или другой конкретный период времени, заканчивающийся в срок наблюдения. Барическая тенденция состоит из двух частей, а именно: изменение давления и характеристика изменения давления. Значение барической тенденции определяется как разность между показаниями атмосферного давления в начале и конце указанного интервала времени. Характеристика атмосферного давления показывает, как менялось давление за этот период времени, например, падение, затем рост или рост и затем более быстрый рост.

3.1.2 Единицы измерения и шкалы

Основной единицей измерения атмосферного давления является паскаль (Па) — ньютон на квадратный метр ($Н \cdot м^{-2}$). Общепринятой практикой является прибавление приставки «гекто» к этой единице при сообщениях давления для метеорологических целей, при этом один гектопаскаль (гПа) равен 100 Па. Это объясняется главным образом тем, что один гектопаскаль (гПа) равен одному миллибару (мбар) — использовавшейся ранее единице. Более подробная информация об обязательном использовании единиц СИ приводится в настоящем томе, глава 1. Обратите внимание, что единицы, используемые для показаний барометра, такие как «мм рт. ст.», «в рт. ст.» или «мбар», не определены в СИ и не могут использоваться для международного обмена данными при сообщении об атмосферном давлении (см. также приложение 3.А к данной главе).

В этой главе используется только единица измерения гПа.

3.1.3 Метеорологические требования

Фундаментальной потребностью науки метеорологии является необходимость иметь проанализированные поля давления. При этом такие поля давления должны быть правильно определены, поскольку они составляют основу для всех последующих прогнозов состояния атмосферы. Измерения давления должны быть настолько точными, насколько это позволяет сделать применяемая технология и реалистичные финансовые ограничения, а измерения и процедуры калибровки должны быть унифицированными как в национальном, так и в международном плане.

Соответствующие комиссии ВМО определили необходимый уровень точности измерений давления для удовлетворения потребностей в интересах различных метеорологических применений; этот уровень описан в настоящем томе, глава 1, приложение 1.А, и является основным эталоном для спецификаций измерений в настоящем Руководстве.

Эти требования должны считаться достижимыми для новых барометров, размещаемых в строго контролируемой среде, такой как среда в должным образом оборудованной лаборатории. Такие лаборатории обеспечивают соответствующую требуемую погрешность барометров перед их установкой в рабочей среде.

Для НМГС практические ограничения потребуют хорошо спроектированного оборудования для поддержания такой погрешности барометров, установленных в окружающей среде. Особого внимания требует не только сам барометр, но и его установка. Тем не менее, характеристики барометра на станции, входящей в оперативную сеть, должны быть не хуже заявленных требований.

3.1.4 Методы измерений и наблюдений

3.1.4.1 *Общие принципы измерений*

Для метеорологических целей атмосферное давление обычно измеряется электронными барометрами, барометрами-анероидами или гипсотермометрами. Последний класс приборов, основанных на использовании зависимости точки кипения (температуры) воды от атмосферного давления, имеет ограниченное применение, и не будет обсуждаться подробно в настоящей публикации.

Ртутные барометры по-прежнему находятся в эксплуатации, но их больше не рекомендуется применять с учетом Минаматской конвенции о ртути (см. настоящий том, глава 1, п. 1.4.2). НМГС рекомендуется срочно принять надлежащие меры для замены ртутных барометров на современные альтернативы (см. п. 3.1.4.5). Информация о методах наблюдений с использованием ртутных барометров оставлена в приложении 3.A только для того, чтобы проинформировать читателя об этой устаревшей практике.

В большинстве барометров последней конструкции используются датчики, реакция которых преобразуется в соответствующие значения давления. Впоследствии эти значения обрабатываются с использованием соответствующих электрических интегрирующих схем или систем получения данных с соответствующими алгоритмами сглаживания. Для синоптических целей желательна постоянная времени, равная примерно 10 с (и не более 20 с).

Для измерения атмосферного давления существуют несколько общих методов, которые описаны в последующих разделах.

Мембрана из эластичного материала, закрепленная по краям, будет деформироваться, если давление на одной стороне больше, чем на другой. На практике используется запаянная металлическая коробка, полностью или частично вакуумированная, с сильной металлической пружиной для предотвращения разрушения коробки под воздействием внешнего атмосферного давления. Для измерений деформации под воздействием разности давления между внутренней и внешней частями коробки используются механические и электрические средства. Это принцип хорошо известного барометра-анероида.

В настоящее время разрабатываются элементы датчика давления, в которые входят тонкостенные цилиндры из никелевого сплава, находящиеся в вакууме. Опорная резонансная частота этих цилиндров изменяется в зависимости от разности давления внутри цилиндра, которое представляет собой атмосферное давление, и вне цилиндра, сохраняющегося в вакууме. По сути, эти приборы измеряют давление путем определения плотности газа (воздуха) внутри.

Широкое распространение получили датчики абсолютного давления, в которых используется кварцевый кристаллический элемент. Оказываемое через гофрированные мембраны на поверхность кристалла давление вызывает силу сжатия, воздействующую на кристалл. Вследствие пьезорезистивных свойств кристалла при воздействии

давления изменяется баланс активного моста Уитстона. Балансирование моста позволяет обеспечить точное определение давления. Датчики давления такого типа в конечном итоге не подвергаются воздействиям гистерезиса.

3.1.4.2 *Общие требования к размещению*

Важное значение имеет тщательный выбор местоположения барометров на наблюдательных станциях. К основным требованиям относятся хорошее освещение для считывания показаний (в случае их снятия вручную), отсутствие сквозняков, надежное крепление, не допускающее вибрации, а также защита от грубого обращения.

Для предотвращения искусственного воздействия ветра необходимо уделить вопросу размещения особое внимание. Такое воздействие характерно для измерений в помещениях из-за повышения давления снаружи здания, что приводит к появлению ошибок, которые иногда превышают 1 гПа. Более подробная информация приводится в п. 3.1.4.3.2.

3.1.4.3 *Источники погрешностей: общие замечания*

Ошибки при измерении давления могут возникать из-за неправильного размещения прибора. Прибор должен располагаться в среде, где внешние воздействия не приводят к ошибкам измерений. К таким воздействиям относятся ветер, радиация и температура, удары и вибрация, колебания в обеспечении электрической энергией и скачки давления. Важно, чтобы все наблюдатели-метеорологи или технический персонал в полной мере понимали эти воздействия и могли оценить, оказывает ли какой-либо из этих факторов влияние на точность показаний используемого барометра.

В случае снятия показаний вручную прибор (или его дисплей) должен быть легко читаемым. Приборы должны быть спроектированы таким образом, чтобы разрешение их показаний было лучше, чем требуемая погрешность измерений, то есть чтобы ошибка округления не увеличивала существенно погрешность результатов измерений.

3.1.4.3.1 **Воздействие температуры**

Колебания температуры не должны влиять на показания приборов. Приборы пригодны только в том случае, если выполняется хотя бы одно из следующих условий:

a) конструкцией прибора предусмотрено, что температура не оказывает воздействия на его работу, или это воздействие компенсируется во всем диапазоне температур, что должно быть подтверждено надлежащей калибровкой и испытаниями;

b) разработаны и применяются процедуры для внесения температурных поправок в показания, которые обеспечивают необходимую погрешность;

c) элемент, измеряющий давление, располагается в среде, где температура стабилизируется таким образом, чтобы обеспечивать требуемую погрешность.

В большинстве приборов измеряется температура датчика давления с тем, чтобы компенсировать влияние температуры. Необходимо контролировать и проводить калибровку температурной компенсации при проведении стандартной калибровки датчиков давления.

3.1.4.3.2 **Влияние ветра**

Следует отметить, что ветер оказывает воздействие на все типы барометров. Более подробные данные о воздействии ветра можно получить из работы Liu and Darkow (1989).

Барометр не даст точное показание статического давления, если на него оказывает влияние порыв ветра. Его показания будут флуктуировать в зависимости от скорости и направления ветра, величины и знака флуктуации ветра, зависящих от характера открытых проемов помещения и их положения по отношению к направлению ветра. На море ошибка всегда присутствует в связи с движением судна. Аналогичная проблема возникает, если барометр установлен в помещении с кондиционером.

Ветер часто может вызывать динамические изменения давления в помещении, где располагается барометр. Эти изменения накладываются на статическое давление и при сильном и порывистом ветре могут достигать 2 или 3 гПа. Обычно не имеет смысла вводить коррекцию на такие флуктуации, поскольку «накачивающее» воздействие зависит как от направления, так и от силы ветра, а также от местных условий, в которых находится барометр. Таким образом, даже «среднее значение» не представляет собой действительное статическое давление. Поэтому при сравнении двух барометров, находящихся в различных зданиях, необходимо иметь в виду, что возможны различия в показаниях вследствие влияния ветра.

Это влияние можно существенно уменьшить с помощью статической насадки между атмосферой снаружи и входным отверстием барометра. Подробные сведения, касающиеся принципов использования статических насадок, можно найти в различных публикациях (Miksad, 1976; United States Weather Bureau, 1963). Анероидные и электронные барометры обычно имеют простые соединения, позволяющие использовать статическую насадку, которая должна находиться на открытой местности и не подвергаться воздействию расположенных поблизости зданий. Выбор конструкции такой насадки требует особого внимания. Насадки статического давления коммерчески доступны, однако опубликованные данные взаимных сравнений для демонстрации их характеристик скудны.

3.1.4.3.3 **Воздействие кондиционирования воздуха**

Кондиционирование воздуха может вызвать значительную разность давления внутри и снаружи помещения. Поэтому если барометр устанавливается в помещении, где есть кондиционер воздуха, то следует использовать статическую насадку с барометром, которая соединит его с воздухом снаружи здания.

3.1.4.3.4 **Воздействие гистерезиса**

Некоторые барометры (в частности, анероидные барометры) подвержены воздействию гистерезиса, который превышает 0,1 гПа. Чтобы продемонстрировать, что любой гистерезис находится в пределах требуемой погрешности измерений, калибровки должны проводиться как при пошаговом повышении, так и при понижении давления.

3.1.4.3.5 **Транспортировка и использование в нестабильной среде**

Барометры могут быть чувствительны к вибрациям и ударам, что влияет на настройку оборудования. Особое внимание следует уделять тому, чтобы не допускать ударных воздействий при транспортировке, и приборы должны размещаться в среде без вибраций.

3.1.4.4 ***Уход за приборами: общие положения***

Рассмотрим следующие процедуры по техническому обслуживанию приборов:

a) приборы и особенно входное отверстие приемника давления должны содержаться в чистоте и не засоряться;

b) необходимо регулярно проверять высоту установки чувствительного элемента и его крепление;

c) приборы необходимо регулярно калибровать (и при необходимости регулировать); интервал между двумя калибровками должен быть достаточно коротким с тем, чтобы суммарная абсолютная погрешность измерения удовлетворяла требованиям к погрешности;

d) любые изменения погрешности (долгосрочного или краткосрочного характера) должны быть намного меньше значений, приведенных в настоящем томе, глава 1, приложение 1.A. Если у каких-либо приборов имеется история дрейфа калибровки, эти приборы могут быть пригодны для оперативного использования лишь в том случае, если период между калибровками является достаточно коротким, с тем чтобы обеспечить необходимую погрешность измерения во все сроки;

e) когда необходимо откалибровать прибор на удалении от места его оперативного использования, способ транспортировки не должен оказывать воздействия на стабильность или точность прибора; к воздействиям, которые могут изменить калибровку прибора, относятся механические удары и вибрация, отклонение от вертикального положения и значительные колебания давления, которые могут возникнуть во время транспортировки воздушным транспортом.

3.1.4.5 *Последствия Минаматской конвенции с точки зрения измерения давления*

Минаматская конвенция ЮНЕП о ртути вступила в силу во всем мире в августе 2017 года и запрещает любое производство, импорт и экспорт ртутных барометров (см. настоящий том, глава 1, п. 1.4.2). В связи с этим больше не рекомендуется применять ртутные барометры, и настоятельно поощряется принятие надлежащих мер для замены таких барометров на современные альтернативы. Электронные барометры представляют собой экономичную, точную и надежную альтернативу таким опасным ртутным приборам и обеспечивают значительные преимущества в плане хранения данных и отображения информации в режиме реального времени.

3.2 ЭЛЕКТРОННЫЕ БАРОМЕТРЫ

В большинстве барометров современной конструкции используются датчики, которые переводят реакцию датчика на изменение давления в электрические сигналы. К ним могут относиться аналоговые сигналы, например напряжение (DC или AC с частотой, связанной с действительным давлением), или цифровые, например пульсация частоты или стандартные протоколы данных связи, такие, как RS232, RS422, RS485 или IEEE488. Аналоговые сигналы могут выводиться на дисплеи разнообразных электронных счетчиков. Для вывода на дисплей цифровых данных или оцифрованных аналоговых данных часто используются мониторы и системы получения данных, подобные тем, которые применяются в АМС.

Для повышения точности измерений и достижения длительной стабильности технологии современных цифровых барометров постоянно совершенствуются. Один из методов состоит в использовании трех независимо работающих датчиков под управлением одного микропроцессора. Еще более высокую надежность и стабильность можно достичь при использовании трех абсолютно независимых барометров, включающих три комплекта датчиков давления и микропроцессоров. В каждом комплекте происходит автоматическая компенсация на температуру за счет встроенных датчиков температуры. Тройное приведение обеспечивает отличную длительную стабильность и точность измерений даже в самых экстремальных условиях. Такие подходы позволяют обеспечивать постоянный мониторинг и проверку характеристик отдельного датчика.

3.2.1 Емкостные датчики с переменной емкостью на основе интегральных схем

В емкостных датчиках давления используется электрическое свойство емкости для измерения смещения диафрагмы. Диафрагма представляет собой упругий датчик давления, смещающийся пропорционально изменениям давления. Она действует как одна пластина конденсатора, который фиксирует деформацию из-за приложенного давления и становится переменным конденсатором. Изменение емкости вызывает изменение этого электрического сигнала. Затем он преобразуется и выводится на устройстве, откалиброванном по давлению. Общепринятой технологией является использование металлических, керамических и кремниевых диафрагм. Поскольку значение этого измерения зависит от температуры, также измеряется температура датчика для ее компенсации, чтобы датчик отвечал требованиям точности.

Сегодня в технологии интегральных схем часто применяются датчики с кремниевой мембраной (размером около 1 мкм). В этом методе абсолютное давление измеряется с помощью вакуумной камеры (при давлении менее 10^{-3} гПа).

3.2.2 Цифровые пьезорезистивные барометры

Измерения атмосферного давления стали возможными с использованием пьезоэлектрического (пьезорезистивного) эффекта. Общая схема состоит в том, что четыре измерительных сопротивления, помещенные на гибкой поверхности монолитной кремниевой подложки, соединены между собой таким образом, чтобы образовать мост Уитстона.

В цифровых пьезорезистивных барометрах используются датчики, представляющие собой элементы кристаллического кварца с осевой нагрузкой, при этом они являются датчиками абсолютного давления. Кристаллический кварц выбран из-за его пьезоэлектрических свойств, стабильности частотных характеристик, малой подверженности температурным воздействиям и точно воспроизводимых частотных характеристик. Давление, оказываемое на впускное окно, вызывает осевую подъемную силу с помощью подвижных чашечек, в результате чего на кристаллический кварцевый элемент оказывает воздействие сила давления. Поскольку кристаллический элемент представляет собой довольно жесткую мембрану, то при регистрации изменений давления напрягается вся механическая часть барометра, в результате чего устраняется механический гистерезис.

Упомянутый выше действующий мост Уитстона может состоять либо из полупроводниковых датчиков напряжения, либо из пьезорезистивных датчиков. Датчики напряжения либо связаны с тонкой круглой диафрагмой, которая зажата по окружности, либо автоматически преобразуются в кремниевый контур в форме диафрагмы. В диффузных приборах сама кремниевая интегрированная пластина является диафрагмой. Прилагаемое давление представляет собой распределенную нагрузку на диафрагму, которая в свою очередь обеспечивает изгибающие усилия и результирующие напряжения, на которые реагируют тензодатчики и которые создают напряжение, пропорциональное прилагаемому давлению, в результате чего возникает разбалансирование моста. Выходные данные моста пропорциональны изменению давления, действующего на диафрагму.

Этот принцип работы основан на том, что атмосферное давление воздействует на элемент датчика, покрывающий небольшую камеру, из которой откачан воздух. Через нее сопротивления подвергаются силам сжатия и растяжения. Вследствие пьезоэлектрического эффекта величины сопротивления изменяются пропорционально атмосферному давлению. Чтобы избежать ошибок за счет температурных воздействий, прибор часто встраивается в термостат.

Выходной сигнал постоянного тока моста Уитстона преобразуется в стандартный сигнал с помощью соответствующего усилителя. Обычно величина измеряемого давления представляется на светодиоде (СИД) или на жидкокристаллическом мониторе.

В современном варианте пьезоэлектрического датчика давления определяются две резонансные частоты пьезоэлектрического элемента. Путем расчета линейных функций этих частот и применения соответствующего комплекта параметров, полученных после калибровки, с помощью микропроцессора, который не зависит от температуры датчика, рассчитывается давление.

3.2.3 Вибрационно-частотные барометры

В вибрационно-частотных барометрах в качестве измерительного элемента используется тонкостенный цилиндр из никелевого сплава. С помощью электромагнитного поля он поддерживается в режиме вибрации. Изменение давления вызывает изменение опорной резонансной частоты вибрирующей механической системы. Вибрация стенок цилиндра измеряется принимающей катушкой, сигнал которой усиливается и подается на приводную катушку. Давление воздуха измеряется внутри цилиндра, а на его внешней стороне поддерживается стандартный вакуум. Опорная резонансная частота вибрации изменяется пропорционально разнице давлений на стенках цилиндра. Повышение давления вызывает увеличение частоты.

Тонкостенный цилиндр должен иметь достаточную прочность и массу с тем, чтобы выдерживать давление диапазона, в котором он предназначен работать, и находиться на прочном основании. Для метеорологических применений цилиндр помещается в вакуумную камеру, а вход цилиндра соединяется со свободной атмосферой. В связи с тем, что имеется прямая зависимость между опорной резонансной частотой цилиндра и давлением, атмосферное давление можно рассчитывать по измеряемой резонансной частоте. Однако эта зависимость, определенная во время калибровки, зависит от температуры и плотности газа. Поэтому требуется температурная компенсация, и рекомендуется подсушивать воздух до входа в цилиндр.

3.2.4 Деформационные датчики с детекторами смещения

Высокоточные приборы для измерения давления, использующие принцип бесконтактного измерения смещения анероидной коробки, крайне важны в практике метеорологических применений. Применяется широкий диапазон таких датчиков, в том числе емкостные детекторы смещения, потенциометрические детекторы смещения, тензометры, размещаемые в важнейших точках датчика, и рычажные сервосистемы, которые сохраняют размеры датчика постоянными, независимо от давления.

Все чувствительные элементы должны помещаться внутри литого кожуха. Этот кожух следует содержать при постоянной температуре с помощью электронно-управляемого нагревателя, если только конструкцией не предусмотрена соответствующая температурная компенсация. Следует полностью избегать конденсации водяного пара. Эффективным методом предотвращения этого является помещение в литой кожух гигроскопического вещества, такого как силикат, а диффузии водяного пара в кожух можно избежать с помощью присоединения к нему длинной пластмассовой трубки (примерно 25 м) с диаметром отверстия 2 мм или менее между отверстием давления и статической насадкой (см. п. 3.1.4.3.2).

Кожух датчика давления должен быть воздухонепроницаемым и обеспечивать внешнюю связь с отсеком, где должно измеряться давление.

3.2.5 Размещение электронных барометров

Подробные сведения об общих требованиях к размещению приведены в п. 3.1.4.2. Электронные барометры следует устанавливать вдали от источников электромагнитного излучения; если это невозможно, следует экранировать кабельные соединения и кожух.

3.2.6 Снятие показаний электронных барометров

С помощью электронного барометра измеряется атмосферное давление окружающего пространства или любого пространства, которое соединяется с ним через трубку. Как правило, барометр следует устанавливать так, чтобы снимать показания на уровне прибора. Однако на борту судна или на наземных станциях, расположенных на небольших высотах, прибор может быть установлен таким образом, чтобы показывать давление, соответствующее СУМ при условии, что разность между давлением на станции и на уровне моря можно считать постоянной.

Электронные барометры дают точные показания на числовой шкале, обычно представленной в гПа, однако в случае необходимости их можно легко перевести и в другие единицы. Как правило, можно обеспечить регистрацию в цифровой форме. Можно также выводить тенденцию изменения давления, если прибор управляется микропроцессором.

К основным датчикам могут присоединяться цепи, которые корректируют основной выходной сигнал на нелинейность датчика и воздействие температуры и переводят выходные значения в стандартные единицы. В состав современного стандартного барометра входят датчик давления, микрокомпьютерное устройство (включая дисплей) и цепь интерфейса для связи с любым регистратором данных или с АМС.

Электронные барометры, имеющие несколько датчиков или чувствительных элементов, обычно рассчитывают средневзвешенное значение по каждому датчику и результирующее выходное значение давления с точностью минимум 0,1 гПа. Во время калибровки каждый чувствительный элемент может быть проверен с точностью минимум 0,01 гПа.

3.2.7 Источники ошибки

Точность показаний электронных барометров зависит от погрешности их калибровки, эффективности температурной компенсации (от остаточного давления воздуха в чувствительном элементе, температуры и поправки, качества термостата) и изменения со временем.

3.2.7.1 *Смещение в период между калибровками*

Смещение в период между калибровками представляет собой один из основных источников погрешности барометров. Оно часто является большим, если барометр новый; со временем это отклонение уменьшается. Могут возникать скачкообразные изменения в калибровке.

Чтобы обеспечить надежную работу барометра, поправки калибровки, применяемые к показаниям, должны проверяться сравнительно часто, например, для начала ежегодно, с тем чтобы своевременно обнаруживать и заменять неисправные приборы.

Необходимость частой проверки калибровки электронных барометров ложится дополнительным бременем на НМГС, особенно на те, которые имеют обширные сети барометров. Затраты на эти калибровки должны приниматься во внимание при планировании замены ртутных барометров электронными.

3.2.7.2 *Температура*

Большинство электронных барометров имеют надлежащую компенсацию температуры, что может быть подтверждено во время калибровки или испытаний. В случае, если у электронного барометра нет достаточной температурной компенсации, его следует содержать при постоянной температуре с тем, чтобы сохранялась калибровка. Температура должна быть приближена к температуре калибровки. Электронные

барометры без контроля за температурой обычно подвержены большей погрешности. Большинство из них зависят от точности измерения температуры чувствительного элемента и точности электронной коррекции давления. При этом следует исходить из того, что в чувствительном элементе барометра нет термических градиентов. В тех случаях, когда изменения температуры происходят довольно быстро, возможны временные ошибки при измерении давления за счет гистерезиса.

Изменения в калибровке также могут зависеть от термической истории барометра. Продолжительное воздействие температурных изменений может привести к существенным изменениям в калибровке, как временным, так и постоянным.

Если барометры не находятся при той же температуре, что и температура чувствительного элемента, то возможно также появление ошибок за счет электронной части барометров. Электронные барометры часто применяются в экстремальных климатических ситуациях, особенно при использовании в АМС. При таких ситуациях барометр может испытывать колебания температуры, превышающие пределы, предусмотренные проектом изготовителя и спецификацией калибровки.

3.2.7.3 *Электрические помехи*

Как и все чувствительные электронные измерительные приборы, электронные барометры следует защищать и содержать вдали от источников сильных магнитных полей, таких как трансформаторы, компьютеры, радиолокаторы и т. д. Это не всегда является проблемой, но может привести к увеличению шума, в результате чего понижается точность прибора.

3.2.7.4 *Характер работы*

Заметные изменения в калибровке электронного барометра могут быть вызваны разницей работы барометра во время калибровки и при его оперативном использовании. Барометр, который работает постоянно и поэтому прогрет, будет показывать иное давление по сравнению с барометром, с которого считываются показания методом пульсации каждые несколько секунд.

3.3 БАРОМЕТРЫ-АНЕРОИДЫ

3.3.1 Требования к конструкции

Основными частями анероида являются закрытая металлическая коробка, из которой полностью или частично выкачан воздух, и сильная система пружин, которая защищает коробку от деформации в условиях внешнего атмосферного давления. При любом определенном давлении будет соблюдаться равновесие между силой внешнего давления и силой противодействия пружины.

Коробка анероида может изготавливаться из материалов (сталь или бериллиевая медь), которые обладают такими эластичными свойствами, что коробка сама может действовать как пружина.

Необходимо какое-то средство для обнаружения и фиксирования деформации коробки. Это может быть система рычагов, которые усиливают деформацию и передвигают стрелку по шкале, проградуированной в единицах давления. В качестве другого принципа действия может использоваться световой луч, отклоняющийся в пределах шкалы. Вместо этих механических средств некоторые барометры снабжены микрометром с ручной настройкой, счетчик которого показывает давление в десятых долях гектопаскаля. Показания снимают в тот момент, когда светящийся индикатор сигнализирует о контакте микрометра с барокоробкой анероида. Анероид этого типа портативен и прочен.

3.3.2 Достижимая погрешность измерения

Достижимая погрешность измерения в 0,3 гПа возможна для хорошо спроектированного и сконструированного барометра-анероида. Для достижения такой погрешности, помимо регулярной, частой калибровки для уменьшения дрейфа калибровки (как уже упоминалось в отношении электронных барометров в п. 3.2.7.1), необходимо учитывать следующие правила:

a) барометр должен компенсировать температурные колебания так, чтобы при изменении температуры на 30 K отсчеты анероида изменялись не более, чем на 0,3 гПа;

b) ошибки шкалы в любой точке не должны превышать 0,3 гПа и должны оставаться в этих пределах не менее года при нормальной эксплуатации;

c) гистерезис должен быть достаточно малым, чтобы различие в показаниях перед изменением давления на 50 гПа и после возвращения к первоначальному значению составляло не более 0,3 гПа;

d) он должен противостоять обычным транзитным рискам и сохранять свои характеристики в пределах указанных допусков.

3.3.3 Размещение барометров-анероидов

Подробные сведения об общих требованиях к размещению приведены в п. 3.1.4.2. Выбирать место для установки прибора следует так, чтобы в течение всего дня сохранялась сравнительно постоянная температура. Таким образом, это место должно быть экранировано от прямых солнечных лучей, а также от других источников тепла или холода, которые могут привести к резким и заметным изменениям его температуры.

3.3.4 Снятие показаний барометров-анероидов

3.3.4.1 *Точность снятия показаний*

Барометр-анероид должен находиться всегда в том же положении (вертикальном или горизонтальном), в котором он калибровался. Перед отсчетом показаний по барометру необходимо слегка постучать. По возможности, показания необходимо снимать с точностью до 0,1 гПа. Для уменьшения ошибок, обусловленных применением механических рычагов, имеются оптические и цифровые приборы. В отсчеты должны вводиться инструментальные поправки; кроме того, в приборе предусмотрена компенсация на температуру, и нет необходимости в поправке на ускорение силы тяжести.

3.3.4.2 *Приведения, применяемые к барометрам*

Как правило, барометр-анероид должен быть установлен так, чтобы измерять давление на уровне его установки. Однако на борту судна или на наземных станциях, расположенных на небольших высотах, прибор может быть установлен таким образом, чтобы показывать давление, соответствующее СУМ при условии, что разность между давлением на станции и на уровне моря можно считать постоянной.

3.3.5 Источники ошибки

3.3.5.1 *Неполная компенсация на температуру*

Ослабление пружины в барометре-анероиде из-за повышения температуры приводит к завышению показаний давления. Этот эффект обычно устраняется одним из следующих способов:

a) посредством применения биметаллического компенсатора в системе рычагов;

b) с помощью некоторого количества газа, оставленного внутри анероидной коробки.

В большинстве обычных барометров-анероидов полная компенсация с помощью этих методов достигается только при каком-то одном значении давления. Желательно, чтобы все барометры-анероиды и барографы, используемые на метеорологических станциях, были хорошо компенсированы на температуру по всему диапазону давления. В цифровых системах считывания, пригодных для автоматизации, такие суммарные поправки могут применяться, как часть электронной системы.

3.3.5.2 *Погрешности упругости*

Барометр-анероид может подвергаться значительным и быстрым изменениям при воздействии давления. Так, например, при сильном порыве ветра барометр-анероид будет испытывать резкое увеличение давления, после чего последует более плавное возвращение к первоначальному значению. В таких случаях вследствие гистерезиса прибор будет показывать значения давления, несколько отличные от действительных; и может потребоваться много времени, прежде чем эта разница станет незначительной. Но поскольку анероиды и барографы на наземных станциях обычно не подвергаются значительным изменениям давления, их погрешности из-за гистерезиса небольшие.

Существуют также постоянные ошибки из-за медленных изменений свойств металла анероидной коробки. Поправка на этот эффект может быть получена путем сравнения через определенные интервалы времени, например, ежегодно со стандартным барометром. Хороший барометр-анероид должен сохранять точность 0,1 гПа в течение года или более. В целях определения отклонения от этой точности отдельных барометров необходимо установить процедуру регулярной поверки с проведением по необходимости калибровки и корректировки.

3.4 БАРОГРАФЫ

3.4.1 Общие требования

Из всего многообразия барографов здесь будут подробно рассмотрены только барографы-анероиды. Рекомендуется, чтобы ленты барографов, используемых для синоптических целей, отвечали следующим требованиям:

a) были проградуированы в гПа;

b) давали возможность производить отсчет с точностью до 0,1 гПа;

c) имели масштабный коэффициент 10 гПа на каждые 1,5 см ленты.

Кроме того, желательно, чтобы барографы отвечали следующим требованиям:

a) в барографе должен использоваться высококачественный анероид (см. п. 3.4.2);

b) барограф должен быть компенсирован на температуру таким образом, чтобы при изменении температуры на 20 K, его показания изменялись не более чем на 1 гПа;

c) ошибки шкалы в любой точке не должны превышать 1,5 гПа;

d) гистерезис должен быть достаточно малым, таким, чтобы различие в показаниях перед изменением давления на 50 гПа и после возвращения к первоначальному значению было не более 1 гПа;

e) прибор должен снабжаться устройством для отметок времени, позволяющим делать засечки при закрытой крышке;

f) держатель пера должен поворачиваться в «вилке», ось которой наклонена таким образом, чтобы перо покоилось на ленте под действием силы тяжести; установка пера в определенное положение должна обеспечиваться регулировочным механизмом.

К морским барографам предъявляются особые требования, которые рассматриваются в томе III, глава 4 настоящего Руководства.

3.4.2 **Устройство барографов**

Принцип устройства анероидного барографа аналогичен принципу барометров-анероидов, за исключением того, что вместо стрелки используется пишущее перо. С этим связаны некоторые изменения в конструкции выводной трубы кожуха, и обычно уменьшение и увеличение количества и размера используемых мембран.

«Нормированную» реакцию барографа можно определить как силу, необходимую для перемещения пера на единицу шкалы (1 гПа), т. е. силу, которая требуется для удержания пера на месте при изменении давления на 1 гПа. Эта мера необходима для преодоления влияния трения, чтобы обеспечить детальную запись.

Сила, которая требуется для преодоления движения диафрагмы, когда давление изменяется на 1 гПа, равна 100 A ньютонов, где A — действительная площадь поперечного сечения мембраны в квадратных метрах. Если усилие равно X, сила, которая необходима для удержания пера на месте, составляет 100 A/X ньютонов и изменяется как A/X. Для определенного типа мембраны и масштаба шкалы значение X в основном не зависит от A, и, таким образом, нормированное перемещение пера барографа можно считать примерно пропорциональным действительной площади поперечного сечения мембраны.

3.4.3 **Размещение барографов**

Подробные сведения об общих требованиях к размещению приведены в п. 3.1.4.2. Барограф должен располагаться в таком месте, которое недоступно для лиц, не имеющих разрешения пользоваться им. Установка на губчатой каучуковой подушке является удобным способом уменьшения воздействий вибрации. Выбранное место должно быть сухим и чистым. В нем также должно быть как можно меньше таких веществ в воздухе, которые вызывают коррозию и загрязнение механизма.

Важно также разместить прибор таким образом, чтобы его шкала при обычных условиях работы находилась на удобной для снятия показаний высоте с тем, чтобы свести к минимуму явление параллакса. Барограф должен располагаться таким образом, чтобы он равномерно освещался; в случае необходимости следует воспользоваться искусственным освещением.

3.4.4 Источники ошибки

Кроме уже упомянутых источников ошибок барометра-анероида (см. п. 3.3.5), для барографа важное значение имеет трение между пером и бумагой. Нормированное перемещение пера зависит, главным образом, от действительного поперечного сечения анероидной коробки. В хорошем барографе трение пера значительно выше, чем общее трение всех осей и опор прибора; поэтому необходимо обращать особое внимание на уменьшение таких ошибок по этой причине, например, за счет применения анероидной коробки достаточно большого размера.

Высококачественный барограф должен иметь погрешность не более 0,2 гПа после внесения поправок и должен сохранять эту точность в течение одного-двух месяцев. Значение барической тенденции такого барографа обычно отсчитывается с этой же точностью.

3.4.5 Снятие показаний барографа

Показания барографа снимаются так, чтобы не касаться прибора. Отметка времени и любой осмотр прибора, включающий поднятие крышки и т. п., следует всегда производить после того, как полностью сделан отсчет.

3.4.5.1 *Точность снятия показаний*

Отсчет по ленте прибора должен производиться с точностью до 0,1 гПа. Барическую тенденцию следует отсчитывать с такой же точностью.

3.4.5.2 *Поправки, вводимые в показания барографа*

Перед использованием каждого прибора необходимо проверить его компенсацию на температуру. Масштабный коэффициент регулируется при проверке в вакуумной камере. Если барограф используется только для определения барической тенденции, поправки в его показания обычно не вводят. В этом случае точная установка пера не имеет значения. Если барограф используется для получения абсолютных значений давления, то показания барографа необходимо сравнивать с отсчетами электронного барометра или хорошего барометра-анероида, по крайней мере, один раз в сутки. Искомые значения поправок можно определять методом интерполяции.

3.4.5 Транспортировка

Если барограф нужно перевезти на самолете или на большой высоте, держатель пера должен быть отведен от барабана и, кроме того, должны быть приняты меры предосторожности, позволяющие механизму противостоять перегрузке, вызванной превышением обычного диапазона работы прибора.

3.5 ИЗМЕНЕНИЕ ДАВЛЕНИЯ И БАРИЧЕСКАЯ ТЕНДЕНЦИЯ

3.5.1 Барическая тенденция и характеристика барической тенденции

На станциях приземных синоптических наблюдений, барическая тенденция и характеристика барической тенденции должны определяться из наблюдений за последние 3 ч (за 24 ч в тропических регионах). В основном характеристика барической тенденции может быть выражена формой кривой, зарегистрированной в течение 3-часового периода, предшествующего наблюдению. В случае ежечасных наблюдений количество и характеристика могут основываться только на четырех наблюдениях,

что может привести к ошибочным толкованиям. Поэтому рекомендуется определять характеристику на основе более частых наблюдений, например, с 10-минутными интервалами (WMO, 1985). Имеется определение девяти типов характеристик барической тенденции (см. WMO, 2011).

3.5.2 Измерение барической тенденции

Станции, проводящие наблюдения, по меньшей мере, каждые 3 часа, могут пользоваться несколькими методами:

a) цифровые электронные барометры обычно отображают тенденцию изменения давления вместе с фактическим давлением;

b) тенденцию можно определить напрямую по показанию барографа;

c) тенденцию можно определить по соответствующим показаниям барометра, приведенным к уровню станции.

Ошибки, возникающие при снятии показаний барометра, при условии его хорошей работы обычно являются случайными. Поэтому при определении значения тенденции, при вычитании двух показаний, ошибки могут складываться. Ошибки частично носят систематический характер, поэтому в течение сравнительно короткого трехчасового периода они должны иметь одинаковый знак и уменьшаться при вычитании.

3.6 ОБЕСПЕЧЕНИЕ ПРОСЛЕЖИВАЕМОСТИ И КАЛИБРОВКА

3.6.1 Замечания общего характера

Учитывая необходимость получения точных данных о давлении, особенно для аэронавигационных и синоптических целей, а также подверженность барометров различного рода ошибкам, крайне важное значение имеет обеспечение прослеживаемости и регулярная калибровка барометров. Начиная с 1960-х годов для обеспечения прослеживаемости измерений давления применялась концепция сравнения барометров, которая включала специальные региональные эталонные барометры в каждой региональной ассоциации ВМО. Эта концепция была упразднена решением 36 (ИС-69), принятым Исполнительным советом ВМО на его шестьдесят девятой сессии в 2017 году. В настоящее время сопоставимость измерений атмосферного давления с единицами СИ может быть обеспечена более эффективно и экономично с помощью непрерывной цепочки прослеживаемости, и вместо предыдущей концепции внедряется новая «стратегия обеспечения прослеживаемости» (см. настоящий том, глава 1, приложение 1.B).

Некоторые рекомендации, касающиеся используемого оборудования для проведения калибровки в лабораториях и на передвижных станциях, а также проверок в полевых условиях, даются в последующих разделах. Определения и общие замечания по калибровке приведены в томе V, глава 4 настоящего Руководства; а с руководством по расчету погрешностей калибровки можно ознакомиться в публикации ВМО (WMO, 2015).

3.6.2 Лабораторная калибровка

Лабораторную калибровку барометров необходимо регулярно проводить в лабораториях калибровки, имеющих аккредитацию ИСО/МЭК 17025, или в службе НМУ, имеющей сертификат СВП МКМВ. Если подходящей лаборатории нет, следует обеспечить прослеживаемость до СИ в соответствии со стратегией обеспечения прослеживаемости, описанной в настоящем томе, глава 1, приложение 1.B.

В целом, калибровка может проводиться в разных местах. Для достижения более низкой погрешности калибровку следует проводить в стационарной лаборатории калибровки, расположенной в фиксированном месте. В таких условиях можно использовать более чувствительные абсолютные эталоны, хорошо контролировать условия окружающей среды (например, температуру и влажность) и обеспечить защиту установки от вибраций.

Если приборы, подлежащие калибровке, невозможно регулярно перемещать в стационарную лабораторию калибровки, калибровка может быть выполнена с помощью мобильного калибровочного оборудования на месте в здании на пункте наблюдений или в специально оборудованном автомобиле. Поскольку условия окружающей среды нельзя контролировать настолько же точно, как в стационарной лаборатории калибровки, достижимые погрешности, как правило, будут больше.

3.6.2.1 ***Общепринятая установка оборудования***

В большинстве случаев калибровочное оборудование включает в себя контроллер давления в сочетании с контрольным барометром, который прослеживается до СИ. Контроллеры давления регулируют давление в шланге с подключенным прибором, который необходимо откалибровать. К контроллеру давления подключаются вакуумный насос и источник давления. Настоятельно рекомендуется использовать в качестве источника давления баллон с сухим, очищенным сжатым воздухом очень высокой чистоты. Контейнер должен быть оснащен редукционным клапаном. Между редукционным клапаном и шлангом к регулятору давления необходимо подсоединить микрофильтр. В качестве эталонных данных используются данные контрольного барометра, а не данные контроллера. Для некоторых барометров можно также использовать очищенный азот. Однако для барометров, использующих технологию, основанную на измерении плотности воздуха (например, вибрационно-частотные барометры), азот использовать нельзя, поскольку плотность воздуха отличается от плотности азота.

Следует также учитывать следующие аспекты, основанные на руководящих принципах Европейской ассоциации национальных метрологических институтов (EURAMET) (EURAMET, 2017):

a) все оборудование должно быть защищено от прямого солнечного света и любых источников тепла;

b) калибруемые приборы должны располагаться как можно ближе к эталонному прибору и на той же высоте;

c) уровни контроля давления обоих приборов должны располагаться как можно ближе друг к другу. Если есть различия, их необходимо учитывать для внесения поправок и учета погрешностей;

d) необходимо выделить время на прогрев и акклиматизацию оборудования для достижения теплового равновесия во всей системе;

e) все барометры измеряют давление с помощью методов, чувствительных к температуре. По этой причине эти приборы имеют температурную компенсацию (механическую или с помощью соответствующего программного обеспечения). Когда барометры используются в более широком диапазоне температур по сравнению с обычной температурой в помещении, они должны быть откалиброваны или испытаны при нескольких температурах, чтобы давать правильные показания для данного конкретного диапазона;

f) калибровку следует проводить при стабильной температуре окружающей среды с точностью ±1 °C. Эта температура должна быть репрезентативной для диапазона, используемого в эксплуатационных условиях, и обычно она варьируется в пределах от 18 °C до 28 °C. Температуру следует регистрировать;

g) обычно калибровка метеорологических приборов для измерения давления выполняется в режиме абсолютного давления, поэтому плотность воздуха не оказывает влияния. Если плотность воздуха влияет на результат калибровки, необходимо регистрировать не только температуру окружающей среды, но и атмосферное давление и относительную влажность;

h) на рабочем месте должен быть порядок, и оно должно содержаться в чистоте.

3.6.2.2 *Лабораторные эталонные приборы*

Эталонный прибор должен иметь прослеживаемость к национальным или международным эталонам, а его погрешность должна быть лучше, чем у калибруемого прибора. Отношение погрешности калибруемого прибора к погрешности эталонного должно составлять не менее двух, если это практически возможно.

3.6.2.2.1 **Контроллер давления с встроенным контрольным манометром**

Контроллеры давления могут применяться в качестве рабочих эталонов, но только если погрешность измерений находится в требуемых пределах и прослеживается до СИ (WMO, 2010). Эти контроллеры работают в режиме абсолютного давления. Предварительно выбранное давление создается за счет подачи газа, вакуумного насоса и клапанов. Встроенный манометр используется в качестве ориентира и для регулирования давления. Тестируемые устройства подключаются напрямую или через напорный шланг. Может возникнуть небольшое смещение, поэтому контроллер давления необходимо регулярно калибровать повторно. В лабораторию калибровки следует отправлять либо весь контроллер давления, либо только его встроенный контрольный манометр, который можно отсоединить. Возможно добиться погрешности лучше 0,1 гПа.

3.6.2.2.2 **Контроллер давления с внешним контрольным манометром**

В этом случае внутренний контроллер давления имеет пониженную точность или не может быть откалиброван, чтобы иметь прослеживаемость до СИ. В качестве рабочего эталона используется внешний прецизионный манометр. Он подключается к тестируемому устройству параллельно. Внешний контрольный манометр проще обслуживать и калибровать, чем встроенный. Может быть достигнута погрешность лучше 0,05 гПа.

К примерам таких внешних контрольных манометров с высокой стабильностью (менее 0,1 гПа за 10 лет), отличной температурной компенсацией (лучше 0,001 гПа K^{-1}) и без гистерезиса обычно можно отнести высокоточные электрические цифровые барометры на основе технологии, описанной в п. 3.2. Эти типы эталонных барометров высокоэффективны, поскольку их можно использовать в условиях автоматической калибровки, для которой требуется лишь ограниченное вмешательство со стороны персонала. Несмотря на высокую стабильность, рекомендуется ежегодно калибровать этот контрольный манометр с помощью оборудования, отслеживаемого до СИ.

3.6.2.2.3 Поршневые манометры

Поршневой манометр представляет собой абсолютный эталон и обеспечивает минимально возможную погрешность и максимальную стабильность. Благодаря сверхнизкому дрейфу повторную калибровку рекомендуется проводить через пять лет. Погрешность составляет около 0,05 гПа или менее. Хотя они являются абсолютными эталонами, их часто используют также в качестве рабочих эталонов.

Существует два принципа, основанных на системе поршень-цилиндр из карбида вольфрама. Эффективная площадь поршня определяется аккредитованной

лабораторией калибровки или НМУ. Температура измеряется с помощью ПТС, и изменение эффективной площади из-за изменения температуры постоянно рассчитывается контроллером поршневого манометра.

В цилиндре поршню придается вращение с помощью двигателя. Поверхность поршня и цилиндра ультрагладкая, очищенная, и между ними нет смазки, кроме молекул используемого газа.

В любом случае необходим дополнительный контроллер давления, поэтому вложения будут самыми высокими.

В режиме абсолютного давления для обеих систем необходимы встроенные вакуумметры. В связи с относительной сложностью калибровки этих вакуумметров рекомендуется использовать внешние вакуумметры. В большинстве случаев вакуумным манометрам присуща проблема дрейфа, поэтому интервалы калибровки будут короче, чем интервал калибровки самого поршневого манометра. Необходимо учитывать погрешность вакуумметра.

Поршневые манометры с динамометрическим манометром

Предустановленное давление создается контроллером давления. Поршневой манометр и тестируемые устройства подключаются параллельно через напорный шланг. Создаваемое давление действует на поршень, который соединен с динамометром, измеряющим силу. В области вокруг динамометра создается вакуум, поэтому существует лишь очень небольшая сила, обусловленная остаточным газом.

Давление рассчитывается при известной скорректированной по температуре эффективной площади и измеренной силе. Вакуум измеряется с помощью вакуумметра. Остаточное давление необходимо учитывать с помощью контроллера поршневого манометра.

Регулярные регулировки нулевой отметки динамометра и градиента выполняются с помощью прецизионных грузов, калибруемых аккредитованной лабораторией калибровки или НМУ.

Поршневые манометры с нагруженным поршнем

Абсолютный эталон такого типа не измеряет давление. Его поршень нагружается грузами, которые калибруются аккредитованной лабораторией калибровки или НМУ. Благодаря отсутствию динамометра манометр такого типа представляет собой базовый манометр с минимально возможной погрешностью. Он непосредственно прослеживается до единиц массы, длины, температуры и времени СИ.

Давление создается известной массой поршня и грузов, местной силой тяжести и скорректированной по температуре эффективной площадью (A на рисунке 3.1), и определяется его значение. Для определения погрешности измерения, помимо других составляющих общей оценки погрешности, должна быть известна погрешность этих трех компонентов. Особое внимание следует уделять местной силе тяжести и связанной с ней погрешности. Необходимо, чтобы такая местная сила тяжести (в месте размещения эталона) определялась квалифицированным персоналом или аккредитованными службами. Обратите внимание, что здание, в котором будет применяться эталон, будет влиять на местную силу тяжести. См. также приложение 3.B об использовании гравиметров.

Для поднятия грузов необходим контроллер давления. На определенной высоте поршень разгоняется с помощью временно подсоединяемого ремня, который приводится в движение двигателем. При определенной скорости вращения ремень отсоединяется, и двигатель останавливается. Из-за чрезвычайно низкого трения молекул азота скорость вращения будет замедляться очень медленно. В зависимости от количества грузов вращение может продолжаться до получаса.

Если поршень вращается, высота поршня незначительно изменяется. Чтобы вернуть поршень на определенную высоту, контроллер давления регулирует давление в области ниже поршня. Затем регулятор контроллер отключается, и его клапаны закрываются. Давление в зоне под поршнем и подсоединенным напорным шлангом создается вращающимся и очень медленно опускающимся поршнем (рис. 3.2).

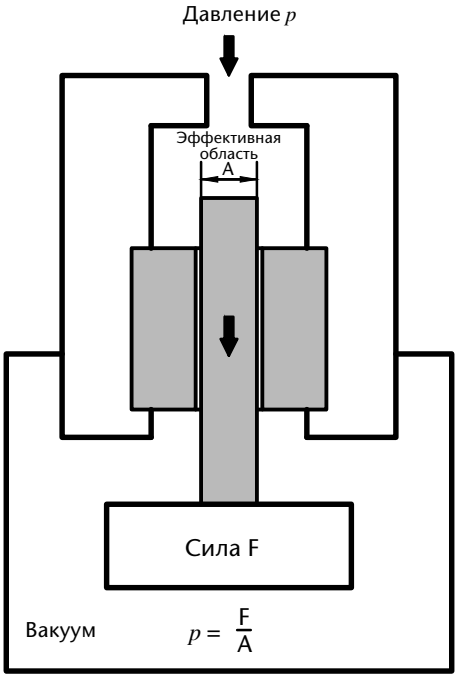


Рисунок 3.1. Поршневой манометр с динамометром

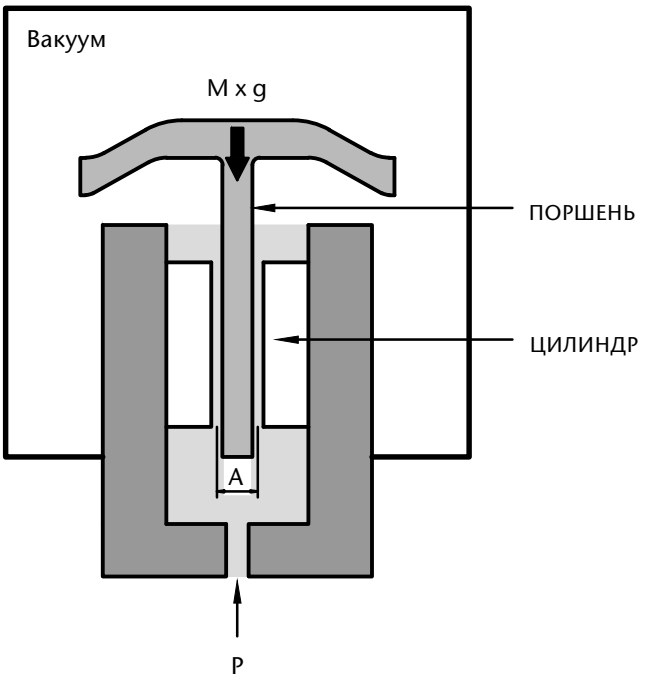


Рисунок 3.2. Нагруженный поршневой манометр

Область над системой поршень-цилиндр закрыта стеклянным колоколом. Давление в колоколе откачивается с помощью мощного вакуумного насоса. Вакуум измеряется с помощью вакуумметра. Остаточное давление необходимо учитывать с помощью контроллера поршневого манометра.

Недостатком поршневых манометров является необходимость замены грузов. Для их замены необходимо создать давление в вакуумированной области и снять стеклянный колокол. После повторной установки стеклянного колокола необходимо снова откачать воздух из этой области. Работа с поршневыми манометрами требует очень больших временных затрат, но для некоторых типов поршневых манометров имеется автоматическая система работы с массой. Обратите внимание, что только хорошо обученные сотрудники могут применять этот метод.

3.6.2.3 *Метод калибровки*

Для достижения требуемой расширенной погрешности измерений необходимо провести комплексную процедуру калибровки. Для этого имеется несколько руководств. Ниже описывается проверенная процедура, которая обычно используется в аккредитованных лабораториях. С ее помощью можно оценить линейность, воспроизводимость и обратимость.

Для калибровки может быть выбран диапазон давления либо от 0 % до 100 % полной шкалы прибора, либо этот интервал может быть уменьшен с учетом потребностей клиента (например, диапазон, ожидаемый во время эксплуатации, такой как 850-1050 гПа). На рисунке 3.3 показан общий процесс калибровки.

Процесс калибровки начинается с получения максимальной и минимальной точек калибровки, что делается последовательно, три раза. Время предварительной загрузки при самом высоком значении и время между двумя предварительными загрузками должно составлять не менее 30 секунд. Изменение давления должно произойти за 30 секунд, а время выдержки должно составлять не менее 120 секунд.

Затем следует провести калибровку в точках калибровки, равномерно распределенных по диапазону калибровки. Необходимо провести цикл измерений, каждое из которых состоит из серии повышений давления и серии понижений давления. Количество точек в серии не должно быть меньше девяти. Время между двумя последовательными шагами нагрузки должно быть одинаковым и не короче 30 секунд. В каждой точке калибровки время ожидания, в течение которого достигается устойчивое состояние, должно составлять не менее 120 секунд.

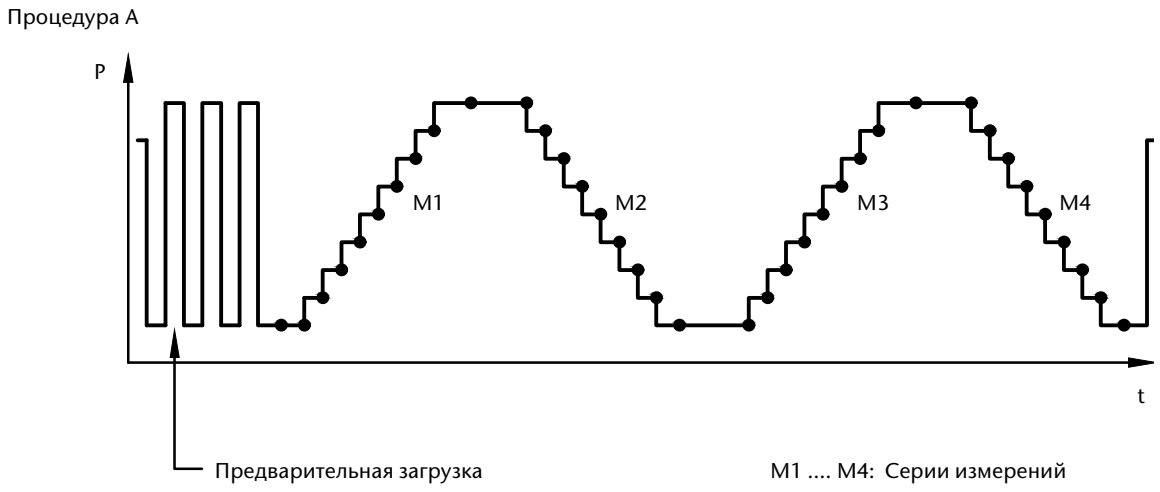


Рисунок 3.3. Процедура калибровки

В течение всей процедуры крепление и соединения не должны меняться.

Для манометров абсолютного давления, таких как барометры, определение отклонения от нулевой отметки обычно опускается и, следовательно, не выполняется корректировка нулевой отметки.

3.6.2.3.1 **Расчет повторяемости**

Повторяемость рассчитывается по разнице между отклонениями, измеренными в соответствующей серии измерений. Индекс *j* обозначает номинальную точку давления.

$$b_{up,j} = \left| \Delta p_{3,j} - \Delta p_{1,j} \right|$$

$$b_{down,j} = \left| \Delta p_{4,j} - \Delta p_{2,j} \right|$$

$$b_{mean,j} = max\left\{ b_{up,j}, b_{down,j} \right\}$$

Повторяемость должна учитываться при расчете погрешности.

Пример:

Эталон (гПа)	*Δp в серии 1 (гПа)*	*Δp в серии 2 (гПа)*	*Δp в серии 3 (гПа)*	*Δp в серии 4 (гПа)*
996,371	-0,002	0,008	0,001	0,007

$$b_{up,j} = \left| 0,001\,hPa - \left(-0,002\,hPa \right) \right| = 0,003\,hPa$$

$$b_{down,j} = \left| 0,007\,hPa - 0,008\,hPa \right| = 0,001\,hPa$$

$$b_{mean,j} = \max\left\{ 0,003\,hPa,\ 0,001\,hPa \right\} = 0,003\,hPa$$

3.6.2.3.2 **Расчет обратимости (гистерезиса)**

Обратимость (гистерезис) рассчитывается по разнице между соответствующими отклонениями выходных значений, измеренных при повышении и понижении давления.

$$h_{mean,j} = \frac{1}{4}\left\{ \left| \Delta p_{2,j} - \Delta p_{1,j} \right| + \left| \left(\Delta p_{4,j} - \Delta p_{3,j} \right| \right\} \right.$$

Обратимость необходимо учитывать при расчете погрешности.

Пример:

Эталон (гПа)	*Δp в серии 1 (гПа)*	*Δp в серии 2 (гПа)*	*Δp в серии 3 (гПа)*	*Δp в серии 4 (гПа)*
996,371	-0,002	0,008	0,001	0,007

$$h_{mean,j} = \frac{1}{4}\left\{ \left| 0,008\,hPa - \left(-0,002\,hPa \right) \right| + \left| (0,007\,hPa - 0,001\,hPa \right| \right\} = 0,004\,hPa$$

3.6.3 **Инспекции в полевых условиях**

Во время инспекции в полевых условиях необходимо провести сравнение с переносным эталоном. Это сравнение не является калибровкой, так как в большинстве случаев

выполняется только сравнение в одной точке при фактическом атмосферном давлении. Таким образом, эти проверки могут лишь указать на правдоподобность показаний прибора на месте.

Для инспекций в полевых условиях в качестве переносного эталона следует использовать мобильный электронный манометр, желательно с несколькими датчиками давления (см. п. 3.2). При соответствующей температурной компенсации может быть достигнута погрешность 0,1 гПа или менее. Имеются приборы с перезаряжаемыми батареями, а значения от внутренних датчиков могут отображаться отдельно или в виде среднего значения. Перед проведением сравнения прибор всегда должен быть акклиматизирован к условиям окружающей среды.

Инспекции в полевых условиях следует проводить в погодных условиях с малым градиентом изменения, при стабильном атмосферном давлении и низкой скорости ветра.

Оборудование для инспекций в полевых условиях должно быть откалибровано в аккредитованной лаборатории калибровки, предпочтительно до и после использования в полевых условиях или через соответствующие интервалы калибровки, в зависимости от дрейфа оборудования.

3.7 ПРИВЕДЕНИЕ ПОКАЗАНИЙ БАРОМЕТРА К ЭТАЛОННОМУ И ДРУГИМ УРОВНЯМ

Чтобы сравнить показания барометров различных станций, расположенных на разных высотах, необходимо привести эти показания к одному и тому же уровню. Хотя для этого используются различные методы, ВМО рекомендован стандартный метод, описанный в следующих параграфах.

Более подробно рекомендуемый метод описывается в публикациях ВМО (WMO, 1954, 1964, 1968). В работе ВМО (WMO, 1966) содержится комплексный набор таблиц и формул, которые используются для расчетов, связанных с давлением.

3.7.1 Стандартные уровни

На всех станциях, где это можно сделать с приемлемой точностью, наблюдаемое атмосферное давление должно быть приведено к СУМ (см. настоящий том, глава 1). Если это невозможно, станция должна, по региональному соглашению, сообщить либо геопотенциал согласованного «уровня постоянного давления», либо давление, приведенное к установленному для этой станции исходному уровню. Уровень, выбранный для каждой станции, должен быть сообщаться в Секретариат ВМО для опубликования (т. е. посредством Инструмента анализа и обзора возможностей систем наблюдений ВМО (OSCAR)/Поверхность, https://oscar.wmo.int/surface).

3.7.2 Общая формула приведения

Формула для приведения давления к среднему уровню моря рекомендована для станций, расположенных на высотах ниже 750 м (из публикации WMO, 1964, стр. 22, уравнение 2):

$$\log_{10}\frac{p_0}{p_s} = \frac{K_p \cdot H_p}{T_{mv}} = \frac{K_p \cdot H_p}{T_s + \frac{a \cdot H_p}{2} + e_s \cdot C_h} \tag{3.1}$$

где p_0 — давление, приведенное к уровню моря в гПа; p_S — давление на уровне станции в гПа; K_p — константа = 0,0148275 К/гп. м$^{-1}$; H_p — высота станции в гп. м; T_{mv} — средняя виртуальная температура условного столба воздуха ниже уровня станции в К, ($T_{mv} = T_S + (a \cdot H_p)/2 + e_S \cdot C_h$); T_S — температура на станции в К, $T_S = 273{,}15 + t$;

t — температура на станции в °C; a — принятый градиент в условном столбе воздуха от уровня моря до высоты станции = 0,0065 K гп. м$^{-1}$; e_S — парциальное давление на станции в гПа; C_h — коэффициент = 0,12 K гПа$^{-1}$.

Эта же формула часто используется в экспоненциальном виде:

$$p_0 = p_s \cdot \exp\left(\frac{\frac{g_n}{R} \cdot H_p}{T_s + \frac{a \cdot H_p}{2} + e_s \cdot C_h}\right) \tag{3.2}$$

где g_n — стандартное гравитационное ускорение = 9,80665 м с$^{-2}$; R — газовая постоянная сухого воздуха = 287,05 Дж кг$^{-1}$ K^{-1}.

3.7.3 Формула приведения для станций, расположенных на небольшой высоте

На станциях, расположенных на небольшой высоте (а именно, на станциях, расположенных на высоте менее 50 м над СУМ), отсчеты давления должны приводиться к СУМ посредством прибавления к давлению на станции константы приведения C, рассчитываемой по следующей формуле:

$$C = p \cdot H_p / (29,27\, T_v) \tag{3.3}$$

где p — наблюдаемое давление на станции в гектопаскалях; H_p — высота станции в метрах; и T_v — среднегодовое нормальное значение виртуальной температуры на станции в K.

Примечание: виртуальная температура влажного воздуха — это температура, которую имел бы при данном давлении сухой воздух той же плотности, что и влажный воздух. В публикации ВМО (WMO, 1966) содержатся значения приращений виртуальных температур насыщенного воздуха при различных давлении и температуре.

Процедура приведения должна использоваться на станциях, расположенных на таких небольших высотах, для которых абсолютные экстремальные значения виртуальных температур эквивалентны T_v в приведенном уравнении; отклонение результата, обусловленное иными аппроксимациями указанного уравнения (используемого для высоты менее высоты стандартного геопотенциала и C, которая должна быть менее p), не принимается во внимание при сравнении.

ПРИЛОЖЕНИЕ 3.A. МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЯ С ПОМОЩЬЮ РТУТНЫХ БАРОМЕТРОВ

Как указано в п. 3.1.4.5, ртутные барометры больше не рекомендуются к использованию. Причины, по которым следует отказаться от их применения, заключаются в следующем: пары ртути являются высокотоксичными; ртуть в чистом виде агрессивна для алюминиевых сплавов, используемых в каркасе; для трубки необходимо специальное свинцовое стекло; барометр является очень хрупким и трудным для транспортировки; трудно осуществлять техобслуживание прибора и очищать ртуть; считывание показаний прибора и применение поправок необходимо производить вручную; в настоящее время общедоступными являются другие барометры эквивалентной точности и стабильности с электронным считыванием показаний.

Это приложение сохранено исключительно для информационных целей.

1. ЕДИНИЦЫ ИЗМЕРЕНИЯ И ШКАЛЫ

Некоторые барометры проградуированы в «миллиметрах или дюймах ртутного столба при стандартных условиях» — $(\text{мм рт. ст.})_n$ и $(\text{дюймы рт. ст.})_n$ соответственно. В тех случаях, когда из контекста ясно, что должны применяться стандартные условия, можно использовать более краткие термины — «миллиметр ртути» или «дюйм ртути». В стандартных условиях столб ртути, имеющий действительную высоту шкалы 760 $(\text{мм рт. ст.})_n$, оказывает давление 1 013,250 гПа.

Далее будут применяться следующие формулы перевода:

1 гПа = 0,750062 $(\text{мм рт. ст.})_n$
1 $(\text{мм рт. ст.})_n$ = 1,333224 гПа

При обычной зависимости между дюймом и миллиметром, а именно 1 дюйм = 25,4 мм, получают следующие переводные множители:

1 гПа = 0,029530 $(\text{дюйма рт. ст.})_n$
1 $(\text{дюйм рт. ст.})_n$ = 33,8639 гПа
1 $(\text{мм рт. ст.})_n$ = 0,03937008 $(\text{дюйма рт. ст.})_n$

Шкалы ртутных барометров, применяемых для метеорологических целей, должны быть проградуированы таким образом, чтобы получать истинные значения давления непосредственно в стандартных единицах, когда весь прибор находится при стандартной температуре 0 °C, а стандартное значение ускорения силы тяжести составляет 9,80665 $\text{м} \cdot \text{с}^{-2}$.

Барометры могут иметь несколько шкал, например, гПа и мм рт. ст. или гПа и дюймы рт. ст., при условии, что барометр правильно откалиброван, скорректирован и скомпенсирован для использования при стандартных условиях.

2. ТРЕБОВАНИЯ К РТУТНЫМ БАРОМЕТРАМ

2.1 Требования к конструкции

Основным принципом работы ртутного барометра является уравновешивание давления атмосферы весом столба ртути. В некоторых барометрах столб ртути взвешивается на весах, но для обычных метеорологических целей высота ртутного столба определяется по шкале, проградуированной в единицах давления.

На метеорологических станциях используется несколько типов ртутных барометров, при этом наиболее распространенными являются чашечные барометры и барометры Фортеня. Высота ртутного столба измеряется в них как расстояние между верхней точкой ртутного столба и поверхностью ртути в чашке. Любое изменение высоты ртутного столба сопровождается изменением уровня ртути в чашке. В барометре Фортеня уровень ртути в чашке может быть отрегулирован по контакту с указателем, конец которого находится на нулевой отметке шкалы барометра. В чашечном барометре, часто называемом барометром Кью, ртуть в чашке не регулируется, поэтому шкала барометра нелинейная и нанесена с учетом изменения уровня ртути в чашке.

2.2 Общие требования

Основные требования к хорошим ртутным станционным барометрам состоят в следующем:

a) их точность не должна изменяться в течение длительного времени. В частности, их гистерезис должен быть незначительным;

b) отсчет по барометру должен быть легким и быстрым и должен корректироваться поправками на все известные воздействия. Наблюдатели, использующие эти поправки, должны понимать их значение с тем, чтобы правильно их применять и не ухудшать точность отсчетов;

c) при транспортировке барометры не должны терять свою точность;

d) внутренний диаметр трубки барометра должен быть не менее 7 мм, но предпочтительнее 9 мм;

e) трубка должна быть подготовлена и наполнена в вакууме. Важное значение имеет чистота ртути. Она должна быть дважды дистиллирована, обезжирена, многократно промыта и отфильтрована;

f) температура, при которой предполагается, что шкала дает правильные значения при стандартной силе тяжести, должна быть нанесена на барометре. Желательно, чтобы шкала была откалибрована так, чтобы давать правильные значения при 0 °C;

g) мениск не должен быть плоским, за исключением случаев, когда диаметр трубки большой (более 20 мм);

h) для морских барометров погрешность в любой точке шкалы не должна превышать 0,5 гПа.

Инерция ртутных барометров для наземных станций, как правило, достаточно низкая по сравнению с инерцией морских барометров и приборов для измерения температуры, влажности и ветра.

2.3 Размещение ртутных барометров

Общие требования к размещению ртутных барометров изложены в предыдущих разделах. Кроме уже упомянутых требований к размещению ртутных барометров, имеются также дополнительные требования. Всегда предпочтительнее, чтобы ртутный барометр висел на внутренней части стены. Для очень точной работы лучшим является размещение в закрытом и не обогреваемом шкафчике с небольшим электрическим вентилятором, предотвращающим любую стратификацию температуры.

Для получения однородного освещения при снятии показаний барометра рекомендуется использовать искусственное освещение для всех наблюдений. Для этой цели годится осветитель, который может обеспечивать светлый и слегка светящийся фон для ртутного мениска и, если необходимо, для начальной точки отсчёта. Если источник света не используется, то следует уделять особое внимание тому, чтобы мениск и начальная точка имели светлый фон, для чего можно использовать такие средства, как кусочки матового стекла, белого целлулоида или кусок белой бумаги. Искусственное освещение должно быть обеспечено также при отсчетах по шкале барометра и термометру-атташе. Однако необходимо принять меры против нагревания барометра от искусственного света при снятии отсчетов.

Барометр должен быть установлен в таком месте, где нет вибрации, желательно на твердой стене. Прибор должен быть установлен вертикально. Ошибки за счет отклонения от вертикального положения чаще возникают у несимметричных барометров. Такие барометры должны устанавливаться с учетом вертикальности их наибольшей оси. Это можно обеспечить такой установкой барометра, при которой правильное положение поверхности ртути по отношению к начальной точке остается точным даже после отклонения прибора от вертикали.

Для защиты барометра от неосторожного обращения, пыли и воздушных порывов прибор рекомендуется поместить в шкафчик с навесной дверцей и обеспечить достаточную вентиляцию, предотвращающую стратификацию воздуха внутри.

При транспортировке ртутного барометра следует проявлять большую осторожность. Самым надежным способом является перевозка барометра вверх чашкой в деревянном ящике с ремнем. Если барометр не может сопровождаться ответственным лицом, то он должен перевозиться в удобной таре, снабженной пружинами, в таком положении, чтобы его чашка всегда была вверху. Барометр не должен подвергаться резким толчкам, и переворачивать его необходимо очень медленно. При переворачивании некоторых типов барометров должна соблюдаться особая предосторожность.

3. ИЗМЕРЕНИЯ С ПОМОЩЬЮ РТУТНЫХ БАРОМЕТРОВ

3.1 Стандартные условия

Принимая во внимание, что высота ртутного столба барометра зависит, кроме атмосферного давления, от других факторов, особенно от температуры и силы тяжести, необходимо определить стандартные условия, при которых барометр теоретически должен давать правильные показания. В международных соглашениях по барометрам предусматриваются следующие стандарты.

3.1.1 *Стандартная температура и плотность ртути*

Стандартной температурой является значение 0 °C, к которому приводятся отсчеты ртутных барометров с целью предотвращения погрешностей, связанных с изменением плотности ртути в зависимости от температуры.

Стандартная плотность ртути при 0 °C берется равной 1,35951 · 10^4 кг · $м^{-3}$, а для целей расчета абсолютных значений давления с помощью гидростатического уравнения ртутный столб барометра условно рассматривается как несжимаемая жидкость.

Плотность неочищенной ртути отличается от плотности ртути очищенной. Поэтому барометр, в котором используется неочищенная ртуть, будет показывать ошибочные значения давления, поскольку давление пропорционально плотности ртути.

3.1.2 *Стандартная сила тяжести*

Показания барометра должны приводиться от ускорения силы тяжести в данном месте к стандартному (нормальному) ускорению. Стандартное ускорение силы тяжести (g_n) обычно является константой, g_n = 9,806 65 м·$с^{-2}$.

Примечание: необходимость принятия некоторого стандартного значения ускорения силы тяжести объясняется в публикации ВМО (WMO, 1966). Это значение не соответствует истинному значению, измеренному или теоретически рассчитанному в конкретных условиях, например, на уровне моря на широте 45°, поскольку такие величины уточняются по мере появления новых экспериментальных данных.

3.2 Отсчет показаний ртутных барометров

При наблюдении давления с помощью ртутного барометра вначале следует отсчитать показания укрепленного термометра. Это следует сделать как можно быстрее, так как из-за присутствия наблюдателя температура термометра может повыситься. Для того чтобы поверхности ртути стабилизировались, следует легко постучать несколько раз пальцем в двух местах: в районе мениска и около чашки. Если барометр принадлежит к типу приборов с незакрепленной чашкой, то его следует отрегулировать так, чтобы привести ртуть в чашке в соприкосновение с риской нулевого отсчета. И, наконец, следует установить нониус барометра на мениске ртути, после чего можно снять показания. Нониус считается точно установленным, когда его горизонтальный нижний край касается самой высокой части мениска; при использовании увеличительного стекла должна быть видна чрезвычайно узкая полоса света между нониусом и вершиной поверхности ртути. В любом случае нониус не должен «срезать» верхнюю часть мениска. Глаз наблюдателя нужно располагать таким образом, чтобы нижние края нониуса, ближний и дальний, находились на одном уровне зрения.

3.2.1 *Точность отсчета показаний*

Отсчеты должны производиться с точностью до ближайшей 0,1 гПа. Обычно невозможно снять показания нониуса с лучшей точностью.

Для улучшения отсчетов по ртутным барометрам разработаны оптические и цифровые системы. Хотя эти системы обычно облегчают наблюдения, они могут вызвать новые источники ошибок, если они не спроектированы и откалиброваны тщательным образом.

3.2.2 *Изменение в инструментальной поправке*

Любое изменение значения инструментальной поправки, выявленное во время инспекции, следует тщательно проанализировать, учитывая следующее:

a) историю барометра;

b) опыт инспектора в работе по сравнениям;

c) величину выявленного изменения;

d) стандартное отклонение вычисленных разностей;

e) наличие запасного барометра на станции, точность поправки которого известна;

f) поведение переносных стандартных барометров во время перевозки;

g) согласованность или несогласованность значений давления на станции и на соседних станциях, определяемых по ежедневной синоптической карте, в случае принятия изменения;

h) был ли прибор почищен до начала сравнений.

Изменения в инструментальной поправке станционных барометров, называемые отклонением, вызываются следующими причинами:

a) изменениями капиллярной депрессии поверхности ртути вследствие ее загрязнения. В районах с сильным загрязнением атмосферного воздуха от промышленных источников загрязнение ртути может представлять серьезную проблему, связанную с необходимостью сравнительно частой очистки ртути и чашки барометра;

b) подъемом воздушных пузырьков через ртутный столб в пространство выше столба.

Ошибки могут быть случайными или систематическими — положительными или отрицательными в зависимости от причины.

Изменения инструментальной поправки могут быть обусловлены также следующими причинами:

a) ошибкой наблюдателя, вызванной тем, что наблюдатель не постучал пальцем по барометру перед снятием показаний, неправильно установил нониус или точку отсчета;

b) отсутствием температурного равновесия у станционного барометра или у переносного эталона;

c) неодновременностью снятия показаний при быстро изменяющемся давлении.

В барометрах типа Фортеня такие погрешности могут вызываться случайным смещением регулируемой шкалы, а также уменьшением или увеличением расстояния между опорными точками.

3.2.3 ***Допустимые изменения в инструментальной поправке***

Изменения в инструментальной поправке следует воспринимать следующим образом:

a) изменение поправки в пределах 0,1 гПа может не приниматься в расчет, если оно непостоянно;

b) изменение поправки более чем на 0,1 гПа, но менее чем на 0,3 гПа можно принять временно, до следующей поверки, уточняющей выявленные изменения;

c) изменение поправки, превышающее 0,3 гПа, можно временно принять, если барометр находился в чистке, а запасной барометр с известной поправкой не был задействован; этот барометр должен заменяться сразу же, как только появляется правильно откалиброванный барометр.

Барометры с изменениями в инструментальной поправке, определяемыми в пунктах (b) и (c) выше, требуют особого внимания. Они должны быть вновь откалиброваны или заменены при первой же возможности.

Наряду со станционными барометрами такие же критерии изменений в инструментальной поправке относятся и к переносным эталонам. Изменение в поправке менее 0,1 гПа можно не принимать во внимание, если оно не является постоянным. Более значительное изменение в поправке должно подтверждаться и приниматься только после неоднократных сравнений. Инструментальные поправки переносного эталона «до» и «после» перемещения не должны различаться более чем на 0,1 гПа. Поэтому в качестве переносных эталонов должны использоваться только барометры с длительной историей соответствующих поправок.

3.3 Приведение показаний барометра к стандартным условиям

Для того чтобы показания барометра, снимаемые в различные сроки и в разных местах, перевести в действительные значения атмосферного давления, следует внести следующие поправки:

a) инструментальную поправку;

b) поправку на силу тяжести;

c) поправку на температуру.

Для большинства оперативных метеорологических применений можно получить приемлемые результаты, следуя инструкциям изготовителя барометра, при условии, что эти процедуры обеспечивают получение показаний давления с требуемой погрешностью. Однако если эти результаты не удовлетворяют потребителя или требуется получить более высокую точность, то подробные процедуры, в соответствии с которыми следует вносить поправки на вышеуказанные факторы, можно найти в приложении 3.B.

3.4 Ошибки и погрешности ртутных барометров

3.4.1 *Неточности в температуре прибора*

Температура, определяемая по термометру при барометре, как правило, не соответствует средней температуре ртути, шкалы и чашки. Возникающую вследствие этого погрешность можно уменьшить, если разместить барометр в подходящем месте и использовать соответствующую процедуру наблюдения. Обращается внимание на частое возникновение значительного устойчивого вертикального градиента температуры в помещении, которое может вызывать значительные различия в температуре верхней и нижней частей барометра. Такого распределения температуры можно избежать с помощью электрического вентилятора, однако при этом существует опасность изменения местного давления. Вентилятор следует выключать перед началом наблюдения. При обычных условиях погрешность, связанная с уменьшением температуры, не превышает 0,1 гПа, если приняты такие меры предосторожности.

3.4.2 *Недостаточный вакуум*

Обычно предполагается, что внутри откалиброванного прибора имеется идеальный вакуум или незначительное количество газа над ртутным столбом, которым можно пренебречь при проведении калибровки. Любое изменение этих условий вызовет погрешность отсчетов давления. Грубую проверку на присутствие газа в трубке барометра можно провести, опрокинув барометр и прослушав щелчок, когда ртуть достигнет конца трубки, или проверяя запаянный конец барометрической трубки на наличие пузырька,

диаметр которого при наклонном положении барометра не должен превышать 1,5 мм. Таким способом нельзя обнаружить наличие водяного пара, поскольку он конденсируется, когда объем пространства уменьшается. Согласно закону Бойля, погрешность из-за наличия воздуха и ненасыщенного водяного пара над столбиком ртути будет обратно пропорциональна объему пространства над ртутью. Единственным приемлемым путем преодоления этой погрешности является повторная калибровка всей шкалы или, если погрешность значительна, трубку барометра следует заменить или наполнить вновь.

3.4.3 *Капиллярная депрессия поверхности ртути*

В конкретной трубке высота мениска и капиллярная депрессия[1] могут изменяться из-за изнашивания стеклянной трубки, загрязнения ртути, колебаний давления и положения ртути в трубке. Желательно, чтобы средняя высота мениска определялась во время первой калибровки и отмечалась в сертификате барометра. При отклонении высоты мениска от первоначальной никаких исправлений делать не следует, а эту информацию нужно использовать только как указание о необходимости тщательной проверки или повторной калибровки барометра. Изменение высоты мениска на 1 мм (от 1,8 до 0,8 мм) для 8-миллиметровой трубки может вызвать погрешность в отсчетах давления около 0,5 гПа.

Следует отметить, что значительные изменения угла соприкосновения ртути и стенки чашки в чашечном барометре могут вызвать небольшие, но заметные погрешности при измерении давлении.

3.4.4 *Нарушение вертикальности*

Если основание свободно подвешенного чашечного барометра обычной длины (около 90 см) переместится на 6 мм от вертикального положения, то определяемое давление повысится примерно на 0,02 гПа. Такие барометры, как правило, висят более вертикально, чем сифонно-чашечные.

Для сифонно-чашечного барометра этот источник погрешностей, однако, является более важным. Если, например, указатель исходной точки в чашке отклонен от оси примерно на 12 мм, то перемещение чашки только на 1 мм от вертикали вызовет погрешность в 0,02 гПа.

3.4.5 *Общая точность исправленных отсчетов давления*

Стандартное отклонение отдельного исправленного показания барометра, установленного на обычной метеорологической станции, должно быть в пределах 0,1 гПа. Эта погрешность обычно является результатом неизбежной неточности инструментальной поправки, недостоверной температуры прибора и погрешности из-за наличия колебательного эффекта поверхности ртути.

4. МЕРЫ БЕЗОПАСНОСТИ ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ РТУТИ

Ртуть используется довольно в больших количествах в барометрах и, являясь ядовитой, требует осторожного обращения. При температурах и давлениях, наблюдаемых на поверхности Земли, ртуть представляет собой жидкость. Там, где существует жидкая ртуть, в воздухе образуются пары ртути. Ртуть как в жидком, так и в газообразном состоянии может проникать в организм через кожу, а также при дыхании. Ее свойства описаны Саксом (1975). Во многих странах меры предосторожности при ее использовании предписываются

[1] Капиллярная депрессия представляет уменьшение высоты мениска жидкости, содержащейся в трубке, где жидкость (такая как ртуть) не смачивает стенки трубки. Мениск имеет выпуклую форму в верхней части.

правилами обращения с опасными веществами. Минаматская конвенция о ртути ЮНЕП вступила в силу в августе 2017 г. и оказывает значительное воздействие на использование ртути в метеорологических применениях.

В больших дозах ртуть может вызвать острое отравление; кроме того, она также может накапливаться в твердых и мягких тканях тела, поэтому воздействие в течение длительного времени даже малых доз может вызвать долгосрочные повреждения органов или даже смерть. Она поражает, главным образом, центральную нервную систему, рот и десны с такими симптомами, как боль, потеря зубов, аллергические реакции, тревоги и психические расстройства.

При применении барометров основной риск возникает в лабораториях, где барометры часто освобождаются от ртути или заполняются ею. Проблемы могут также возникнуть на метеорологических станциях, если в замкнутом помещении, где работают люди, какое-то количество ртути, например от разбитого барометра, остается в местах, где она может постоянно испаряться.

Опасность существует, даже если ртуть должным образом закрыта и если она тщательно удалена после пролива. При использовании ртути следует иметь в виду следующее:

a) емкости, содержащие ртуть, должны быть хорошо упакованы для предотвращения утечки или разбивания и должны регулярно проверяться;

b) пол помещения, где ртуть хранится и используется в больших количествах, должен иметь плотное непромокаемое и не растрескавшееся покрытие из материала, такого, как ПХВ. Небольшие трещины в полу, например между половыми досками, будут удерживать капли ртути. Предпочтительнее, чтобы покрывающий пол материал был загнут у стены примерно на 10 см с тем, чтобы не оставалось стыков между полом и стенами;

c) ртуть не следует хранить в металлическом контейнере, поскольку она реагирует с большинством металлов, за исключением железа, образуя амальгаму, которая также может быть опасной. Ртуть не должна соприкасаться ни с какими другими металлическими предметами;

d) ртуть не следует хранить вместе с другими химическими веществами, особенно с аминами, аммиаком или ацетиленом;

e) хранить ртуть в больших количествах и работать с ней всегда следует в хорошо проветриваемом помещении. С первичным материалом следует работать в вытяжном шкафу хорошего качества;

f) ртуть никогда не следует хранить вблизи любого источника тепла, поскольку она имеет сравнительно низкую точку кипения (357 °C) и может выделять опасные концентрации токсичного пара, особенно во время пожара;

g) при работе с ртутью помещение, в котором она используется, и персонал, работающий с ней, должны регулярно проходить освидетельствование на определение содержания опасных количеств ртути.

В соответствии с Минаматской конвенцией импорт и экспорт ртути будут отныне запрещены. В этом контексте производство, импорт и экспорт продуктов с добавлением ртути, таких как термометры, будут приостановлены к 2020 г. Согласно Конвенции (статья 4), «ни одна Сторона не разрешает посредством принятия соответствующих мер производство, импорт или экспорт продуктов с добавлением ртути, перечисленных

в части I приложения A [Конвенции] после наступления предусмотренного для этих продуктов срока поэтапного вывода из обращения» (ЮНЕП, 2013 г.). В частности, данный перечень включает (цитата):

> «перечисленные ниже неэлектронные измерительные устройства, кроме неэлектронных измерительных устройств, установленных на крупногабаритном оборудовании или используемых для высокоточного измерения, если отсутствуют приемлемые безртутные альтернативные решения:
>
> a) барометры;
>
> b) гигрометры;
>
> c) манометры;
>
> d) термометры;
>
> e) сфигмоманометры».

4.1 Разливы и удаление ртути

Существует два общепринятых метода удаления разливов ртути: с использованием соответствующей системы всасывания, описываемой ниже, или же путем адсорбции/амальгамации ртути в порошок.

В случае разлива ртуть должна удаляться незамедлительно. Наблюдатель (поверитель) должен быть в полиэтиленовых перчатках или рукавицах, иметь защитные очки, а при значительных разливах иметь также респиратор с фильтром, не пропускающим пары ртути. В зависимости от того, насколько велик разлив, ртуть вначале можно собрать с помощью вакуумной системы, а затем с помощью набора средств адсорбции для очистки от небольших капель. Использование набора средств адсорбции является обязательным, поскольку во время разлива десятки небольших капель диаметром менее 0,02 мм прилипают к поверхности, и их невозможно эффективно счистить с помощью вакуумной системы.

Во всасывающей системе ртуть поступает через пластиковую трубку небольшого диаметра в стеклянный флакон с водой, при этом отверстие трубки находится ниже уровня воды (примерно 3 см) во флаконе. Один конец пластиковой трубки более крупного диаметра помещен в воздушное пространство выше уровня воды во флаконе, а другой присоединен к пылесосу или вакуумному насосу. Вода не позволяет парам или каплям ртути поступать в пылесос или насос. Затем суспензию помещают в пластиковый контейнер с четкой надписью «На удаление».

При использовании поглощающих материалов для поглощения или амальгамации ртути можно использовать целый ряд соединений. К ним относятся цинковый или серный порошок или активированный уголь. Для ликвидации разливов ртути существуют специальные коммерческие наборы. Порошок распыляется на разлив и адсорбирует или амальгамирует ртуть. Полученный порошок сметается и помещается в пластиковый контейнер с четкой надписью «На удаление».

Собранную ртуть можно либо удалить, либо же восстановить. Более подробную информацию о том, каким образом удалять ртуть, можно получить от местных властей и/или поставщика. Поставщик может также проинформировать о способе восстановления и очистки ртути.

4.2 Пожар

Ртуть не горит, однако при пожаре выделяются значительные концентрации токсичных дымов. После пожара пары ртути конденсируются на ближайших холодных поверхностях, заражая большие площади, а также адсорбируются на открытых поверхностях, таких,

как обгоревшее дерево. Во время пожара следует покинуть место пожара, при этом стараться не попадать в дымные струи. Сообщить противопожарным учреждениям о местоположении и количестве имеющейся ртути.

4.3 Транспортировка

Транспортировка ртути или приборов, в которых содержится ртуть, воздушным транспортом регулируется Международной ассоциацией воздушного транспорта. По требованию авиакомпании предоставляют специальные условия для такой транспортировки. Транспортировка по железной дороге или автотранспортом в каждой стране обычно регулируется положением о перевозке опасных веществ.

Как правило, металлическая ртуть должна быть упакована в стеклянный или пластиковый контейнер. Упаковку контейнеров следует проводить чрезвычайно осторожно, чтобы не допустить их разрывов, и на них должны быть наклейки с четкими надписями. Приборы, содержащие ртуть, должны упаковываться в прочные коробки с амортизирующим материалом, которые являются непромокаемыми и непроницаемыми для ртути.

ПРИЛОЖЕНИЕ 3.B. ПРИВЕДЕНИЕ ПОКАЗАНИЙ РТУТНОГО БАРОМЕТРА К СТАНДАРТНЫМ УСЛОВИЯМ

Инструментальная поправка

Остаточные погрешности в градуировке шкалы барометра должны быть определены путем сравнения со стандартным прибором. Они могут включать ошибки из-за неточного положения деления шкалы, капиллярности и низкого вакуума. В сертификатах с данными о сравнении со стандартным барометром должны указываться инструментальные поправки не менее чем в четырех точках шкалы, например через каждые 50 гПа. В хорошем барометре эти поправки не должны превышать несколько десятых долей гектопаскаля.

Поправки на силу тяжести

Показания ртутного барометра при данном давлении и температуре зависят от значения силы тяжести, которая, в свою очередь, изменяется с широтой и высотой. Барометры для метеорологических применений градуируются так, чтобы давать правильные значения давления при стандартном ускорении силы тяжести, равном 9,806 65 м $с^{-2}$, а их отсчеты при других значениях ускорения силы тяжести должны быть исправлены. Рекомендуется следующий метод для приведения таких барометрических показаний к стандартному ускорению силы тяжести. Пусть B — наблюдаемый отсчет по ртутному барометру, B_t — отсчет по барометру, приведенный к стандартной температуре и исправленный инструментальной поправкой, но не приведенный к стандартному ускорению силы тяжести, B_n — отсчет по барометру, приведенный к стандартному ускорению силы тяжести и стандартной температуре и исправленный инструментальной поправкой, B_{ca} — климатологическое среднее B_t на станции, $g_{\varphi H}$ — местное ускорение силы тяжести (в м $с^{-2}$) на станции при широте φ и высоте над уровнем моря H, и g_n — стандартное ускорение силы тяжести 9,806 65 м $с^{-2}$.

Подходящими соотношениями будут следующие:

$$B_n = B_t \left(g_{\varphi H} / g_n \right) \tag{3.A.1}$$

или:

$$B_n = B_t + B_t \left[\left(g_{\varphi H} / g_n \right) - 1 \right] \tag{3.A.2}$$

Приближенное уравнение 3.A.3 можно использовать при условии, что результаты, полученные с его помощью, не отличаются более чем на 0,1 гПа от результатов, которые получены с помощью уравнения 3.A.2:

$$B_n = B_t + B_{ca} \left[\left(g_{\varphi H} / g_n \right) - 1 \right] \tag{3.A.3}$$

Местное ускорение силы тяжести $g_{\varphi H}$ должно вычисляться по процедуре, описанной в следующем разделе. Значение, полученное таким образом, соответствует Международной гравитационной стандартной системе 1971 г. (IGSN71).

Определение местного ускорения силы тяжести

Для того чтобы определить местное значение ускорения силы тяжести на станции с удовлетворительной точностью, необходимо использовать один из двух методов. Эти методы включают, в первом случае, использование гравиметра (прибора для измерения разности между значениями ускорения силы тяжести в двух точках), а во втором случае — так называемых аномалий Бугера. Предпочтение следует отдать методу с использованием гравиметра. Если нельзя применить ни один из этих методов, можно рассчитать местное значение ускорения силы тяжести, используя простую модель Земли.

Использование гравиметра

Предположим, что g_1 — известное местное ускорение силы тяжести в определенном пункте O. Обычно это установленная геодезической организацией базовая станция для измерения силы тяжести, на которой g_1 определяется в системе IGSN71. Предположим далее, что g — неизвестное местное ускорение силы тяжести в метеорологической гравитационной системе в некотором другом пункте X, для которого нужно определить значение g. Пусть Δg — разность ускорений силы тяжести в двух пунктах, определенных с помощью гравиметра. То есть Δg равно значению в пункте X минус значение в пункте O в соответствующей системе. Тогда g находится по уравнению 3.A.4:

$$g = g_1 + \Delta g \tag{3.A.4}$$

Использование аномалий Бугера

Если гравиметра нет, то для определения значения g в данной точке можно использовать проинтерполированные аномалии Бугера (A_B). Необходимо получить контурную карту этих аномалий из геодезической организации или с сети гравитационных станций, плотность расположения которых в окрестностях данного пункта составляет, по меньшей мере, одну станция на 10 000 км^2 (расстояние между станциями не более 100 км).

В качестве основы можно использовать гравитационную сеть с меньшей плотностью при условии, что геодезическая организация считает, что этот метод должен дать более надежные результаты по сравнению с результатами, полученными с использованием гравиметра.

Аномалии Бугера (A_B) получают из уравнения 3.A.5:

$$g_s = \left(g_{\varphi,0}\right)s - C \cdot H + A_B \tag{3.A.5}$$

где $(g_{\varphi,0})s$ — теоретическая величина ускорения силы тяжести на широте φ на уровне моря, полученная с помощью формулы, фактически используемой для вычисления аномалии Бугера. Эта формула выражает значение как функцию широты в некоторой системе. H — высота станции (в метрах) над уровнем моря, на которой измеряется g_s, g_s — наблюдаемая величина ускорения силы тяжести (в м с$^{-2}$), A_B — аномалия Бугера (в м с$^{-2}$) и C — коэффициент поправки высоты, используемый при вычислении аномалии Бугера (например, при использовании удельной силы тяжести 2,67 для земной коры этот коэффициент составляет 0,000 001 968 м с$^{-2}$).

Когда требуется значение g для данной станции, а измерить его нельзя, значение g_s следует вычислять по уравнению 3.A.5, при допущении, что соответствующее значение A_B для станции можно найти путем интерполяции на вышеупомянутых картах изолиний или получить по данным аномалий Бугера, построенным на основании измерений на гравитационной сети, как определено выше.

Вычисление местного ускорения силы тяжести

Если ни один из предыдущих методов не может быть применен, то местное значение можно вычислить менее точно, используя простую модель. В соответствии с Геодезической справочной системой 1980 г. теоретическое значение ($g_{\varphi,0}$) ускорения силы тяжести при СУМ на географической широте, φ, вычисляется с помощью уравнения 3.A.6:

$$g_{\varphi,0} = 9,806\,20\left(1 - 0,002\,644\,2\cos 2\varphi + 0,000\,005\,8\cos^2 2\varphi\right) \tag{3.A.6}$$

Значение ускорения силы тяжести в данной точке поверхности суши на наземной станции вычисляется с помощью уравнения 3.A.7:

$$g = g_{\varphi,0} - 0,000\,003\,086\,H + 0,000\,001\,118\left(H - H'\right) \tag{3.A.7}$$

где g — местное расчетное значение ускорения силы тяжести в м·с$^{-2}$ в данной точке; $g_{\varphi,0}$ — теоретическая величина ускорения силы тяжести в м·с$^{-2}$ на СУМ на географической

широте φ, вычисленная по уравнению 3.A.6 выше; H — фактическая высота данной точки в метрах над СУМ; и H' — абсолютная величина в метрах разницы между высотой данной точки и средней высотой действительной поверхности суши, заключенной в круг радиусом 150 км и с центром в данной точке.

Значение ускорения силы тяжести в данной точке при ее высоте H над СУМ не более 10 км вычисляется с помощью уравнения 3.A.8:

$$g = g_{\varphi,0} - 0,000\,003\,086\,H - 0,000\,006\,88\left(D - D'\right) \qquad \text{(3.A.8)}$$

где D — глубина моря в метрах ниже данной точки; и D' — средняя глубина моря в метрах в пределах круга радиусом около 150 км и с центром в данной точке.

На станциях или в точках на морском побережье местное значение ускорения силы тяжести должно рассчитываться насколько это возможно с использованием в пропорциональном отношении уравнений 3.A.7 и 3.A.8, взвешивая последний член уравнения 3.A.7 в соответствии с относительной площадью суши в пределах определенного круга, а последний член уравнения 3.A.8 в соответствии с относительной площадью моря в пределах круга. Алгебраически суммируя полученные таким образом значения, получаем поправку, которую можно применить к конечному члену правых сторон обоих уравнений так, как это показано в уравнении 3.A.9:

$$\begin{aligned} g = g_{\varphi,0} &- 0,000\,003\,086\,H + 0,000\,001\,118\,\alpha \\ &\left(H - H'\right) - 0,000\,006\,88\left(1-\alpha\right)\left(D - D'\right) \end{aligned} \qquad \text{(3.A.9)}$$

где α — доля суши, приходящаяся на заданную площадь, а H' и D' — фактические площади суши и водной поверхности соответственно.

Поправки на температуру

Показания барометра должны быть приведены к значениям, которые можно получить, если ртуть и шкала имеют стандартную температуру. Стандартной температурой для ртутных барометров является 0 °C. В том, что касается шкал, то в некоторых барометрах шкала показывает точные значения при этой температуре, а в некоторых — точные показания получаются при температуре 20 °C.

Поправка на температуру, которая требуется для барометров с регулируемой чашкой (барометры типа Фортеня), отличается от поправки, которая требуется для барометров с фиксированными чашками, хотя основные причины, связанные с необходимостью введения поправок на температуру, одинаковы для обоих типов, а именно: коэффициент объемного теплового расширения ртути отличается от коэффициента линейного теплового расширения шкалы. Таким образом, для каждого типа ртутных барометров требуется определенная поправка.

Для барометра с фиксированной чашкой требуется дополнительная поправка. Причина состоит в том, что увеличение температуры прибора вызывает увеличение, как объема ртути, так и площади поперечного сечения чашки (железной), а также трубки (стеклянной). Вследствие этих изменений площадей увеличение объема ртути в результате повышения температуры будет меньше, чем если бы площади сохранялись неизменными. Это происходит вследствие того, что в результате расширения чашки и трубки некоторая часть ртути барометра стремится занять дополнительную площадь.

У барометра с фиксированной чашкой по ряду причин следует проверять градуировку шкалы, сверяя барометр с основным стандартным барометром с регулируемой чашкой. Некоторые изготовители уменьшают объем ртути на такую величину, что показания испытываемого барометра согласуются с показаниями стандартного барометра при 20 °C. Можно составить таблицу поправок для шкал барометров с фиксированными чашками, используя показания основного стандартного барометра, шкала которого является точной, когда в качестве стандартной температуры используется 20 °C.

Температурные поправки для ртутных барометров

Исследователи провели обширные изучения температурных поправок для ртутных барометров, результаты которых приведены ниже:

1	(a)	Шкала правильная при 0 °C и дополнительно	C_t	$= -B\,(\alpha - \beta) \cdot t$
	(b)	объем ртути правильный при 0 °C	$C_{t,V}$	$= -B\,(\alpha - \beta) \cdot t - (\alpha - 3\eta) \cdot t \cdot 4V/3A$
2		Шкала правильная при 0 °C и объем ртути правильный при 20 °C	$C_{t,V}$	$= -B\,(\alpha - \beta) \cdot t - (\alpha - 3\eta) \cdot (t - 20) \cdot 4V/3A$
3	(a)	Шкала правильная при 20 °C	C_t	$= -B\,[\alpha \cdot t - \beta \cdot (t - 20)]$
	(b)	объем ртути правильный при 0 °C	$C_{t,V}$	$= -B\,[\alpha \cdot t - \beta \cdot (t - 20)] - (\alpha - 3\eta) \cdot t \cdot (4V/3A)$
	(c)	объем ртути уменьшается на величину, эквивалентную 0,36 гПа	$C_{t,V}$	$= -B\,(\alpha - \beta) \cdot t - (\alpha - 3\eta) \cdot t \cdot (4V/3A)$
4	Шкала правильная при 20 °C и			
	(a)	объем ртути правильный при 20 °C	$C_{t,V}$	$= -B\,[\alpha \cdot t - \beta\,(t - 20)] - (\alpha - 3\eta) \cdot (t - 20) \cdot (4V/3A)$
	(b)	объем ртути уменьшается на величину, эквивалентную 0,36 гПа	$C_{t,V}$	$= -B\,(\alpha - \beta) \cdot t - (\alpha - 3\eta) \cdot (t - 20) \cdot (4V/3A)$

где:

C_t = поправка на температуру;

$C_{t,V}$ = дополнительная поправка для барометров с фиксированной чашкой;

B = снятое показание барометра;

V = общий объем ртути в барометре с фиксированной чашкой;

A = эффективная площадь поперечного сечения чашки;

t = температура;

α = объемное тепловое расширение ртути;

β = коэффициент линейного теплового расширения шкалы;

η = коэффициент линейного теплового расширения чашки.

СПРАВОЧНАЯ И ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ЛИТЕРАТУРА

Всемирная метеорологическая организация, 2011 (обновлено в 2018 г.): *Наставление по кодам.* (ВМО-№ 306). Том I.1. Женева.

———, 2014: *Руководство по системам метеорологических наблюдений и распространения информации для метеорологического обслуживания авиации* (ВМО-№ 731). Женева.

Программа ООН по окружающей среде, 2013: *Минаматская конвенция о ртути.* Женева, ООН.

Brock, F.V. and S.J. Richardson, 2001: *Meteorological Measurement Systems*. New York, Oxford University Press.

European Association of National Metrology Institutes, 2017: *Guidelines on the Calibration of Electromechanical and Mechanical Manometers*. Calibration Guide No. 17 (Version 3.0). Braunschweig, Germany, EURAMET.

Liu, H. and G. Darkow, 1989: Wind effect on measured atmospheric pressure. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*,6(1):5–12.

Miksad, R., 1976: An omni-directional static pressure probe. *Journal of Applied Meteorology*,15:1215–1225.

Sax, N.I., 1975: *Dangerous Properties of Industrial Materials*. Van Nostrand Reinhold Co., New York.

United States Weather Bureau, 1963: *Manual of Barometry* (WBAN). 1, US Government Printing Office, Washington DC.

World Meteorological Organization, 1954: *Reduction of Atmospheric Pressure: Preliminary Report on Problems Involved*. Technical Note No. 7 (WMO-No. 36,TP. 12). Geneva.

———, 1964: *Note on the Standardization of Pressure Reduction Methods in the International Network of Synoptic Stations: Report of a Working Group of the Commission for Synoptic Meteorology*. Technical Note No. 61 (WMO-No. 154,TP. 74). Geneva.

———, 1966: *International Meteorological Tables* (S. Letestu, ed.) (1973 amendment).(WMO-No. 188, TP. 94). Geneva.

———, 1968: *Methods in Use for the Reduction of Atmospheric Pressure*. Technical Note No. 91 (WMO-No. 226,TP. 120). Geneva.

———, 1985: "Pressure tendency" and "discontinuity in wind" – discussion of two algorithms used in Swedish automatic weather stations (L. Bergman, T. Hovberg and H. Wibeck). Paper presented at the Third WMO Technical Conference on Instruments and Methods of Observation (TECIMO-III). Instruments and Observing Methods Report No. 22 (WMO/TD-No. 50). Geneva.

———, 1992: *The WMO Automatic Digital Barometer Intercomparison* (J.P. van der Meulen). Instruments and Observing Methods Report No. 46 (WMO/TD-No. 474). Geneva.

———, 2010: *Guidance on Instrumentation for Calibration Laboratories, Including Regional Instrument Centres* (D. Groselj) (WMO/TD-No. 1543). Instruments and Observing Methods Report No. 101. Geneva.

———, 2012: *A Laboratory Intercomparison of Static Pressure Heads* (E. Lanzinger and K. Schubotz). In: Papers and Posters presented at the WMO Technical Conference on Instruments and Methods of Observation (TECO 2012), Brussels, 16–18 October, poster P1(15). Instruments and Observing Methods Report No. 109. Geneva

———, 2014: *Guide to Meteorological Observing and Information Distribution Systems for Aviation Weather Services* (WMO-No. 731). Geneva.

———, 2015: *Guidance on the Computation of Calibration Uncertainties* (J. Duvernoy). Instruments and Observing Methods Report No. 119. Geneva.

ГЛАВА 4. ИЗМЕРЕНИЕ ВЛАЖНОСТИ

4.1 ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

Измерение влажности воздуха, а часто и ее постоянная регистрация требуются в большинстве областей метеорологической деятельности. Настоящая глава посвящена измерению влажности воздуха у поверхности Земли или вблизи нее. На практике для этого используется много различных методов, и по этому вопросу существует обширная литература. Методы описываются в публикациях Burt (2012), Harrison (2014) и Sonntag (1994). Более старый, но все еще полезный общий обзор многих принципов измерений приведен в работе Wexler (1965).

4.1.1 Определения

Ниже приведены определения характеристик, наиболее часто используемых при измерении влажности воздуха. Дополнительные определения даются в приложении 4.A.

Отношение смеси r**.** Отношение массы водяного пара к массе сухого воздуха;

Удельная влажность q**.** Отношение массы водяного пара к массе влажного воздуха;

Температура точки росы или точка росы t_d**.** Температура, при которой отношение смеси влажного воздуха, насыщенного относительно воды при заданном давлении, равно заданному отношению смеси; или более просто, температура, при которой влажный воздух насыщен водяным паром;

Относительная влажность воздуха U**.** Процентное отношение давления имеющегося в воздухе водяного пара к давлению водяного пара, насыщенного относительно воды, при одинаковых значениях температуры и давления; термин *«относительная влажность» часто сокращается как ОВ;*

Давление водяного пара e'**.** Парциальное давление водяного пара в воздухе;

Давление насыщенного водяного пара e'_w **и** e'_i**.** Давление водяного пара в воздухе при условии равновесия относительно поверхности воды и льда соответственно.

В приложении 4.B представлены формулы для расчета различных характеристик влажности воздуха. Эти варианты формул и коэффициентов были приняты ВМО в 1990 г.[1] Они удобны для расчетов и обладают достаточной точностью для всех обычных метеорологических применений строго в пределах температурных ограничений T > -45 °C для жидкой воды и T > -65 °C для льда (WMO, 1989*a*). С более точными, расширенными и подробными формулировками этих и других характеристик влажности воздуха можно ознакомиться в работе Sonntag (1990; 1994). Другие подробные формулировки[2] представлены в публикациях ВМО (ВМО, 1966, введения к таблицам 4.8–10).

[1] Приняты Исполнительным советом на его сорок второй сессии посредством резолюции 6 (ИС-XLII).
[2] Приняты Четвертым конгрессом посредством резолюции 19 (Kr-IV).

4.1.2 Единицы измерения

Для количественного выражения наиболее часто используемых физических величин, связанных с содержанием водяного пара в атмосфере, как правило, используются следующие единицы измерения и символы:

a) отношение смеси r и удельная влажность q (безразмерное отношение масс, в килограммах на килограмм кг·кг$^{-1}$);

b) давление водяного пара в воздухе e', e'_w, e'_i и атмосферное давление p (в единицах давления, например гПа)[3];

c) температура воздуха t, температура смоченного термометра t_w, температура точки росы t_d и температура точки инея t_f (в градусах Цельсия, °C);

d) температура воздуха T, температура смоченного термометра T_w, температура точки росы T_d и температура точки инея T_f (в K, используется для определенных расчетов влажности и для выражения разности, а не для общего выражения значений влажности);

e) относительная влажность воздуха U (в процентах; также часто используется альтернативный символ, % ОВ, чтобы избежать путаницы с другими процентными выражениями; используется в этой главе).

4.1.3 Метеорологические потребности

Измерения влажности у поверхности Земли необходимы для анализа метеорологических процессов и прогнозирования, для исследований климата; они находят применение в гидрологии, сельском хозяйстве, аэронавтике и в общих исследованиях окружающей среды. Особенно важное значение они имеют в связи с изменениями состояния воды в атмосфере.

Общие требования относительно диапазона, разрешения и точности измерений влажности приведены в настоящем томе, глава 1, приложение 1.A. Перечисленные в этой таблице погрешности представляют собой требования, а не характеристики работы конкретных приборов. На практике нелегко достичь таких значений погрешности, даже при использовании приборов высокого класса, которые надлежащим образом обслуживаются и эксплуатируются. В частности, значительно более низкая точность может быть получена при измерении влажности воздуха с помощью психрометра, размещаемого в метеорологической будке без принудительной вентиляции, и такая установка все еще встречается. Даже современные электронные приборы для измерения влажности могут иметь значительный по сравнению с потребностями дрейф.

При измерениях влажности для большинства целей приемлемы постоянные времени порядка одной минуты. Время ответных реакций, возникающих в рабочих приборах, обсуждается в п. 4.8.1.

4.1.4 Методы измерений и наблюдений

Общие обзоры приборов для измерения влажности в метеорологии и их использования приведены в работах Burt (2012), Harrison (2014) и Sonntag (1994). В работе Wexler (1965) приводятся несколько устаревшие, но все еще полезные сведения о многих принципах работы гигрометров.

[3] 1 гПа = 1 мбар.

4.1.4.1 *Обзор общих принципов измерений*

Прибор для измерения влажности воздуха называется гигрометром. В следующих подразделах приводятся физические принципы, наиболее широко используемые для измерения влажности в метеорологии. Отчеты по международным сравнениям различных гигрометров под эгидой ВМО приведены в публикациях WMO (2011a, 1989b).

Основные методы и типы приборов, используемые в метеорологии для измерения относительной влажности, рассматриваются в п. 4.1.4. Некоторые устаревшие или более не используемые методы и инструменты кратко описаны в приложении 4.C.

4.1.4.1.1 **Электронное зондирование**

В электронных приборах для измерения относительной влажности используется принцип изменения электрических свойств материала при поглощении переменного количества водяного пара из воздуха. В качестве материала для измерения относительной влажности обычно используется специальная полимерная пленка с нанесенными электродами. Измеренное изменение электрического импеданса (емкости или сопротивления) преобразуется для обозначения относительной влажности. Обычно в корпус прибора также встраивается компактный датчик температуры.

Для дистанционных измерений все шире используются гигрометры на основе датчиков относительной влажности, особенно там, где требуется непосредственно считывать показания относительной влажности и автоматически регистрировать данные.

Наряду с данными о влажности важно иметь информацию о температуре, поскольку относительная влажность сильно зависит от температуры, а также потому, что значения температуры необходимы для расчета других величин влажности (таких как точка росы) на основе относительной влажности. В электронных приборах для измерения относительной влажности для метеорологических наблюдений обычно не используется встроенный датчик температуры; нормально измерять температуру отдельно.

Наиболее удобной и передовой технологией для метеорологических применений являются емкостные полимерные гигрометры, поскольку их легче производить, обслуживать и калибровать. Более подробная информация об электрических емкостных гигрометрах приводится в п. 4.2.

Гигрометры электрического сопротивления описаны в приложении 4.C.4, хотя они обычно не используются в метеорологии.

4.1.4.1.2 **Психрометрический метод**

Психрометр измеряет охлаждение в результате испарения с влажной поверхности. Охлаждение в стабильном состоянии может быть соотнесено с парциальным давлением водяного пара и относительной влажностью.

Психрометр состоит из двух размещенных рядом друг с другом термометров. Поверхность чувствительного элемента одного из них накрыта рукавом, удерживающим тонкую пленку воды или льда, и такой термометр называется смоченным термометром или покрытым льдом термометром, соответственно. Чувствительный элемент второго термометра просто находится на воздухе, и этот термометр называется сухим термометром. Измерения проводятся в условиях принудительной или естественной вентиляции.

Психрометры по-прежнему используются для ведения наблюдений, хотя их все чаще заменяют на гигрометры на основе электронных датчиков. Иногда психрометры также используются в качестве рабочих эталонов.

Более подробная информация об этом типе приборов приведена в п. 4.3.

4.1.4.1.3 **Метод конденсации**

Температура конденсации водяного пара (точка росы или точка инея) связана с парциальным давлением воды, и ее можно измерить с помощью гигрометра с охлаждаемым зеркалом (конденсационного гигрометра).

Когда влажный воздух охлаждается, он в конечном итоге достигает насыщения относительно воды (или льда), и может образоваться конденсат в виде росы или инея. Температура, при которой достигается состояние насыщения, является точкой росы (или точкой инея).

В обычном гигрометре с охлаждаемым зеркалом используется небольшая зеркальная поверхность, охлаждаемая с помощью устройства, основанного на эффекте Пельтье, для получения пленки воды или льда. Обычно оптическое обнаружение конденсированной пленки используется в контуре обратной связи для контроля температуры на пороге постоянной конденсации. Эта температура измеряется с помощью встроенного температурного датчика. Измеряемый воздух обычно отбирается через трубку и пропускается через прибор.

Конденсационные гигрометры не находят широкого применения в области метеорологических наблюдений, но обычно используются в качестве лабораторных эталонных приборов.

Более подробная информация об этом типе приборов приведена в п. 4.4.

4.1.4.1.4 **Спектрометры водяного пара**

Молекула воды поглощает ЭМИ в ряде диапазонов длин волн и на дискретных длинах волн, и это свойство может быть использовано для получения меры молекулярной концентрации водяного пара в газе. Этот принцип применяется в различных приборах и в соответствии с ним используются линии поглощения разной силы для разных диапазонов измерений (более сильное поглощение для более низких концентраций).

В простейшей форме прибор измеряет передачу (или поглощение) узкополосного ИК-излучения от источника с фиксированной интенсивностью к калиброванному детектору, иногда в сравнении с эталонной длиной волны. Некоторые приборы, основанные на этом принципе, могут измерять диапазоны влажности, наблюдаемые на уровне земли.

В диапазоне следов водяного пара абсорбционные спектрометры измеряют поглощение ИК-излучения при многократном отражении при прохождении через газ в измерительной ячейке, что обеспечивает большую длину оптического пути для расширения диапазона вниз. Прибором особого типа является спектрометр с адаптивным диодным лазером. Амплитуда поглощения света зависит от концентрации водяного пара.

В нисходящей спектроскопии внутри кольцевого резонатора также используется ИК-поглощение при прохождении длинного пути для измерения следовых концентраций. Световой импульс многократно отражается в газе в измерительной ячейке. Замеряется время затухания интенсивности света, которое зависит от концентрации водяного пара.

Гигрометры Лаймана-альфа работают в ультрафиолетовом (УФ) диапазоне. Ультрафиолетовый свет от прибора поглощается молекулами воды пропорционально концентрации водяного пара. Так называемая «линия Лаймана-альфа» соответствует излучению, испускаемому или поглощаемому при энергетическом переходе атомарного водорода.

Абсорбционные спектрометры и прибор Лаймана-альфа используются для некоторых самолетных наблюдений, включая измерение следовых уровней воды на больших высотах полета. Преимущество для этих видов применения заключается в относительно быстром времени отклика таких приборов.

Более подробная информация об этом типе приборов приведена в п. 4.5.

4.1.4.1.5 **Механические методы**

Исторически сложилось так, что для обозначения относительной влажности в гигрометрах используется изменение размеров органических веществ. Процессы сорбции воды в веществах связаны с относительной влажностью, поскольку движущей силой является химический потенциал. В качестве чувствительных элементов использовались, в частности, волосы и в последнее время синтетические волокна. Изменение длины чувствительного элемента в зависимости от влажности усиливается с помощью системы рычагов, которая перемещает указатель для обозначения относительной влажности на шкале, графике (записях гигрографа) или, реже, передачи данных через преобразователь на электрический выход.

В метеорологии до сих пор используется только волосяной гигрограф, хотя он постепенно выходит из употребления. Более подробная информация об этом приборе приведена в п. 4.6.

4.1.4.2 ***Размещение приборов: общие требования***

Общие требования к размещению приборов для измерения влажности воздуха аналогичны требованиям для датчиков температуры, и для этой цели может быть использована размещенная надлежащим образом психрометрическая будка. Конкретно предъявляются следующие требования:

a) обеспечение защиты датчика от прямого солнечного излучения, атмосферных загрязняющих веществ, дождя и ветра;

b) контроль за тем, чтобы не создавался местный микроклимат внутри кожуха прибора или пробоотборника; следует иметь в виду, что дерево и многие синтетические материалы поглощают или выделяют водяной пар в зависимости от атмосферной влажности.

Информация о конкретных приборах приводится в пп. 4.2–4.6.

В классификации размещения площадок для станций наземных наблюдений на суше (см. настоящий том, глава 1, приложение 1.D) содержатся дополнительные рекомендации по выбору площадки и местоположению гигрометра на площадке для оптимизации репрезентативности.

4.1.4.3 ***Источники погрешностей: общие замечания***

Погрешности при измерении влажности могут быть вызваны любой из следующих причин:

a) изменение состояния пробы воздуха: например, под воздействием тепла либо источника или поглотителя водяного пара;

b) загрязнение датчика, например, грязью, брызгами морской воды, химическим воздействием или другими загрязнениями;

c) ошибка калибровки, включая корректировку влияния давления, температурный коэффициент датчика и электрического устройства сопряжения;

d) неправильное определение фазы вода/лед;

e) недочеты в конструкции прибора: например, препятствия для поступления тепла к смоченному термометру или передача тепла от столбика жидкости термометра к резервуару смоченного термометра;

f) медленное время отклика прибора или невозможность достижения стабильного равновесия в ходе эксплуатации;

g) неправильный отбор проб и/или выбор интервалов усреднения;

h) гистерезис: многие приборы для измерения влажности показывают разные значения в зависимости от того, из какого состояния они приближаются к текущим условиям: из более влажного или более сухого;

i) длительный дрейф между калибровками, особенно у электронных приборов для измерения влажности в условиях высокой относительной влажности;

j) радиационный нагрев датчика влажности до температуры выше температуры воздуха: например, из-за нагрева от радиационного экрана, который сам нагревается от солнечного излучения;

k) ошибка любого рода при измерении температуры, если значение температуры используется при расчете других величин влажности (например, при расчете точки росы по относительной влажности).

Постоянная времени датчика (см. п. 4.8.1), время усреднения выходного результата и потребности в данных должны быть взаимно согласованными.

Восприимчивость различных типов приборов для измерения влажности к каждому из вышеперечисленных факторов различается, так же как и значимость этих факторов; эти особенности рассматриваются далее в соответствующих разделах этой главы.

4.1.4.4 ***Уход за приборами: общие положения***

Руководства по эксплуатации подавляющего большинства имеющихся в продаже гигрометров имеются в сети Интернет в свободном доступе. Как правило, это хороший источник рекомендаций по обслуживанию приборов, а производители обычно могут проконсультировать по конкретным вопросам и будут рады это сделать.

Рассмотрим следующие процедуры технического обслуживания приборов:

a) Поддержание чистоты: приборы и их кожухи должны содержаться в чистоте. Некоторые приборы для измерения влажности, например, датчики волосяных гигрометров и гигрометров с охлаждаемым зеркалом, должны промываться дистиллированной водой, и такую процедуру следует проводить регулярно. Другие датчики, особенно имеющие определенное электролитическое покрытие, а также некоторые датчики с полимерной основой ни в коем случае нельзя очищать. В связи с этим чрезвычайно важно наличие инструкций по очистке приборов для наблюдателей и обслуживающего персонала.

b) Калибровка полевых приборов: все приборы для измерения влажности, эксплуатируемые в полевых условиях, нуждаются в регулярной калибровке. Калибровка выявляет любые ошибки в показаниях за счет сравнения с эталоном. В идеале такие ошибки устраняются путем внесения поправок (например, за счет корректировки, для электронного гигрометра). Любые неисправленные ошибки необходимо рассматривать как часть погрешности измерения. Калибровка должна

проводиться с использованием эталона с метрологической прослеживаемостью (JCGM, 2012) до национального стандарта, где это возможно (см. настоящий том, глава 1, приложение 1.B).

c) В промежутках между калибровками полезно проводить поверку полевых приборов. Для оценки надежности работы можно использовать проверку по другому прибору. Результаты поверок обычно оцениваются в соответствии с допуском или критерием, основанным на погрешности двух сравниваемых приборов.

Полевые гигрометры удобно поверять с помощью калиброванного электронного гигрометра. Прибор, используемый для таких поверок, должен быть уравновешен в соответствии с местной температурой окружающей среды и иметь время отклика в пределах периода, допустимого для поверки.

На рынке представлены системы насыщенных солевых растворов, которые можно использовать как для поверки, так и для калибровки. Однако они должны быть уравновешены до температуры окружающей среды, а для самой соляной смеси может потребоваться дополнительное время для уравновешивания, чтобы создать нужную влажность. Трудно быть уверенным в надежности таких приборов при их использовании в полевых условиях, если только они не применяются вместе с переносным эталоном (калиброванным гигрометром).

Преимущество использования аспирационного психрометра стандартного вида, такого как психрометр Ассмана, в качестве полевого эталона заключается в том, что он может проходить определенную самопроверку путем сравнения сухого и (без защитной оболочки) смоченного термометров и что при наличии хорошо работающего вентилятора можно ожидать надлежащей аспирации. Вместе в тем, во время работы психрометры выделяют водяной пар, и это может повлиять на условия влажности в окружающей атмосфере и, возможно, ограничить точность проверки, если прибор находится вблизи сравниваемого прибора.

Для проведения любой калибровки или поверки эталонный прибор и сам должен подвергаться калибровке через установленные для этого типа приборов интервалы времени.

Важно проводить калибровку электрических устройств измерительного преобразования, как на регулярной основе, так и в ходе их оперативного использования. Для этой цели вместо датчика может быть использован имитатор. Однако при этом необходимо проводить калибровку всей измерительной системы, начиная с датчика и кончая измерительным прибором, поскольку ошибки калибровки для датчиков и для устройств измерительного преобразования, которые по отдельности находятся в рамках спецификаций, при суммировании для всей измерительной системы могут оказаться за пределами спецификации.

Подробные требования к обслуживанию различных классов описываемых в настоящей главе гигрометров приводятся в соответствующих разделах ниже.

4.1.5 Последствия Минаматской конвенции с точки зрения измерения влажности

Минаматская конвенция ЮНЕП о ртути вступила в силу во всем мире в августе 2017 года и запрещает любое производство, импорт и экспорт ртутных термометров (см. настоящий том, глава 1, 1.4.2). В связи с этим больше не рекомендуется применять приборы для измерения влажности, основанные на ртутных термометрах, и настоятельно поощряются надлежащие меры для их скорейшей замены на современные альтернативы.

4.2 ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ЕМКОСТНЫЕ ГИГРОМЕТРЫ

4.2.1 Соображения общего характера

В электронных приборах для измерения относительной влажности используется принцип изменения электрических свойств вещества при поглощении переменного количества водяного пара из воздуха. Процессы сорбции воды в веществах связаны с относительной влажностью, поскольку движущей силой является химический потенциал. В качестве материала для измерения относительной влажности обычно используется специальная полимерная пленка с нанесенными электродами. Измеренное изменение электрического сопротивления преобразуется для обозначения относительной влажности. Обычно в корпус прибора также встраивается компактный датчик температуры.

Датчик влажности, как правило, размещается в корпусе с встроенным компактным датчиком температуры. Область датчика обычно защищена ограждением или фильтром. Кроме того, сам датчик влажности часто непосредственно заключен в корпус из защитного пористого материала.

Как правило, в приборы встраивается линеаризующая электроника, при необходимости с температурной компенсацией, для оптимизации точной реакции на относительную влажность. Производители поставляют различные системы отображения, обработки или регистрации данных. В некоторых случаях такие системы являются неотъемлемой частью прибора; а в других кабель подсоединяется к соответствующему блоку электроники.

Гигрометры с электрическими датчиками относительной влажности воздуха все чаще используются в дистанционных приборах, в частности там, где требуется прямое визуальное отображение значений относительной влажности.

4.2.2 Электрический емкостный гигрометр

Данный метод основан на явлении изменения диэлектрических свойств твердого гигроскопичного материала в зависимости от относительной влажности окружающего воздуха. Для изготовления датчиков влажности выбираются или специально разрабатываются чувствительные диэлектрические материалы. Наиболее часто используются полимеры благодаря их стабильности, селективности и сорбции воды, а также потому, что с помощью таких материалов достигаются надлежащие свойства конденсатора. Вода, находящаяся в связанном состоянии в полимере, изменяет его диэлектрические свойства вследствие большого дипольного момента молекулы воды.

Как правило, датчик влажности размещается на керамической или стеклянной подложке. Это стопка параллельно расположенных тонких пленок с толщиной слоя от нескольких нанометров до одного микрометра. Активная часть датчика влажности состоит из полимерной пленки, помещаемой между двух электродов для получения конденсатора. Верхний электрод проницаем для молекул воды, а полимер поглощает воду пропорционально относительной влажности. Верхний электрод также может быть покрыт защитным слоем для повышения стабильности в суровых условиях окружающей среды.

Емкость служит основой для измерения относительной влажности. Номинальное значение емкости может составлять лишь несколько сот пикофарад в зависимости от размера электродов и толщины диэлектрика. Это, в свою очередь, влияет на диапазон частоты возбуждения, которая используется для измерения полного сопротивления данного устройства и, как правило, составляет, по меньшей мере, несколько килогерц; соответственно требуется, чтобы соединения между датчиком и электронным средством обработки сигнала были короткими для сведения к минимуму паразитной емкости. В связи с этим в прибор с емкостными датчиками часто встраивается система обработки сигналов. Типичная чувствительность для устройства в 200 pF составляет 0,5 pF на % ОВ.

Для предотвращения образования конденсата, когда условия приближаются к 100 % ОВ, производители приборов предлагают различные варианты обогрева. Датчик может

нагреваться встроенным нагревателем или нагревается весь корпус. Управление нагревом осуществляется либо по разности температур между температурой окружающей среды и внутренней температурой, либо по пороговому значению относительной влажности. Для получения хороших результатов измерений очень важно точно измерять как температуру датчика влажности, так и температуру окружающего воздуха. Используя относительную влажность, измеренную датчиком, температуру датчика и температуру воздуха, можно рассчитать относительную влажность воздуха. Даже при неизвестной температуре воздуха измерение с подогревом может применяться для определения температуры точки росы. Дрейф, связанный с химическим воздействием, можно уменьшить, используя встроенный нагреватель для нагрева датчика влажности с повторяющимися интервалами в течение короткого времени при высокой температуре. Недостатком такого способа является время простоя во время нагрева.

4.2.3 Процедура наблюдений

Гигрометры с электронными датчиками относительной влажности часто используются в АМС, а также везде, где требуется измерение влажности без обслуживания персоналом или с регистрацией данных.

Наблюдения температуры крайне важны наряду с наблюдениями влажности, поскольку значения температуры используются для расчета других величин влажности (таких как точка росы) на основе относительной влажности. Для этого обычно используется отдельный термометр, а не встроенный датчик температуры в электронных приборах для измерения относительной влажности.

4.2.4 Размещение и установка

Корпус гигрометра следует монтировать внутри психрометрической будки. Необходимо следовать рекомендациям производителей относительно установки каждого конкретного прибора. Для минимизации загрязнения, которое может привести к прогрессирующей ошибке, важно использовать защитный фильтр. Приборы, в которых в качестве чувствительного элемента используется гигроскопичный электролит, будут повреждены при прямом контакте с жидкостью. Намоченные емкостные датчики часто могут хотя бы частично восстановиться после просушивания. Однако воздействие высокой или конденсирующейся влажности связано с долгосрочным дрейфом некоторых емкостных датчиков.

4.2.5 Источники ошибки

Измерения с помощью датчиков относительной влажности могут быть особенно подвержены влиянию любой из следующих причин ошибок:

– Может присутствовать ошибка калибровки, когда при первоначальной настройке прибора сохраняются остаточные неисправленные ошибки. Такая ошибка может иметь нелинейный характер или какую-либо иную форму. Также может оказаться, что она зависит от температуры, поскольку обычно невозможно провести калибровку при нескольких температурах или определить температурную зависимость калибровочных характеристик.

– Датчики могут подвергаться загрязнению; например, грязью, брызгами морской воды, химическим воздействием или другими загрязнениями. Ошибка такого типа может проявляться в виде снижения чувствительности во всем диапазоне, с завышением показаний при низкой влажности и занижением показаний при высокой влажности, или же она может обнаруживать какую-либо другую закономерность.

– Гистерезис может воздействовать на электронные приборы для измерения влажности так, что они будут показывать разные значения в зависимости от того, из какого

состояния они приближаются к текущим условиям: из более влажного или более сухого. Время отклика также может отличаться для нарастающих и уменьшающихся изменений состояния.

– Длительный дрейф между калибровками может быть значительным, особенно для приборов, подверженных воздействию высокой или конденсирующейся относительной влажности (роса, туман или другое увлажнение). Такой дрейф чаще всего происходит вверх при высокой влажности, хотя может идти и вниз, и сильно варьируется (Burt, 2012; Bell et al., 2017). Дрейф в сторону увеличения приводит к завышению показаний при высоких значениях влажности, например, отображению 100 % ОВ при состоянии 95 % ОВ. Датчики с подогревом потенциально менее подвержены такому дрейфу.

– Радиационный нагрев датчика влажности до температуры выше температуры воздуха может означать, что датчик теплее воздуха. Это может происходить даже внутри будки, если сама будка нагревается от солнечного излучения. Это может приводить к ложному занижению показаний относительной влажности.

Ошибка любого рода при измерении температуры имеет важное значение с точки зрения относительной влажности, если оба показателя используются при расчете других величин влажности (например, при расчете точки росы по относительной влажности). В таких расчетах ошибка в 0,1 °C вблизи 20 °C имеет такой же эффект, как и ошибка в 0,6 % ОВ. В публикации ВМО (WMO, 2011*a*) приводится подробное описание этого эффекта при других температурах.

4.2.6 Калибровка и инспекция в полевых условиях

При калибровке выявляются любые ошибки в показаниях путем сравнения с эталоном. Калибровка приборов для измерения относительной влажности обычно проводится в лаборатории и включает сравнение с эталоном относительной влажности, что часто производится в камере для климатических испытаний. Калибровки должны проводиться с использованием эталона с метрологической прослеживаемостью до национального стандарта, где это возможно (см. настоящий том, глава 1, приложение 1.B). Более подробная информация приведена в п. 4.7 и в главе 4 тома V настоящего Руководства.

В идеале калибровка осуществляется путем внесения корректировок (обычно, для электронного гигрометра путем регулировки прибора). Для некоторых электронных гигрометров корректировка может быть выполнена с помощью программного обеспечения производителя во время калибровки. В других случаях регулировка может осуществляться путем настройки потенциометров, соответствующих «диапазону» и «нулю» показаний гигрометра. Хотя калибровочные поправки можно применять арифметически, это имеет больший смысл в лабораторных условиях, чем в метеорологических применениях. Любые неисправленные ошибки калибровки необходимо рассматривать как часть погрешности измерения.

Полевые инспекции электронных приборов для измерения относительной влажности включают в себя проверку состояния и функционирования приборов. В частности, проверяется состояние фильтра датчика, который очищается или заменяется в случае загрязнения.

Полевые поверки гигрометров удобно проводить с помощью другого калиброванного электронного гигрометра. Прибор, используемый для таких проверок, должен быть уравновешен в соответствии с местной температурой окружающей среды. Он должен быть либо откалиброван при температуре использования, либо должна быть сделана поправка для различных температур эксплуатации. Время отклика гигрометра, используемого для любой проверки в полевых условиях, должно находиться в пределах периода времени, отведенного на проверку. Обычно в ходе проверки имеется определенный критерий приемлемости.

В принципе, проверку приборов для измерения относительной влажности в полевых условиях можно проводить с помощью солевых систем, которые поставляются некоторыми производителями приборов. Такие системы надежно работают только после того, как придут в полное равновесие с местной температурой окружающей среды. В связи с этим трудно быть уверенным в надежности таких приборов при их использовании в полевых условиях. В принципе, для проверки на месте можно использовать генератор влажности в полевых условиях, но они не так широко доступны. Более подробная информация приведена в разделе 4.7.6.3.

В качестве полевого эталона рекомендуется использовать аспирационный психрометр стандартного вида, такой как психрометр Ассмана. Вместе в тем, во время работы психрометры выделяют водяной пар, и это может повлиять на окружающие условия влажности и, возможно, сказаться на точности проверки, если прибор находится вблизи сравниваемого прибора.

Для любой калибровки или проверки эталонный прибор и сам должен подвергаться калибровке через установленные для такого типа приборов интервалы времени.

При необходимости проверка электронного гигрометра должна включать проверку интерфейсов регистрации данных. Для этой цели вместо датчика может быть использован имитатор. В зависимости от конфигурации системы может потребоваться проверка всей системы (гигрометр и интерфейс). Например, в более старых системах ошибки калибровки для датчиков и для устройств измерительного преобразования, которые по отдельности находятся в рамках спецификаций, при суммировании для всей измерительной системы могут оказаться за пределами спецификации.

4.2.7 **Обслуживание**

Наблюдателям рекомендуется содержать гигрометр в чистоте (см. 4.1.4.4). Если прибор оснащен сменным защитным фильтром-крышкой, его следует визуально осмотреть на наличие признаков загрязнения и при необходимости заменить. При необходимости корпус гигрометра можно очистить влажной тканью, стараясь не намочить датчик. Электронные элементы нельзя очищать в полевых условиях, так как это может нарушить их калибровку.

Временные интервалы для обслуживания и калибровки приборов для измерения относительной влажности в полевых условиях обычно зависят от ожидаемого и требуемого уровня долгосрочной стабильности, от местоположения, а также от наличия средств и персонала. Срок службы до выхода из строя для электронных приборов для измерения относительной влажности, используемых на метеостанциях во влажном климате, обычно составляет от шести месяцев до двух и более лет. На более коротких временных интервалах часто наблюдается значительный дрейф датчика. Причиной поломок (особенно на ранних этапах) обычно является элемент датчика. Обычно его можно заменить и откалибровать гигрометр перед последующим использованием.

В некоторых случаях обслуживание электронного гигрометра в полевых условиях означает замену вышедшего из строя прибора. В других случаях полевые гигрометры заменяются (возможно, ежегодно) новыми откалиброванными приборами, а выведенный из эксплуатации прибор отправляется на обслуживание, повторную калибровку и (при удовлетворительном результате) повторную установку. Если гигрометр вышел из строя, часто ситуацию можно исправить путем замены только элемента датчика с последующей повторной калибровкой.

Для того чтобы устранить тенденцию датчиков к дрейфу, можно применять более интенсивный подход к управлению, если позволяют ресурсы. Дрейф датчика может быть оценен по возвращении из полевых условий путем сравнения с эталоном на калибровочной станции. Приборы, показывающие незначительный дрейф, можно отрегулировать, а затем откалибровать для повторного применения. Однако можно ожидать, что в дальнейшем они будут менее надежны по сравнению с новыми приборами.

Если у прибора обнаружен более значительный дрейф в полевых условиях, то его можно переоборудовать (путем покупки нового чувствительного элемента, его замены в лаборатории и калибровки обновленного прибора). Однако после нескольких установок можно ожидать ухудшения характеристик, и политика плановой замены таких гигрометров спустя определенный период времени может обеспечить более высокую общую надежность наблюдений.

Руководства по эксплуатации подавляющего большинства имеющихся в продаже гигрометров свободно доступны в сети Интернет. Как правило, это хороший источник рекомендаций по обслуживанию приборов, а производители обычно могут проконсультировать по конкретным вопросам и будут рады это сделать.

4.3 ПСИХРОМЕТР

4.3.1 Соображения общего характера

4.3.1.1 *Психрометрические формулы*

Обычная практика заключается в определении парциального давления водяного пара e' при условиях наблюдения из следующих полуэмпирических психрометрических формул:

$$e' = e'_w\left(p, t_w\right) - Ap\left(t - t_w\right) \tag{4.1}$$

и:

$$e' = e'_i\left(p, t_i\right) - Ap\left(t - t_i\right) \tag{4.2}$$

где e'_w — парциальное давление насыщенного водяного пара относительно воды при температуре t_w и давлении p смоченного термометра; e'_i — давление насыщенного пара относительно льда при температуре t_i и давлении p покрытого льдом термометра; p — атмосферное давление; t — температура сухого термометра; и A — психрометрический коэффициент (последний термин использовать предпочтительнее, чем термин «постоянная психрометра», который является неправильным, но иногда употребляется.)

Формулы и коэффициенты, соответствующие различным типам психрометра, рассматриваются ниже.

4.3.1.2 *Спецификация психрометра*

Оборудование, используемое для психрометрических наблюдений, должно, насколько это практически возможно, соответствовать следующим рекомендациям:

a) на уровне моря и тогда, когда используются термометры тех типов, которые обычно применяются на метеорологических станциях, скорость вентиляции термометров должна быть в пределах 2,2–10 м $с^{-1}$. Если высота существенно отличается от уровня моря, эти предельные значения скорости воздуха должны корректироваться, и их изменение обратно пропорционально изменению плотности атмосферы;

b) смоченный и сухой термометры должны быть защищены от воздействия любого излучения, причем предпочтительно, как минимум, двумя щитками. В психрометре с принудительной вентиляцией, таком как психрометр Ассмана, эти щитки могут быть выполнены из отполированного, неокрашенного металла и отделены от остальной части прибора изолирующими материалами. В принципе предпочтительным является термоизолирующий материал, и именно этот материал должен использоваться в психрометрах с естественной вентиляцией;

c) в случае, когда психрометр установлен в защитной будке с жалюзи и с принудительной вентиляцией, для обоих термометров должны быть предусмотрены отдельные вентиляционные каналы. Вход в эти каналы должен быть размещен таким образом, чтобы приборы измеряли истинную температуру окружающего воздуха, а воздух должен выходить из будки таким образом, чтобы не возникало его рециркуляции;

d) необходимо очень тщательно следить за тем, чтобы не происходило передачи значительного количества тепла от мотора вентилятора к термометрам;

e) резервуар с водой и фитиль должны быть установлены таким образом, чтобы вода поступала на резервуар (датчик) смоченного термометра и не влияла на температуру, показываемую сухим термометром.

4.3.1.3 *Обвязка из ткани для смоченного термометра*

В смоченном термометре, как правило, присутствует фитиль из хлопковой или аналогичной ткани, тесно облегающий чувствительный элемент с тем, чтобы поддерживать на нем ровную пленку воды, которая поступает либо непосредственно, либо благодаря какой-либо форме капиллярной подачи из резервуара. Фитиль обычно имеет форму конуса и плотно облегает резервуар термометра (или сам термометр), поднимаясь, по меньшей мере, на 2 см выше резервуара (датчика) термометра, чтобы охладить большую зону и уменьшить погрешность из-за недостаточного погружения. Для смоченного термометра следует использовать дистиллированную воду.

Ткань, которая покрывает смоченный термометр, должна быть тонкой и плотной. Если поставщик предлагает фитиль, рассчитанный на размер термометров, следует использовать именно его. Перед помещением ткани на термометр ее следует тщательно промыть в водном растворе бикарбоната натрия ($NaHCO_3$), при концентрации 5 г на литр, и затем несколько раз прополоскать в дистиллированной воде. В качестве альтернативного варианта можно прикипятить ее в разбавленном растворе чистого детергента в воде, а затем в дистиллированной воде. При работе с чистым фитилем или обвязкой из ткани следует проявлять большую осторожность, чтобы предотвратить их загрязнение от рук и, например, использовать очищенный пинцет или чистые пластиковые перчатки, не оставляющие следов.

Очень важен надлежащий уход за смоченным термометром. Любое видимое загрязнение фитиля или обвязки из ткани для смоченного термометра следует рассматривать как абсолютное свидетельство необходимости их немедленной замены.

Помимо этого наблюдателям следует заменять обвязку из ткани и фитиль для смоченного термометра по меньшей мере один раз в неделю во всех используемых на постоянной основе психрометрах. В местах, расположенных недалеко от моря и промышленных районах эти элементы прибора следует заменять чаще. Необходимо также часто проверять, насколько хорошо поступает вода, и в случае необходимости проводить замену воды или пополнение ее запаса.

При жарких сухих условиях предпочтительно смачивать тканевую оболочку водой из пористого сосуда. При этом в результате испарения с пористой поверхности обеспечивается предварительное охлаждение воды. Сосуд следует размещать в тени, однако, не в непосредственной близости от психрометра.

4.3.1.4 *Работа со смоченным термометром при температуре ниже точки инея*

При температуре ниже точки инея работать с психрометром трудно; тем не менее, он все же используется в климатических условиях, при которых возможна такая температура. При замерзании фитиля его использование для перемещения воды из резервуара к обвязке из ткани на смоченном термометре за счет действия капилляров невозможно. При таких

условиях необходимо тщательно следить за тем, чтобы на обвязке из ткани образовывался лишь очень тонкий слой льда. При этом совершенно необходимо обеспечивать принудительную вентиляцию термометров; если вентиляция отсутствует, работа со смоченным термометром становится чрезвычайно трудной.

Термометр в аспирационных и пращевых психрометрах должен смачиваться непосредственно перед измерением. По мере возможности следует обеспечивать также, чтобы температура воды была близка к точке замерзания. Если на нижней части резервуара термометра образуется нарост льда, то его следует поместить в воду на время, достаточное, для того чтобы лед растаял.

Период времени, необходимый для того, чтобы смоченный термометр начал показывать стабильный результат после смачивания обвязки из ткани, зависит от скорости вентиляции и от реальной температуры смоченного термометра. При отсутствии вентиляции этот период времени для термометра составляет от 15 до 45 минут, в то время как для вентилируемого термометра потребуется гораздо меньшее время. Очень важно следить, чтобы образование нового слоя льда на резервуаре термометра происходило в надлежащее время. Если наблюдения на обычном психрометре проводятся каждый час, то после смачивания на ткани образуется слой льда, который, как правило, сохраняется до следующего измерения. Если интервал времени между наблюдениями превышает один час, то наблюдателю следует посещать психрометрическую будку и смачивать термометр для того, чтобы перед каждым наблюдением на резервуаре термометра образовывался свежий слой льда.

Испарение слоя льда между снятиями показаний можно предотвратить или замедлить, помещая смоченный термометр в небольшую стеклянную трубку или закрывая вентиляционное отверстие смоченного термометра между периодами измерений. В этом случае смоченный термометр не будет показывать точную температуру во время этих вмешательств. (Отметим, что последнюю операцию не следует проводить в тех случаях, когда это может привести к перегреву вентилятора.)

Смоченный термометр может показывать разную температуру в зависимости от того, что будет на смоченной ткани во время измерения — лед или переохлажденная вода. Исключение этих различий достигается следующими путями:

a) на основе использования разных формул или таблиц для случаев, когда смоченный термометр покрыт слоем льда или пленкой переохлажденной воды. Для того чтобы определить, какую таблицу использовать, до резервуара смоченного термометра следует дотрагиваться кристаллом снега, карандашом, иглой или другим предметом сразу же после завершения наблюдения. Также полезно проверить степень блеска на поверхности резервуара смоченного термометра, если резервуар замерз. Если температура повышается, приближаясь к 0 °C, а затем снова понижается, можно предположить, что вода на резервуаре смоченного термометра в срок наблюдения была переохлажденной;

b) на основе использования формул или таблиц, подходящих для случаев, когда резервуар смоченного термометра покрыт льдом, инициируя замерзание переохлажденной воды способом, указанным в пункте (a). В целях экономии времени и обеспечения покрытия смоченного термометра льдом наблюдателю следует инициировать замерзание воды при каждом наблюдении сразу же после смачивания резервуара термометра. Наблюдая за поведением смоченного термометра при точке замерзания, обычно можно определить, покрыт резервуар льдом или переохлажденной водой. Рекомендуется, однако, инициировать замерзание воды при каждом наблюдении, когда предполагается, что температура смоченного термометра ниже 0 °C, независимо от того, проводится или нет наблюдение за поведением термометра после его смачивания.

Первый метод, как правило, позволяет получить результаты быстрее, однако он требует использования двух таблиц, а это может привести к некоторой путанице.

4.3.1.5 *Общая процедура проведения наблюдений*

Для измерения температуры необходимо следовать процедурам, описанным в настоящем томе, глава 2. В дополнение к ним надо выполнять следующие требования:

a) в случае если необходимо заменить обвязку из ткани, фитиль или воду для смоченного термометра, это следует делать с достаточной заблаговременностью до проведения наблюдения; период времени, необходимый для того, чтобы была достигнута правильная температура смоченного термометра, будет зависеть от типа психрометра;

b) показания термометров следует считывать до ближайшей 0,1 градуса;

c) при проведении наблюдения необходимо считывать показания с двух термометров, по мере возможности одновременно (разумно сначала снять показания сухого термометра, затем влажного и, наконец, снова сухого), и следить, чтобы к смоченному термометру поступало достаточное количество воды.

4.3.1.6 *Использование электрических термометров сопротивления*

Вместо стеклянных жидкостных термометров все чаще используются прецизионные платиновые электрические термометры сопротивления, особенно в тех случаях, когда требуется дистанционное считывание результатов и проведение измерений на постоянной основе. Необходимо, чтобы устройства и их соответствующая электроника удовлетворяли требованиям, предъявляемым к рабочим характеристикам. Эти требования подробно изложены в настоящем томе, глава 2. Особое внимание следует всегда уделять самонагреву, возникающему в электрических термометрах.

Психрометрические формулы в приложении 4.B, используемые для аспирационных психрометров Ассмана, действительны также, когда вместо стеклянных ртутных приборов используются ПТС при различных конфигурациях элементов психрометра и термометров. Формула для воды на смоченном термометре действительна также для некоторых психрометров с поперечной вентиляцией (WMO, 1989*a*), т. е. при которой направление потока воздуха перпендикулярно оси термометра.

4.3.1.7 *Психрометрические формулы и таблицы*

Ниже представлена в общем виде некоторые действующие принципы и практика построения психрометрических таблиц.

Температура смоченного термометра T_w для большинства приборов не идентична теоретической термодинамической температуре смоченного термометра, определение которой дано в приложении 4.A и значение которой зависит только от p, T и r (отношение смеси). Температура, измеряемая практическим смоченным термометром, зависит также от ряда параметров, находящихся под влиянием динамики передачи тепла через поверхность раздела жидкость/газ (в которой газ должен характеризоваться в понятиях составляющих его ламинарных и турбулентных слоев). Описание удовлетворительной термодинамической модели выходит за пределы содержания настоящей работы. Несоответствие между термодинамической и измеренной температурами смоченного термометра разрешается на практике посредством эмпирического определения психрометрического коэффициента A (WMO, 1992).

В целом коэффициент A зависит от конструкции психрометра (в частности, системы смоченного термометра), диаметра термометров, скорости потока воздуха, обтекающего смоченный термометр (называемой скоростью вентиляции (аспирации)), температуры и влажности воздуха. При низкой скорости вентиляции значение A существенно зависит от скорости вентиляции. Однако при скорости вентиляции, равной 3–5 м·с$^{-1}$ и более (для термометров обычного размера), значение A становится, в сущности, независимым

от скорости вентиляции и остается практически неизменным для любых хорошо спроектированных психрометров. Значение A слабо зависит от температуры и влажности воздуха, и его зависимостью от этих переменных, как правило, пренебрегают. В случае, когда смоченный термометр покрыт льдом, коэффициент A меньше, чем когда он покрыт водой.

4.3.1.8 *Источники погрешностей в психрометрии*

Следует рассмотреть следующие основные источники погрешностей:

a) погрешности термометров. При психрометрических измерениях очень важно знать инструментальные погрешности используемых термометров для рабочего диапазона температур и проводить корректировку показаний приборов с учетом этих погрешностей еще до использования формул или таблиц влажности (психрометрических таблиц). В целом, следует предварительно выбирать термометры с минимальными погрешностями.

   Любые другие ошибки определения температуры смоченного или покрытого льдом термометра, вызванные другими причинами, должны устраняться таким же образом, что и погрешности термометров.

   Таблица 4.1 иллюстрирует погрешности расчета относительной влажности воздуха ε (U) по показаниям смоченного или покрытого льдом термометров, инструментальные ошибки которых ε (t_x) (где x — это соответственно вода при $t > 0$ °C и лед при $t < 0$ °C) равны 0,5 и 0,1 K, для относительной влажности $U = 50$ % ОВ и диапазона действительных значений температуры воздуха (при этом подразумевается, что показания сухого термометра соответствуют действительному значению температуры воздуха).

b) коэффициенты времени отклика термометров (иногда называемые коэффициентами инерции). Для получения наивысшей точности при работе с психрометром желательно обеспечить такое положение, при котором как смоченный, так и сухой

Таблица 4.1. Значения погрешности расчета относительной влажности воздуха за счет неучета инструментальных ошибок смоченного и покрытого льдом термометров ε (t_x) при U = 50 % ОВ

Температура воздуха, °C	*Значения погрешности расчета относительной влажности ε (U) в % за счет неучета инструментальных погрешностей смоченного и покрытого льдом термометров*	
	ε (t_x) = 0,5 K	*ε (t_x) = 0,1 K*
–30	60	12
–20	27	5
–10	14	3
0	8	2
10	5	1
20	4	0,5
30	3	0,5
40	2	0,5
50	2	0

термометры имели бы примерно одинаковый коэффициент времени отклика; в случае, когда термометры имеют резервуары одинакового размера, время отклика смоченного термометра значительно меньше, чем сухого.

c) погрешности, связанные с вентиляцией. Погрешности, связанные с недостаточной вентиляцией, могут привести к завышению влажности.

d) погрешности, связанные с использованием неадекватных формул или таблиц влажности (см. разделы, посвященные отдельным видам психрометров). Неправильные оценки могут усугубить другие ошибки.

e) погрешности, обусловленные чрезмерным слоем льда на резервуаре смоченного термометра. Поскольку толстый слой льда на резервуаре увеличивает время отклика термометра, следует немедленно удалять такой лед, погружая резервуар в дистиллированную воду.

f) погрешности, обусловленные загрязнением ткани на смоченном термометре или использованием загрязненной воды. Возникновение значительных погрешностей может быть связано с присутствием веществ, изменяющих давление водяного пара. Смоченный термометр с покрывающей его тканью следует регулярно промывать в дистиллированной воде для устранения всех растворимых загрязняющих веществ. В некоторых районах эту процедуру следует выполнять чаще, чем в других, например, поблизости от моря или в районах с сильным загрязнением воздуха.

g) погрешности, обусловленные передачей тепла от столбика жидкости термометра к резервуару смоченного термометра. Передача тепла от столбика жидкости термометра к его смоченному резервуару уменьшает психрометрическую разность и приводит к завышенным значениям влажности. Это влияние особенно проявляется при низкой относительной влажности, однако его можно сократить или избежать, если обертывать резервуар термометра тканью таким образом, чтобы верхний конец ткани был бы, по крайней мере, на 2 см выше резервуара смоченного термометра.

h) Ошибки, связанные с радиационными эффектами: температура смоченного термометра всегда будет ниже температуры окружающей среды, а экраны для защиты от излучения не всегда полностью защищают от радиационного нагрева всех частей конструкции.

Следует отметить, что психрометры обычно дают менее точные показания при низкой относительной влажности (большие разности со смоченным термометром).

4.3.2 Психрометр Ассмана и другие аспирационные психрометры

Альтернативой традиционному (ртутному стеклянному) психрометру Ассмана является электрический аспирационный психрометр, использующий два ПТС, вместо двух ртутных стеклянных термометров. Новые конструкции аспирационных психрометров не повторяют в точности схему приборов Ассмана и обычно оснащены резервуаром для подачи воды на фитиль в течение длительного времени. В целом, при работе с любыми альтернативными конструкциями все равно требуется соблюдать меры предосторожности так же, как и при работе с приборами по типу психрометра Ассмана.

Эта смена приборов должна тщательно регистрироваться, и в течение двух или более лет необходимо проводить параллельные сравнения в соответствии с рекомендациями ВМО (ВМО, 2011*b*, 2015).

4.3.2.1 ***Описание***

Аспирационный психрометр Ассмана представляет собой систему из двух термометров, помещенных вертикально друг рядом с другом в отполированных металлических оправах

с хромовым или никелевым покрытием и соединенных каналами с вентилятором. Вентилятор может приводиться в действие либо пружинным, либо электрическим двигателем. В традиционной конструкции Ассмана применялись ртутные стеклянные термометры, но в новых конструкциях в принципе можно использовать подходящие по характеристикам альтернативы (термометры сопротивления или другие типы жидкостных стеклянных термометров) с подходящим диаметром и диапазоном измерения. Один из термометров обвязан плотно прилегающим к его поверхности одним слоем тонкой ткани, который перед измерениями смачивается дистиллированной водой. Ткань покрывает чувствительную часть термометра (колбу в жидкостном стеклянном термометре) и дополнительно определенную длину стержня термометра. Если в качестве смоченного термометра используется термометр сопротивления, важно, чтобы фитиль покрывал чувствительный элемент и область рядом с ним; эта область не всегда очевидна при осмотре термометра, но наблюдатель должен исходить из своего знания его внутреннего устройства.

Резервуар каждого термометра размещен внутри пары коаксиальных металлических трубок, тщательно отполированных как внутри, так и снаружи, которые защищают их от внешнего теплового излучения. Эти трубки тщательно термически изолированы друг от друга.

Проведенное под эгидой ВМО международное сравнение психрометров Ассмана из десяти стран (WMO, 1989*a*) показало, что хорошая согласованность между значениями температуры сухого и смоченного термометров наблюдается в психрометрах с техническими характеристиками, близкими к представленным в таблице 4.1, и со скоростью вентиляции от 2,2 м $с^{-1}$. Не все из имеющихся на рынке приборов полностью удовлетворяют этим требованиям. Подробно данный вопрос рассматривается в публикации ВМО (WMO, 1989*a*). Было высказано предположение, что точность психрометра Ассмана в полевых условиях может быть не хуже достижимой точности, указанной в настоящем томе, глава 1, приложение 1.A, но этот уровень точности не будет надежно достигаться, в частности, из-за возможных ошибок воздушного потока, загрязнения и радиационного теплообмена.

В приложении 4.B приведены стандартные формулы для расчета значений величин, характеризующих влажность, на основе данных измерений, проведенных при помощи психрометра Ассмана[4], и эти формулы также используются для ряда других психрометров с принудительной вентиляцией, при отсутствии других хорошо зарекомендовавших себя альтернатив.

4.3.2.2 ***Процедура наблюдения***

Обвязка, которая должна быть свободна от жировых и иных загрязнений, смачивается дистиллированной водой. Загрязненные или покрытые коркой фитили следует заменять. Необходимо тщательно следить за тем, чтобы между тканью и внутренней трубкой, защищающей резервуар от теплового излучения, не было воды.

При эксплуатации термометры должны, как правило, находиться в вертикальном положении, и лучше всего закрепить их на стойке. Термометры должны быть защищены от солнечного излучения. Для этого прибор ориентируется так, чтобы боковые щитки находились на одной линии с солнцем. Ручные приборы следует наклонять таким образом, чтобы входные отверстия трубок, где помещены резервуары термометров, были направлены навстречу ветру, однако при этом необходимо тщательно следить, чтобы солнечное излучение не попадало на резервуары термометров. Защита от ветра нужна в условиях очень сильных ветров, когда отказ от такой защиты негативно отразится на скорости вращения вентилятора.

Психрометр должен находиться в состоянии теплового равновесия с окружающим воздухом. При температуре воздуха, превышающей 0 °C, следует выполнить после начала

[4] Рекомендовано КПМН на ее десятой сессии (1989 г.).

вентиляции не менее трех измерений с интервалом 1 минута. При температуре ниже 0 °C необходимо ждать до тех пор, пока не закончится процесс замерзания, и обращать внимание на то, чем покрыт фитиль: водой или льдом. В ходе процессов замерзания и таяния температура смоченного термометра остается постоянной и равной 0 °C. В случае наблюдений на открытом воздухе следует, провести несколько измерений и затем взять среднее значение. Показания термометров следует снимать с точностью не менее 0,1 K.

Кратко процедуру наблюдений с использованием психрометра Ассмана можно представить в следующем виде:

a) смочить резервуар термометра;

b) завести вентилятор с часовым механизмом (или запустить электродвигатель);

c) подождать две или три минуты либо до того момента, пока показания смоченного термометра не установятся;

d) снять показания с сухого термометра;

e) снять показания со смоченного термометра;

f) проверить показания сухого термометра.

4.3.2.3 ***Размещение и установка прибора***

Наблюдения необходимо проводить на открытом месте. Прибор следует либо подвешивать с помощью зажима и скобы на тонком шесте, либо держать в вытянутой руке, так чтобы входные отверстия трубок с резервуарами термометров были слегка наклонены навстречу ветру. При проведении обычных измерений температуры и влажности воздуха входные отверстия этих трубок должны находиться на высоте от 1,25 до 2 м над поверхностью земли.

Следует тщательно следить за тем, чтобы постороннее влияние, обусловленное присутствием самого наблюдателя или любых других близко расположенных источников тепла и водяного пара, таких как автомобили (выхлопные газы), не сказывалось на показаниях прибора.

4.3.2.4 ***Калибровка***

Калибровка психрометра имеет два аспекта: калибровка термометров и калибровка прибора в целом, выполняющего функцию гигрометра. Перед калибровкой прибора следует провести техническое обслуживание (особенно фитиля и вентилятора).

Калибровку термометров рекомендуется проводить через регулярные промежутки времени в зависимости от типа и качества термометров, а также от характера обращения с термометрами или других нагрузок на них. Более подробная информация изложена в настоящем томе, глава 2.

Для термометров сопротивления калибровочные поправки могут применяться путем использования различных коэффициентов в формуле преобразования сопротивления в температуру. Если коэффициенты, относящиеся к калибровке, не применяются, то процесс калибровки используется для подтверждения точности термометров в пределах заданного допуска. Если термометры не соответствуют допуску, их следует заменить.

Для жидкостных стеклянных термометров поправки калибровки в принципе могут применяться арифметически; в противном случае процесс калибровки снова используется для подтверждения точности термометров в пределах заданного допуска. Если термометры не соответствуют допуску, их можно заменить.

После проведения температурной калибровки психрометр в целом калибруется как гигрометр, обычно по эталону относительной влажности. Таким эталоном может служить эталонный гигрометр точки росы или один или несколько эталонных термометров. Калибровка может проводиться в окружающем воздухе или в камере с контролем влажности и температуры для психрометров с дистанционным считыванием (ПТС). Настоятельно рекомендуется использовать возможность калибровки в камере при различных температурах и влажности для психрометров, в которых применяются электрические термометры.

В идеале, если возможно провести калибровку психрометра при различных условиях температуры и влажности, можно использовать ее результаты для оценки коэффициента психрометра или соответствующей функции, специфичной для данного психрометра. Функция обычно представляет собой константу плюс второй член, выражающий небольшую зависимость от температуры. Коэффициент или функция, полученная в результате калибровки, может заменить значение *A* в уравнении психрометра, если это можно реализовать (например, в программном обеспечении). Такой подход к выполнению калибровки обеспечивает более высокую точность, чем использование обобщенного коэффициента психрометра по умолчанию.

Если пренебречь калибровкой температуры перед калибровкой влажности, то нескорректированные значения температуры будут, как правило, давать большие ошибки в значениях влажности, чем при применении температурных поправок (или соблюдении допусков).

При калибровке психрометров обычно указывается давление, поскольку при оценке уравнения психрометра используется давление, а психрометрический эффект имеет некоторую зависимость от давления.

4.3.2.5 ***Обслуживание***

Следует регулярно проверять калибровку термометров. Два термометра могут сравниваться друг с другом, когда они оба измеряют температуру сухого термометра. Система вентиляции должна проверяться регулярно, по меньшей мере, один раз в месяц или перед ее использованием, если этот интервал был превышен. Проверки термометров путем сравнения с эталонным термометром целесообразно проводить через определенные промежутки времени, например, ежегодно.

Ртутные инструменты больше не должны использоваться. Однако пока они сохраняются, ртутные столбики термометров следует проверять на наличие в них разрывов ртути, и, если таковые есть, их необходимо соединить или заменить прибор(ы).

В периоды между использованием прибор следует хранить в неотапливаемом помещении или в другом месте, защищенном от атмосферных осадков и сильного теплового излучения. Если прибор вообще не используется, то его следует хранить в помещении в прочном укладочном ящике, таком как ящик, в котором приборы поставляются производителем.

4.3.3 **Психрометр в жалюзийном метеорологическом экране (будке)**

Традиционно в качестве психрометров в жалюзийном метеорологическом экране используются стеклянные ртутные термометры. В качестве альтернативы, вместо двух стеклянных ртутных термометров применяются психрометры с двумя надлежащим образом оснащенными ПТС или два жидкостных стеклянных термометра другого типа.

Эта смена приборов должна тщательно регистрироваться, и в течение двух или более лет необходимо проводить параллельные сравнения в соответствии с рекомендациями ВМО (ВМО, 2011*b*, 2015).

4.3.3.1 ***Описание***

Два термометра монтируются вертикально в психрометрической будке. Чувствительный элемент одного из термометров (для жидкостных стеклянных термометров это резервуар) обвязывается фитилем из хлопчатобумажной или батистовой ткани, который называют «обвязкой из ткани для смоченного термометра», и он должен плотно прилегать к чувствительной части термометра, охватывая ее и выходя за ее пределы. Если в качестве смоченного термометра используется термометр сопротивления, важно, чтобы фитиль покрывал чувствительный элемент и область рядом с ним; эта область не всегда очевидна при осмотре термометра, но наблюдатель должен исходить из своего знания его внутреннего устройства. В случае, когда для поддержания обвязки из ткани во влажном состоянии используются фитиль и резервуар с водой, резервуар предпочтительно помещать сбоку от термометра; при этом его отверстие должно быть на одном уровне с чувствительным элементом термометра или немного ниже. Фитиль следует поддерживать по возможности в вертикальном положении, и его длина должна быть такой, чтобы вода полностью и достаточно хорошо (но не с избытком) смачивала чувствительный элемент термометра при температуре примерно равной температуре смоченного термометра. Если фитиль не используется, смоченный термометр должен быть защищен от загрязнения путем помещения шарика в небольшую стеклянную трубку в периоды между снятием показаний.

Можно ожидать, что погрешности измерений по психрометру в будке могут быть значительно больше, чем приведенные в настоящем томе, глава 1, приложение 1.A, особенно при слабом ветре, если в будке нет принудительной вентиляции.

Таким образом, желательно обеспечивать для психрометров в будке принудительную вентиляцию при наличии такой возможности. Скорость потока воздуха для обоих термометров должна составлять примерно 3 м $с^{-1}$. Поток воздуха следует направлять поперек шариков термометров в горизонтальном направлении, а не вертикально, и он должен ослабевать таким образом, чтобы не возникало рециркуляции.

Психрометрические формулы, приведенные в п. 4.3.1.1, применимы к психрометрам в будке, однако значения психрометрических коэффициентов носят довольно неопределенный характер, и приведенные ниже общие сведения относятся к различным методам работы, сложившимся за многие годы. Если принудительная вентиляция осуществляется со скоростью 3 м·$с^{-1}$ или больше поперек шарика смоченного термометра, можно применять формулы, с психрометрическим коэффициентом, равным 6,53 · 10^{-4} K^{-1} для воды. При этом для смоченного термометра при температуре выше 0 °C использовались значения 6,50–6,78 · 10^{-4} K^{-1}, а при температуре ниже 0 °C 5,70–6,53 · 10^{-4} K^{-1}. Для психрометра в будке с естественной вентиляцией применялись коэффициенты в пределах 7,7–8,0 · 10^{-4} K^{-1} при температуре выше точки замерзания и в пределах 6,8–7,2 · 10^{-4} K^{-1} при температуре ниже точки замерзания, когда в будке есть хоть какое-то движение воздуха, а на практике так бывает почти всегда. Для случая, когда движение воздуха отсутствует, предлагаются значения коэффициента вплоть до 12 · 10^{-4} K^{-1} для воды и 10,6 · 10^{-4} K^{-1} для льда.

Как и для всех остальных типов психрометров, наилучшим способом определить психрометрический коэффициент или функцию является калибровка прибора, как это описано выше в п. 4.3.2.4, хотя для психрометров в будке сделать это не так просто, как для психрометров других типов.

4.2.3.2 ***Процедура наблюдений***

Процедуры, описанные в п. 4.3.1.5, применимы к психрометру в будке.

В случае, когда используется смоченный термометр с естественной вентиляцией и при условии, что температура воды в резервуаре примерно равна температуре окружающего воздуха, стабильное значение температуры смоченного термометра установится

приблизительно через 15 минут после новой обвязки его тканью; если температура воды значительно отличается от температуры окружающего воздуха, для получения правильного значения может потребоваться и 30 минут.

4.3.3.3 *Размещение и установка прибора*

Требования к размещению и установке психрометрической будки описаны в настоящем томе, глава 2.

4.3.3.4 *Калибровка*

Принципы калибровки психрометра в будке в целом аналогичны принципам калибровки психрометра Ассмана или другого аспирационного психрометра. Однако если переместить психрометр в будке в камеру искусственного климата или в другие лабораторные условия, то вряд ли будет соответствовать условиям нормальной эксплуатации, а при калибровке на месте, вероятно, не будут обеспечены различные условия температуры и влажности.

Психрометрический коэффициент, соответствующий конкретной конфигурации будки, форме резервуара смоченного термометра и условиям вентиляции, может быть определен путем сравнения с подходящим рабочим или сравнительным эталоном, как это описано для психрометров Ассмана в п. 4.3.2.4. Однако для этого потребуется большой набор данных (в идеале в камере с контролем влажности и температуры), и можно ожидать значительного разброса в данных. Для такого базового типа инструментов эта оценка обычно не проводится, и в таких случаях нет достаточных оснований для отступления от использования значений, установленных национальными центрами.

4.3.3.5 *Обслуживание*

Следует регулярно проверять калибровку термометров. Два термометра могут сравниваться друг с другом, когда они оба измеряют температуру сухого термометра. Проверки термометров путем сравнения с эталонным термометром целесообразно проводить через определенные промежутки времени, например, ежегодно.

Столбики стеклянных жидкостных термометров следует проверять на наличие в них разрывов, и, если таковые есть, их необходимо соединить. В противном случае прибор(ы) следует заменить.

4.3.4 Пращевые психрометры

Эти приборы до сих пор используются, в основном на кораблях.

4.3.4.1 *Описание*

Небольшие пращевые психрометры переносного типа состоят из двух стеклянных жидкостных термометров, закрепленных в прочной рамке, снабженной шпинделем и ручкой, размещенной на противоположной от резервуаров термометров стороне, при помощи которой эта рамка и закрепленные в ней термометры могут быстро вращаться вокруг горизонтальной оси.

Схема расположения смоченного термометра зависит от индивидуальной конструкции пращевого психрометра. В некоторых конструкциях предусматривается защита резервуаров термометров от прямого солнечного излучения, и такие приборы предпочтительны для метеорологических измерений.

Также могут использоваться психрометрические формулы, приведенные в приложении 4.B. Вместе с тем, у этих гигрометров те же источники погрешности, что и у других психрометров, и при этом их трудно откалибровать по эталону влажности. Кроме того, необходимость прекращения аспирации для снятия показаний сама по себе является источником ошибок и приводит к вероятному завышению температуры смоченного термометра. По этим причинам измерения, полученные с помощью пращевых психрометров, обычно имеют значительную погрешность.

4.3.4.2 *Процедура наблюдений*

При наблюдениях следует руководствоваться следующими основными рекомендациями:

a) все инструкции по обращению с аспирационными психрометрами Ассмана применимы также и к пращевым психрометрам;

b) пращевые психрометры, не оборудованные специальными щитками для защиты резервуаров термометров от солнечного излучения, должны быть защищены от прямого солнечного излучения каким-либо другим способом;

c) показания с термометров следует снимать немедленно после прекращения аспирации, поскольку температура смоченного термометра сразу же начинает повышаться, и термометры начинают испытывать на себе влияние солнечного излучения.

4.4 ГИГРОМЕТР ТОЧКИ РОСЫ С ОХЛАЖДАЕМЫМ ЗЕРКАЛОМ

4.4.1 Общие сведения

4.4.1.1 *Теория*

Гигрометр точки росы (или точки инея) используется для измерения температуры, при которой влажный воздух, будучи охлажденным, достигает насыщения и на твердой поверхности (в качестве которой обычно используют зеркало) можно обнаружить отложение росы (или инея). Такое отложение, как правило, определяется визуально. Принцип измерения описывается в п. 4.1.4.1.3, а также ниже.

Термодинамическая точка росы определяется для случая плоской поверхности чистой воды. На практике капли имеют искривленную поверхность, над которой давление насыщенного пара выше, чем над плоской поверхностью (это явление известно под названием эффекта Кельвина). Гидрофобные загрязняющие вещества усиливают этот эффект, в то время как хорошо растворимые вещества обладают противоположным влиянием и понижают давление насыщенного пара (эффект Рауля). Эффекты Кельвина и Рауля (которые соответственно повышают и понижают реальную точку росы) сводятся к минимуму, если в качестве критических по размеру принимаются более крупные капли. В этом случае уменьшается влияние кривизны, а благодаря снижению концентрации растворимых загрязняющих веществ уменьшается и эффект Рауля. Загрязнения сводятся к минимуму путем надлежащего ухода при эксплуатации (см. 4.4.3), а общее влияние эффектов Раульта и Кельвина учитывается при калибровке (см. 4.4.5).

4.4.1.2 *Принципы*

В случае, когда влажный воздух при температуре T, давлении p и отношении смеси r_w (или r_i) охлаждается, он в конечном итоге достигает точки насыщения относительно свободной поверхности воды (или относительно свободной поверхности льда), и на негигроскопичной поверхности может образоваться роса (или иней). Температура

условий насыщения называется точкой росы T_d (или точкой инея T_f). Давление насыщенного пара относительно воды e'_w (или льда e'_i) является функцией T_d (или T_f). Соответствующие уравнения выглядят следующим образом:

$$e'_w(p, T_d) = f(p) \cdot e_w(T_d) = \frac{r \cdot p}{0,621\,98 + r} \tag{4.3}$$

$$e'_i(p, T_f) = f(p) \cdot e_i(T_f) = \frac{r \cdot p}{0,621\,98 + r} \tag{4.4}$$

Гигрометр измеряет T_d или T_f. Несмотря на большой диапазон содержания влаги в тропосфере, этот прибор позволяет определить, как очень высокие, так и очень низкие концентрации.

Когда температура поверхности соответствует точке замерзания воды или ниже нее, важно определить, является ли конденсат переохлажденной жидкостью или льдом. Для заданной температуры конденсации давление пара над переохлажденной водой выше, чем надо льдом.

Гигрометр с охлаждаемым зеркалом иногда используется для метеорологических измерений, а также в качестве эталонного прибора, как в полевых, так и в лабораторных условиях.

4.4.2 **Описание**

4.4.2.1 ***Устройство датчика***

В наиболее широко применяемых системах используется небольшая отражающая поверхность из отполированного металла, которая охлаждается с помощью электрического устройства, основанного на термоэлектрическом эффекте Пельтье. Датчик состоит из тонкого металлического зеркала небольшого диаметра (приблизительно 5–10 мм), температура которого регулируется с помощью охлаждающего узла (и обычно нагревателя), и датчика температуры (обычно миниатюрного ПТС), смонтированного на нижней стороне зеркала. Зеркало должно обладать совокупностью таких свойств, как высокая теплопроводность, хорошая оптическая отражательная способность и коррозионная стойкость, и при этом его проницаемость для водяного пара должна быть низкой. Материалами для зеркала могут быть золото, покрытое родием серебро, хромированная медь и нержавеющая сталь.

Зеркало может быть оборудовано устройством оптического обнаружения для автоматического обнаружения загрязняющих веществ, которые могут повысить или понизить видимую точку росы (см. п. 4.4.2.2) с тем, чтобы их можно было устранить.

4.4.2.2 ***Устройство оптического обнаружения***

Электрооптическая система используется, как правило, для обнаружения образования конденсата и передачи таких данных в качестве входных в систему автоматического регулирования температуры зеркала. На поверхность зеркала под углом примерно 55° направляется узкий луч света. В качестве источника света может использоваться лампа накаливания или СИД. В простых системах интенсивность отраженного и рассеянного вперед света определяется фотодетектором, сигнал с которого регулирует через автоматическую систему контроля работу узла охлаждения и нагревания. Зеркальная отражающая способность поверхности уменьшается по мере того, как возрастает толщина конденсата; охлаждение следует уменьшать, пока слой осажденной воды еще тонок, а уменьшение отражательной способности составляет от 5 % до 40 %. В более сложных системах используется вспомогательный фотодетектор, который дополнительно обнаруживает свет, рассеянный конденсатом; два таких детектора способны обеспечить очень точный контроль. Для усовершенствования контрольной системы может быть использовано второе, неохлаждаемое зеркало.

Наивысшая точность достигается путем регулирования температуры зеркала при таком значении, при котором количество конденсата не увеличивается и не уменьшается, однако на практике в системе автоматического регулирования будут наблюдаться колебания вокруг этого значения температуры. Время реагирования зеркала на нагревание и охлаждение оказывает определяющее влияние на амплитуду этих колебаний, и оно должно составлять 1–2 с. Скорость потока воздуха должна быть достаточно стабильной, и следует избегать ее резких изменений, чтобы поддерживать на зеркале стабильное осаждение.В некоторых случаях можно определить температуру, при которой происходит конденсация, с разрешением 1 мК и общей неопределенностью 0,1 К (при уровне доверия 95%, коэффициенте охвата $k = 2$), или более, в зависимости от погрешности калибровки, а также других факторов.

Изначальные виды гигрометров точки росы с ручным контролем температуры во многом устарели.

4.4.2.3 *Устройство регулирования температуры*

Устройство для переноса тепла с использованием термоэлектрического эффекта Пельтье простым реверсивным тепловым насосом; полярность подаваемого постоянного тока определяет поступление тепла либо к зеркалу, либо от зеркала. Это устройство присоединено к нижней части зеркала и находится с ним в хорошем тепловом контакте. Обычно используется многоступенчатое устройство с использованием термоэлектрического эффекта Пельтье, в котором для наибольшего охлаждения требуется наибольшее количество ступеней. При измерении относительно сухих газов сначала их необходимо охладить до температуры на несколько градусов ниже температуры конденсации для образования обнаруживаемой пленки капель или частиц льда.

Регулирование температуры осуществляется при помощи электрической системы авторегулирования, которая в качестве входного сигнала воспринимает сигнал от оптической детекторной подсистемы. Современные системы действуют под контролем микропроцессора.

Для контроля общей температуры в головке прибора и отвода тепла, выделяемого элементом, основанным на термоэлектрическом эффекте Пельтье, обычно предусмотрено дополнительное встроенное охлаждение. Это может быть принудительное воздушное охлаждение или система хладагента замкнутого цикла. В качестве альтернативы, в некоторых типах приборов для дополнительного контроля температуры используется двигатель Стирлинга. В более старых приборах для дополнительного охлаждения используется жидкость с низкой точкой кипения, например этанол, наряду с внешним охлаждением, но этот метод используется все реже. Кроме того, для защиты от нежелательной конденсации используется дополнительный обогрев (а в некоторых режимах - обогреваемая пробоотборная трубка).

4.4.2.4 *Система визуального отображения температуры*

Температура зеркала, измеренная электрическим термометром, прикрепленным под нижней поверхностью зеркала, выводится как точка росы определенной пробы воздуха. Коммерческие приборы, как правило, включают электрическое устройство сопряжения термометра зеркала и цифрового дисплея, однако в них могут быть также предусмотрены цифровые и аналоговые электрические выходные устройства для работы с оборудованием для регистрации данных. Для непрерывного мониторинга аналогового выхода сигнала от термометра зеркала может применяться диаграммный самописец, но этот метод используется все реже. Некоторые гигрометры обеспечивают отдельный выход для ПТС зеркала, отличный от ПТС, который используется для контроля температуры.

4.4.2.5 ***Формат прибора***

Как правило, лабораторные гигрометры точки росы представляют собой стендовые или устанавливаемые в стойке приборы, которые используются с трубками для отбора проб воздуха из выбранного места. Пробоотборные трубки подогреваются, если используется в таком диапазоне температур, где присутствует риск образования конденсата.

Альтернативный формат использует головку датчика дистанционного зондирования, в которой расположен элемент, основанный на термоэлектрическом эффекте Пельтье, зеркало, оптическую систему и систему измерения температуры. В некоторых случаях головка дистанционного зондирования предназначена для проведения измерений в свободной атмосфере, без принудительной вентиляции.

4.4.2.6 ***Вспомогательные системы***

Для того чтобы обеспечить возможность визуально различить капли переохлажденной воды и кристаллы льда при температуре зеркала ниже 0 °C, в прибор может быть встроен микроскоп. Некоторые приборы в целях обеспечения автоматической процедуры такого определения снабжены смонтированным на поверхности зеркала детектором, в то время как в других приборах используется метод, основанный на отражательной способности.

В системе, основанной на микропроцессоре, могут быть предусмотрены алгоритмы для пересчета и визуального отображения значений относительной влажности. В этом случае важно обеспечить, чтобы прибор точно различал конденсат в виде воды и в виде льда. Кроме того, решающее значение для получения правильных и репрезентативных значений относительной влажности будут иметь калибровка и размещение внешнего термометра. Если рассчитываются другие величины влажности, такие как объемная доля или соотношение, результат также будет зависеть от давления, которое либо измеряется, либо основывается на заданном значении.

Во многих приборах предусмотрена автоматическая процедура для сведения к минимуму последствий загрязнения. Это может быть цикл регулярного нагревания, при котором летучие загрязняющие вещества испаряются и устраняются с потоком воздуха. Во время такого цикла нагревания прибор будет либо выводить повышенные показания, либо фиксированное последнее значение до тех пор, пока не возобновятся нормальные показания. Используются также системы, предусматривающие автоматическое протирание зеркала. Там, где это возможно, качество водной или ледяной пленки как показателя чистоты можно подтвердить посредством визуального осмотра.

Для проведения метеорологических измерений и для большинства лабораторных применений необходим небольшой насос, который прогонял бы пробу воздуха через измерительную камеру. Необходимо также и регулирующее устройство, которое позволяло бы устанавливать скорость потока воздуха, совместимую со стабильным функционированием системы авторегулирования температуры зеркала, и приемлемую скорость ответной реакции на изменения влажности. Обычно этого можно добиться, используя игольчатый клапан между выходным отверстием гигрометра и насосом. В некоторых приборах предусмотрен встроенный насос. Оптимальная скорость потока воздуха зависит от влагосодержания пробы воздуха и обычно находится в пределах 0,25–1 л·мин$^{-1}$.

4.4.3 **Процедура наблюдения**

Для правильного функционирования гигрометра точки росы необходима надлежащая объемная скорость потока воздуха, проходящего через измерительную камеру, хотя точная скорость обычно не является критически важной. Установка игольчатого клапана для этой цели, размещаемого по ходу потока за измерительной камерой, по-видимому, будет требовать корректировки с учетом суточных колебаний температуры воздуха. Резкая корректировка потока воздуха будет кратковременно нарушать работу гигрометра.

Любые корректировки следует производить с достаточной заблаговременностью для того, чтобы достичь стабильной работы прибора прежде, чем будут сниматься показания. Необходимый для этого период времени будет зависеть от цикла регулирования каждого отдельного прибора. Следует ознакомиться с инструкциями производителя с тем, чтобы получить надлежащее представление о скорости потока воздуха, которую следует устанавливать, и о подробностях цикла регулирования конкретного прибора.

Следует часто проверять состояние зеркала; по мере необходимости зеркало следует очищать. Стабильная работа прибора необязательно означает, что зеркало является чистым. Его следует промывать дистиллированной водой и тщательно высушивать, протирая мягкой тканью или прикасаясь ватной палочкой для устранения любых растворимых загрязняющих веществ. Также вместо того, чтобы вытирать насухо, обильную каплю воды, попавшую на зеркало, можно отвести с помощью ватной палочки. Если каплю можно отвести, не оставляя следов, это служит признаком чистоты зеркала. Если визуально зеркало не выглядит чистым и на нем остались следы от попавшей воды, то следует повторить очистку. При этом необходимо проявлять осторожность с тем, чтобы не поцарапать поверхность зеркала, особенно там, где она имеет тонкое покрытие для защиты основы или где вмонтирован детектор-идентификатор льда/жидкой воды. Однако единичная царапина на поверхности, как правило, не будет нарушать работу прибора. Если воздушный фильтр не используется, следует проводить очистку, по меньшей мере, ежедневно. В том случае, когда воздушный фильтр используется, его состояние надо проверять при проведении каждого наблюдения. Наблюдателю не следует стоять слишком близко к входному отверстию для воздуха; необходимо также следить за тем, чтобы выходное отверстие не было заблокировано.

При снятии показаний при температуре 0 °C или ниже наблюдателю следует определить, является ли конденсат на зеркале переохлажденной водой или льдом. Если не предусмотрено автоматическое определение, наблюдателю следует осмотреть зеркало. Правильность работы любой автоматической системы должна время от времени проверяться.

Для самых хороших приборов границы неопределенности составляют ±0,1 K в широком диапазоне значений точки росы (от –60 °C до 50 °C). Погрешность при использовании будет зависеть от погрешности калибровки и других факторов.

4.4.4 Размещение и установка прибора

Критерии, согласно которым следует устанавливать узел датчика, аналогичны критериям для любого аспирационного гигрометра. Как правило, они менее строгие, чем для психрометра или датчика относительной влажности. Это объясняется тем, что точка росы или точка инея в пробе воздуха не подвержена влиянию изменений температуры окружающей среды при условии, что она остается все время выше точки росы. По этой причине нет необходимости в установлении метеорологической будки. Датчик следует размещать на открытом пространстве, и он может быть смонтирован на столбе внутри защитного корпуса со входным отверстием для воздуха на необходимом уровне.

Для тех гигрометров, в которых требуется обеспечить поток воздуха, проходящего через прибор, необходима система для обеспечения подачи проб воздуха. Для этого обычно используется небольшой насос, который должен вытягивать воздух из выходного отверстия измерительной камеры и отбрасывать его подальше от канала, предназначенного для притока воздуха. В некоторых случаях насос является неотъемлемой частью гигрометра. Следует избегать рециркуляции воздушного потока, поскольку при этом метод забора проб считается неправильным, хотя при стабильной работе прибора содержание водяного пара в выходном отверстии должно быть в действительности таким же, как у входного отверстия. Рециркуляции воздуха можно избежать, если размещать выходное отверстие выше входного отверстия, хотя это может оказаться неэффективным, если в этом слое атмосферы вертикальный градиент температуры воздуха отрицательный.

В случае, когда прибор постоянно работает на открытом пространстве, необходимо предусмотреть наличие воздушного фильтра. Этот фильтр не должен создавать существенных препятствий потоку воздуха, поскольку такое блокирование может привести к заметному падению давления воздуха и повлиять на температуру конденсации в измерительной камере. В качестве такого фильтра может быть использован металлокерамический фильтр, способный захватывать все частицы, за исключением мельчайших аэрозольных частиц. Его преимущество заключается в том, что он может легко прогреваться с помощью электрического элемента и таким образом поддерживаться в сухом состоянии при любых условиях. Он более прочный, чем фильтры мембранного типа, и лучше подходит для пропуска потока воздуха с относительно высокими скоростями, необходимыми при использовании метода с охлажденным зеркалом в сравнении с методом сорбции. Однако, с другой стороны, металлический фильтр может быть больше подвержен коррозии под воздействием находящихся в атмосфере загрязняющих веществ, чем некоторые мембранные фильтры.

При эксплуатации приборов, в которых требуется использовать систему отбора проб воздуха, необходимо учитывать возможные изменения давления во время отбора проб воздуха. В случае перепада давления из-за фильтра или длинной трубки пробоотборника значения точки росы могут оказаться заниженными. Если давление воздуха в зондируемом объеме над зеркалом значительно отличается от давления окружающей среды, его необходимо измерить и надлежащим образом учесть изменение температуры точки росы.

4.4.5 Калибровка и инспекция в полевых условиях

4.4.5.1 *Калибровка*

Гигрометр точки росы должен быть откалиброван по температуре точки росы относительно эталона точки росы, что обычно выполняется в лаборатории. Калибровка может проводиться непосредственно по первичному генератору точки росы или путем сравнения с откалиброванным и прослеживаемым гигрометром точки росы с использованием в качестве передаточной среды любого стабильного источника влажного газа, который будет одновременно отбираться обоими гигрометрами. Для применения калибровки в некоторых случаях показания гигрометра точки росы могут быть скорректированы (например, с помощью программного обеспечения). В других случаях частично или полностью осуществить калибровку можно путем настройки электроники. Как вариант, можно применять арифметические поправки, особенно в лабораторных условиях. Вне зависимости от степени применения калибровочных поправок или функций необходимо учитывать все остаточные ошибки как компоненты погрешности при использовании прибора.

При использовании какого-либо сопутствующего датчика температуры воздуха его также необходимо откалибровать. Общие указания по калибровке термометров приведены в настоящем томе, глава 2. Для использования на воздухе термометр либо калибруется на воздухе, либо, при калибровке в ванне с жидкостью, допускается соответствующая дополнительная погрешность для применения этой калибровки к измерениям на воздухе. Сюда относятся компоненты, обусловленные другим процессом самонагревания на воздухе, другим теплообменом с воздухом и радиационными эффектами.

Если гигрометр определяет относительную влажность на основе измеренных точки росы и температуры, также важно откалибровать выходной сигнал относительной влажности. Хотя, в принципе, этот выходной сигнал может быть откалиброван непосредственно по относительной влажности, обычно это зависит от температуры и поэтому здесь понадобится обширная матрица калибровочных значений. Более эффективный подход заключается в том, чтобы обеспечить оценку относительной влажности по значениям точки росы и температуры, к которым уже были применены калибровочные поправки, и это может быть сделано как полностью арифметически, так и в виде поправок, применяемых в приборе.

4.4.5.2 *Инспекция в полевых условиях*

Учитывая тот факт, что прибор с охлаждаемым зеркалом, работающий в полевых условиях, подвержен влиянию целого ряда факторов, влияющих на его эффективность, следует регулярно проводить его сравнение с эталонным прибором, например, с психрометром Ассмана, другим гигрометром с охлаждаемым зеркалом или даже прибором для измерения относительной влажности. Прибор, который постоянно эксплуатируется в полевых условиях, должен еженедельно подвергаться процедуре контрольных измерений. Следует использовать возможности для проверки функционирования прибора при точках росы и точках инея. В случае, когда температура зеркала ниже 0 °C, следует наблюдать за появлением конденсата, если это возможно, визуально, с тем чтобы определить, что представляет собой конденсат переохлажденную воду или лед.

Один из возможных методов контроля заключается в сравнении измеренных значений температуры зеркала со значениями температуры воздуха, в то время, когда система терморегулирования гигрометра отключена. Проверку лучше всего проводить, максимально открыв зеркало для доступа окружающего воздуха и сняв крышку головки. Проверку лучше всего проводить при стабильных условиях и отсутствии конденсации. В ясный солнечный день следует обеспечить затенение датчика и всасывающего патрубка и дать возможность установиться термическому равновесию. Для того чтобы проверка имела смысл, необходимо, чтобы зеркало и его корпус достигли температуры окружающей среды. Это может занять значительное время после прекращения нормальной эксплуатации.

Независимая проверка в полевых условиях устройства преобразования сигнала от термометра зеркала может быть проведена при помощи имитации такого сигнала. В случае применения ПТС могут быть использованы стандартный магазин сопротивлений или декадный магазин сопротивлений и комплект соответствующих таблиц. При этом может потребоваться также специальное устройство сопряжения имитатора с блоком регулирования гигрометра.

4.5 ГИГРОМЕТРЫ, ОСНОВАННЫЕ НА ПОГЛОЩЕНИИ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

Молекула воды поглощает ЭМИ в ряде диапазонов длин волн и на дискретных длинах волн, и это свойство можно использовать для определения молекулярной концентрации водяного пара в газе. Наиболее подходящими для этой цели участками электромагнитного спектра являются УФ и ИК. Соответственно эти методы часто классифицируются как оптическая гигрометрия или, что более правильно, абсорбционная электромагнитная гигрометрия.

Данный метод основан на измерении ослабления излучения в полосах поглощения водяным паром на трассе между источником излучения и детектором. Существуют два основных метода для определения степени ослабления излучения:

a) передача излучения на двух длинах волн, на одной из которых оно активно поглощается водяным паром, а на другой — либо совсем не поглощается, либо поглощается очень слабо: в том случае, когда для генерации излучения на двух разных длинах волн используется один и тот же источник, можно иметь точные сведения о соотношении значений их интенсивности. Измеряя соотношения значений их интенсивности на принимающем устройстве, можно определить ослабление абсорбированного излучения с известной длиной волны. Наиболее часто в качестве источника при этом используется вольфрамовая лампа накаливания, оборудованная светофильтром для выделения пары длин волн в ИК диапазоне. Длина измерительной базы составляет в данном случае, как правило, более 1 м.

b) передача излучения с фиксированной интенсивностью в узком диапазоне к прокалиброванному принимающему устройству: наиболее часто в качестве

источника излучения используется газообразный водород: спектр излучения водорода включает спектральную линию Лаймана-альфа (121,6 нм), которая совпадает с полосой поглощения водяным паром в УФ области, где наблюдается совсем незначительная абсорбция со стороны других обычных атмосферных газов. Длина измерительной базы составляет, как правило, несколько сантиметров;

Оба типа гигрометров, основанных на ослаблении электромагнитного излучения, требуют частой калибровки и больше пригодны для измерения изменений концентрации водяного пара, чем для измерения абсолютных значений. Наиболее часто такие гигрометры применяются для мониторинга происходящих с большой частотой изменений влажности, поскольку при этом методе не требуется достижения равновесия давления водяного пара с пробой. Постоянная времени оптического гигрометра составляет обычно всего несколько миллисекунд. Использование оптических гигрометров ограничивается лишь научно-исследовательской деятельностью.

4.6 ВОЛОСНОЙ ГИГРОГРАФ

4.6.1 Общие соображения

Длина волоса, как было обнаружено, является функцией, в первую очередь, относительной влажности воздуха по отношению к насыщению над водой в жидком состоянии (причем при температуре воздуха как выше, так и ниже 0 °C) и возрастает примерно на 2–2,5 % при изменении влажности от 0 % ОВ до 100 % ОВ. Скручивание волос для получения поперечного сечения в форме эллипса и растворение жировых веществ с помощью спирта приводит к увеличению соотношения между площадью поверхности и замкнутым объемом и уменьшению коэффициента инерции, что особенно важно при использовании прибора при низких температурах воздуха. Кроме того, функция реагирования волос на изменение влажности становится ближе к линейной, хотя прочность их на растяжение уменьшается. Для точных измерений предпочтительно использовать элемент из одного волоса, однако для придания элементу определенной прочности используется, как правило, жгут из волос. Химическая обработка с помощью сульфидов бария (BaS) или натрия (Na_2S) позволяет еще больше приблизить функцию ответной реакции к линейной.

Волосной гигрограф считается подходящим, хотя и не очень точным прибором для использования в таких ситуациях или в такие периоды, когда очень редки или совсем не наблюдаются экстремальные и очень низкие значения влажности. Механизм данного прибора должен быть по возможности максимально простым, даже если при этом возникает необходимость применения нелинейной шкалы; это особенно важно в промышленных районах, поскольку загрязняющие воздух вещества могут влиять на поверхность движущихся частей механизма и увеличивать трение между ними.

Скорость реагирования волосного гигрографа на изменение влажности воздуха сильно зависит от температуры воздуха. При температуре –10 °C инерция прибора примерно в три раза больше, чем при температуре 10 °C. При значениях температуры воздуха от 0 до 30 °C и относительной влажности от 20 % ОВ до 80 % ОВ хороший гигрограф за период около 3 минут должен показать 90 % скачкообразного изменения влажности.

Хороший гигрограф в надлежащем состоянии должен регистрировать относительную влажность при умеренных термических условиях с погрешностью ±3 % ОВ. При более низкой температуре погрешность будет больше.

В случаях, когда необходимо получать достоверную информацию при низких температурах, следует использовать предварительно скрученные волосы (как это описано выше).

4.6.2 **Описание**

Детали механизма волосного гигрографа могут различаться в зависимости от производителя. Некоторые приборы снабжены преобразователем для обеспечения электрического сигнала; при этом может также обеспечиваться функция линеаризации, так что общая реакция прибора становится линейной по отношению к изменениям относительной влажности.

В волосном гигрографе используется жгут из волос, удерживаемый под легким натяжением небольшой пружиной и соединенный с пишущим рычагом таким образом, чтобы отмечалось каждое изменение длины жгута. Перо на конце пишущего рычага находится в контакте с бумажной лентой, закрепленной вокруг металлического цилиндра, и регистрирует угловые перемещения рычага. Цилиндр вращается вокруг своей оси с постоянной скоростью, определяемой движением механических часов. Скорость вращения составляет, как правило, один оборот либо в неделю, либо в сутки. На бумажную ленту в виде шкалы нанесена ось времени, которая проходит по окружности цилиндра, и ось влажности, параллельная оси цилиндра. Цилиндр обычно устанавливают вертикально.

Механизм, связывающий пишущий рычаг со жгутом из волос, может включать в себя специально сконструированные кулачки, которые преобразуют нелинейное удлинение волос в ответ на изменения влажности в линейное угловое перемещение рычага.

В качестве волоса в волосных гигрографах может быть использовано и синтетическое волокно. При использовании человеческого волоса его обычно прежде обрабатывают (см. п. 4.6.1) с целью повышения линейности его реакции и уменьшения инерции, хотя это и приводит к уменьшению прочности на растяжение.

Пишущий рычаг и часовое устройство помещают, как правило, в футляр со стеклянными стенками, которые позволяют наблюдать за регистрацией значений влажности, не прикасаясь к самому прибору; при этом одна стенка футляра открыта с тем, чтобы волосной элемент размещался на открытом пространстве за пределами футляра. Боковые стенки футляра отделены от основания, однако стенка, противоположная волосному элементу, прикреплена к основанию при помощи шарнира. Такое устройство обеспечивает свободный доступ к часовому цилиндру и к волосному элементу. Элемент может быть защищен открытым сетчатым ограждением.

4.6.3 **Процедура наблюдений**

Перед снятием показаний по волосному гигрографу следует слегка постучать пальцем с тем, чтобы снять какое бы то ни было трение в механической системе. Гигрограф не следует по возможности трогать в период между сменой бумажных лент, за исключением моментов, когда делаются пометки времени.

Показания с волосного гигрографа, как правило, снимаются с округлением до 1 % ОВ. Необходимо учитывать тот факт, что прибор измеряет относительную влажность по отношению к насыщению над водой в жидком состоянии даже при температуре воздуха ниже 0 °C.

Влажность воздуха может изменяться очень быстро, и поэтому очень важно точно проставлять отметки времени на гигрографе. При этом пишущий рычаг следует перемещать только в направлении уменьшения влажности на бумажной ленте. Дело в том, что волосы в результате такого перемещения провисают, и для возвращения пера обратно в надлежащее положение используется натягивающая пружина. Однако при этом может наблюдаться эффект гистерезиса, который проявляется в невозможности для пера вернуться в его первоначальное положение.

4.6.4 Размещение и установка

Гигрограф следует устанавливать в психрометрической будке. Аммиак оказывает сильное негативное влияние на натуральный волос, разрушая его. В связи с этим следует избегать размещения приборов в непосредственной близости от животноводческих помещений и промышленных предприятий, использующих аммиак.

4.6.5 Источники ошибки

4.6.5.1 *Смещение нуля*

По невыясненным пока окончательно причинам нулевое показание гигрографа может измениться. Наиболее вероятная причина этого заключается в том, что волосы были подвергнуты избыточному натяжению. Например, волосы могут вытягиваться, если отметки времени производятся в направлении увеличения влажности на бумажной ленте или в случае заклинивания механизма гигрографа при уменьшении влажности. Нулевое показание может также изменяться, если гигрограф содержится в течение длительного времени в очень сухом воздухе, однако это изменение можно устранить, поместив прибор на достаточный период времени в атмосферу, насыщенную водяным паром.

4.6.5.2 *Погрешности, обусловленные загрязнением волоса*

Загрязнение различными видами пыли в большинстве случаев приводит к возникновению существенных погрешностей в данных наблюдений (иногда до 15 % значений ОВ). Обычно эти погрешности можно устранить или, по крайней мере, уменьшить, прочищая и промывая жгут из волос. Однако содержащиеся в пыли вещества могут разрушительно действовать на волос (см. п. 4.6.4).

4.6.5.3 *Гистерезис*

Гистерезис проявляется как в реакции волосного элемента, так и в действии регистрирующего механизма волосного гигрометра. Гистерезис в регистрирующем механизме можно уменьшить, используя жгут из волос, который позволяет увеличить силу для преодоления трения. Следует помнить, что на величину перемещения пишущего рычага влияет частично также и сила трения между пером и бумагой, и соответственно для преодоления этой силы необходимо пропорционально большее усилие со стороны волоса. Для уменьшения гистерезиса требуются, кроме того, правильная установка натяжения пружины, а также правильное функционирование всех частей всего преобразовательного механизма. Значительная часть общего трения приходится на долю основной опоры и механизма линеаризации в устройстве передачи перемещения.

Гистерезис в волосном элементе является, как правило, краткосрочным явлением, связанным с процессами абсорбции — десорбции, и перестает быть крупным источником погрешностей, как только устанавливается равновесное давление пара (о результатах продолжительного пребывания в условиях низкой влажности см. п. 4.6.5.1).

4.6.6 Калибровка и инспекция в полевых условиях

Снятые с гигрографа показания следует проверять настолько часто, насколько это практически целесообразно. В случае, когда смоченный и сухой термометры размещены в одной психрометрической будке с волосным гигрометром, они могут использоваться для проведения сравнения, если преобладают стабильные приемлемые условия, однако в противном случае сравнения в полевых условиях имеют ограниченную ценность, поскольку скорости ответной реакции этих приборов различны.

Точную калибровку можно осуществить лишь при использовании камеры искусственного климата и проведении сравнений с эталонными приборами.

Можно провести проверку точки 100 % ОВ (предпочтительно это сделать в помещении с постоянной температурой воздуха), обернув прибор насыщенной водой тканью (хотя нельзя получить правильные показания, если на волосном влагочувствительном элементе образуются в значительном количестве капли воды).

Характерную для помещения влажность можно получить другой (низкой) контрольной точкой относительной влажности при сравнении с эталонным аспирационным психрометром. Соответственно следует снять не одно, а целый ряд показаний.

Долгосрочная стабильность и отклонения могут быть оценены путем представления результатов сравнений с эталонным аспирационным психрометром в виде корреляционной функции.

4.6.7 Обслуживание

Наблюдателям рекомендуется содержать волосной гигрограф в чистоте.

Волос следует часто промывать, используя дистиллированную воду с помощью мягкой щетки для устранения накопившихся на нем пыли или растворимых загрязняющих веществ. Волос ни в коем случае не следует трогать пальцами. Опорные части механизма необходимо содержать в чистоте и иногда применять немного масла, используемого для часовых механизмов. На долю несущих поверхностей любого линеаризирующего механизма приходится значительная часть общего трения в соединительном устройстве. Трение можно уменьшить, полируя поверхности с помощью графита. Такую операцию можно проводить, используя кусок промокательной бумаги, натертый графитовым карандашом.

При надлежащем уходе в условиях умеренного климата и при отсутствии сильных атмосферных загрязнений волосные элементы в приборе могут сохранять свои свойства в течение нескольких лет. Повторная калибровка и подгонка потребуются лишь после замены их в приборе.

4.7 ОБЕСПЕЧЕНИЕ ПРОСЛЕЖИВАЕМОСТИ И КАЛИБРОВКА

4.7.1 Принципы калибровки гигрометров

Точность, необходимая при калибровке приборов для измерения влажности, обусловливает ряд особых проблем, которые в значительной степени связаны с тем, что в пробе воздуха при нормальной температуре может содержаться относительно небольшое количество водяного пара, а также с тем, что в целом трудно изолировать газы в каком-либо контейнере, и в частности водяной пар. Упорядоченная иерархия международного единства эталонных измерений влажности начинает формироваться лишь сейчас.

В таблице 4.2 в компактной форме представлены эталонные средства измерения и воспроизведения значений влажности и их основные характеристики.

Таблица 4.2. Эталонные приборы для измерений влажности

Эталонный прибор	*Точка росы*		*Относительная влажность (% ОВ)*	
	Диапазон (°C)	*Неопределенность (K)*	*Диапазон*	*Неопределенность*
Первичный эталон				
Требование	от –60 до –15 от –15 до 40	0,3 0,1	от 5 до 100 от 5 до 100	0,2 0,2
Гравиметрический (весовой) гигрометр	от –60 до –35 от –35 до 35 от 35 до 60	0,25 0,03 0,25		
Эталонный двухтемпературный генератор влажности	от –75 до –15 от –15 до 30 от 30 до 80	0,25 0,1 0,2		
Эталонный генератор влажности на двух давлениях	от –75 до 30	0,2		
Вторичный эталон				
Требование	от –80 до –15 от –15 до 40	0,75 0,25	от 5 до 100	0,5
Гигрометр с охлаждыемым зеркальцем	от –60 до 40	0,15		
Контрольный психрометр			от 5 до 100	0,6
Контрольный эталон				
Требование	от –80 до –15 от –15 до 40	1,0 0,3	от 5 до 100	1,5
Контрольный психрометр			от 5 до 100	0,6
Гигрометр с охлаждыемым зеркальцем	от –60 до 40	0,3		
Рабочий эталон				
Требование	от –15 до 40	0,5	от 5 до 100	2
Психрометр Ассмана	от –10 до 25		от 40 до 90	1
Гигрометр с охлаждаемым зеркальцем	от –10 до 30	0,5		
Электрический емкостной гигрометр *(для высокопроизводительных приборов, которые регулярно калибруются и тщательно обслуживаются)*	от –20 до 40 от 15 до 30		от 5 до 95 от 5 до 95	2 1

4.7.2 Первичные эталоны

4.7.2.1 *Гравиметрическая гигрометрия*

Приборы такого типа лишь изредка используются в небольшом количестве НМУ, но ниже для информации приводится их описание.

Гравиметрический метод позволяет получить абсолютную меру содержания водяного пара в пробе воздуха, выраженную в виде доли водяного пара в воздухе: либо как отношение двух компонентов (отношение смеси), либо как доля от общего объема. Это значение выражается в массах воды и воздуха или иногда в объемных долях (или же редко в количественных долях, в молях, если можно определить состав воздуха). Это достигается путем первоначального извлечения водяного пара из пробы воздуха с использованием известной массы сушильного агента, такого как безводная пятиокись фосфора (P_2O_5) или перхлорат магния ($Mg(ClO_4)_2$). Масса водяного пара определяется путем взвешивания сушильного агента перед абсорбцией пара и после нее. Масса сухого образца определяется либо путем взвешивания, либо путем измерения его объема (если известна его плотность).

Сложность устройства, необходимого для точного проведения описанной процедуры, ограничивает применение данного метода лишь лабораторными условиями. Кроме того, для проведения точных измерений требуется значительная по объему проба воздуха, а для используемого на практике устройства необходим устойчивый поток влажного газа в течение ряда часов в зависимости от влажности с тем, чтобы извлечь достаточную массу водяного пара для точного измерения путем взвешивания. Вследствие этого применение данного метода ограничивается калибровкой лишь абсолютного сравнительного эталона. Такой прибор используется главным образом в НМУ.

4.7.2.2 *Динамический эталонный генератор влажности с использованием двух давлений*

Данное лабораторное устройство служит в качестве источника влажного газа, относительная влажность которого определяется абсолютным методом. Поток газа-носителя (воздуха) пропускается через камеру насыщения при давлении P_1 и затем изотермически расширяется во второй камере при более низком давлении P_2. В обеих камерах поддерживается одна и та же температура с помощью масляной ванны, в которую они помещены. Влажность смеси водяного пара и газа находится в прямой взаимосвязи с общим давлением в каждой из двух камер, согласно закону Дальтона о парциальном давлении газов. Отношение парциального давления e' пара в камере с низким давлением к давлению насыщенного пара e'_w будет таким же, как и отношение общего давления в камере насыщения с высоким давлением к общему давлению в камере с низким давлением. Таким образом, относительная влажность U_w рассчитывается по формуле:

$$U_w = 100 \cdot e' / e'_w = 100 \cdot P_1 / P_2 \quad (4.5)$$

Это соотношение также верно для твердой фазы, если газ насыщен относительно льда при давлении P_1:

$$U_i = 100 \cdot e' / e'_i = 100 \cdot P_1 / P_2 \quad (4.6)$$

4.7.2.3 *Динамический эталонный генератор влажности с использованием двух температур*

Данное лабораторное устройство обеспечивает поток увлажненного газа с температурой T_1, температура точки росы или точки инея которого составляет T_2. Две терморегулируемые ванны, каждая из которых оборудована теплообменниками и, кроме того, одна — камерой насыщения, содержащей либо воду, либо лед, используются для того, чтобы сначала насытить поток воздуха при температуре T_1, а затем изобарически нагреть его до температуры T_2. В практических конструкциях поток воздуха постоянно

циркулирует для обеспечения насыщения. Калибруемые приборы пропускают через себя часть воздуха при температуре T_2 со скоростью, значение которой невелико по сравнению со скоростью основной циркуляции.

4.7.3 Вторичные эталоны

Вторичный эталонный прибор следует хранить очень бережно и выносить из калибровочной лаборатории только для калибровки в сравнении с первичным эталоном или взаимного сравнения с другими вторичными эталонами. Вторичные эталоны могут использоваться как переходные от первичных эталонов.

Гигрометр с охлаждаемым зеркалом может использоваться в качестве вторичного эталонного прибора при контролируемых условиях температуры, влажности и давления воздуха. Для этого он должен иметь документы о калибровке от какой-либо признанной, официально уполномоченной лаборатории, в которых приведены пределы неопределенности для всего рабочего диапазона данного прибора. Эта калибровка должна выполняться напрямую по первичному эталону. Калибровку следует повторять через надлежащий интервал времени (как правило, один раз в интервале от 12 до 24 месяцев).

Общие сведения о гигрометре с охлаждаемым зеркалом приведены в п. 4.4. Этот гигрометр основан на одном из фундаментальных методов определения влажности атмосферы, и при использовании соотношения, приведенного в п. 4.4.1.2, следует принимать во внимание любые изменения давления воздуха, связанные с техникой отбора проб.

В качестве вторичных эталонов также можно использовать высокоэффективные емкостные гигрометры. Они должны быть прослеживаемыми и регулярно калиброваться по первичному эталону в лаборатории, как правило, каждые 12 месяцев.

4.7.4 Рабочие эталоны (и образцовые приборы для полевых условий)

Гигрометр с охлаждаемым зеркалом или психрометр Ассмана могут использоваться в качестве рабочего эталона для сравнений в окружающей среде в полевых или лабораторных условиях. Для этой цели необходимо проводить сравнения, по меньшей мере, на уровне сравнительного эталона и делать это не реже одного раза в 12 месяцев в стабильных условиях внутри помещения. Для рабочего эталона требуется надлежащее аспирационное устройство для отбора проб воздуха.

В качестве рабочих эталонов или образцовых приборов для полевых условий также можно использовать высокоэффективные емкостные гигрометры. Они должны быть прослеживаемыми и регулярно калиброваться по прослеживаемому эталону в лаборатории, как правило, каждые 12 месяцев. Для принятия дополнительных мер предосторожности их можно проверять на соответствие другим эталонам ежеквартально или ежемесячно.

4.7.5 Растворы солей

Раствор солей обеспечивает характерные значения относительной влажности в воздухе над ним. Значения относительной влажности зависят от химической структуры соли, концентрации соли и температуры. Существует два типа раствора солей:

a) ненасыщенный соляной раствор, который поступает в виде ампул, создает атмосферу с определенной относительной влажностью. Эти ампулы в основном используются для пропитывания подложки в корпусе, который предназначен для того, чтобы датчик экспонировался полученной влажности;

b) насыщенный солевой раствор, в котором некоторое количество соли остается в твердой фазе, обеспечивает стабильную концентрацию относительной влажности. В этом случае давление пара зависит только от температуры.

Для калибровки приборов для измерения относительной влажности могут быть использованы сосуды, содержащие насыщенные растворы определенных солей. Ниже перечислены наиболее часто используемые соли и значения относительной влажности над насыщенным раствором соли при температуре 25 °C:

Сульфат калия (K_2SO_4): 97,0 % ОВ

Хлорид бария ($BaCl_2$): 90,3 % ОВ

Хлорид натрия (NaCl): 75,3 % ОВ

Нитрат магния ($Mg(NO_3)_2$): 52,9 % ОВ

Хлорид магния (MgCl): 33,0 % ОВ

Хлорид кальция ($CaCl_2$): 29,0 % ОВ

Хлорид лития (LiCl): 11,1 % ОВ

Сульфат калия и хлорид лития представляют собой подходящие насыщенные солевые растворы и обеспечивают простые и расширенные диапазоны относительной влажности среды при 11 % ОВ и 97 % ОВ.

Важно, чтобы площадь поверхности раствора была достаточно велика по сравнению с площадью влагочувствительного элемента датчика и находящимся над раствором объемом воздуха, изолированным от внешней среды, с тем чтобы можно было быстро достичь равновесия; при этом для проверяемого датчика требуется непроницаемое для внешнего воздуха входное отверстие. Температуру сосуда следует измерять и поддерживать постоянной, поскольку для большинства солей существует значительная температурная зависимость равновесного значения относительной влажности над поверхностью насыщенного водного раствора соответствующей соли. Однородность относительной влажности над растворами улучшается при перемешивании воздуха вентилятором в герметичном объеме.

При использовании насыщенных растворов солей следует проявлять осторожность. Работающий с этими растворами персонал должен быть осведомлен о степени токсичности и коррозионной активности этих растворов. Использование перечисленных выше солей довольно безопасно, однако важно избегать их контактов с кожей, их проглатывания и попадания в глаза. Эти соли следует всегда хранить в безопасной и тщательно промаркированной таре, на которой должны быть подробно указаны все возможные последствия неосторожного обращения с ними. Необходимо проявлять осторожность при растворении кристаллов хлорида кальция в воде, поскольку при этом выделяется много тепла. Более подробные сведения об опасности при обращении с этими химическими веществами изложены в п. 4.8.3.

Насыщенные солевые растворы обеспечивают практический метод регулирования гигрометров определённого типа (емкостных). Однако для целей калибровки следует вместе с этим использовать прослеживаемый эталонный прибор для измерения относительной влажности в герметичном объеме над насыщенными солевыми растворами.

4.7.6 Методы калибровки

4.7.6.1 *Замечания общего характера*

Калибровка по влажности обычно выполняется путем сравнения прибора с калиброванным эталоном влажности в условиях подходящей влажности.

Среда для калибровки влажности чаще всего создается с помощью генератора влажности или камеры с регулируемой влажностью (и температурой).

В качестве эталона в лабораториях НМГС используются генератор влажности, прецизионный гигрометр с охлаждаемым зеркалом, психрометр с тщательно продуманной конструкцией или высокоэффективный емкостной гигрометр.

4.7.6.2 *Лабораторная калибровка*

Лабораторная калибровка, необходимая для поддержания требуемой точности, производится следующим образом:

a) метод калибровки: при калибровке гигрометра в качестве эталона используется либо генератор влажности, либо гигрометр:

   i) использование генератора влажности в качестве эталона: гигрометр, подлежащий калибровке, помещается в камеру генератора влажности, или, как вариант, влажный воздух, генерируемый генератором влажности, подводится к гигрометру, подлежащему калибровке. Затем значение влажности, отображаемое генератором влажности, сравнивается со значением показаний калибруемого гигрометра;

   ii) использование гигрометра в качестве эталона: значение влажности, показываемое калибруемым гигрометром, сравнивается со эталонным гигрометром, при этом оба гигрометра помещаются в камеру генератора влажности, или, как вариант, влажный воздух, подаваемый генератором влажности, подводится к обоим гигрометрам.

b) метод генерирования влажности: основные способы генерирования влажности заключаются в следующем:

   i) двухуровневый генератор давления;

   ii) двухуровневый генератор температуры;

   iii) двухуровневый генератор давления и температуры;

   iv) генератор смешанного потока;

   v) раствор соли;

   vi) камера влажности;

c) образцовые и эталонные приборы: для лабораторной калибровки образцовых и эталонных приборов требуются прецизионный генератор влажности и подходящий переносной эталонный гигрометр. Генераторы влажности с использованием двух значений температуры и двух значений давления могут обеспечить достаточно контролируемый поток воздуха при заранее определенной температуре воздуха и точке росы. Калибровку следует проводить, по меньшей мере, каждые 12 месяцев и для полного диапазона применений данного прибора в качестве образца. Калибровка термометра зеркала и системы визуального отображения температуры может проводиться независимо, по меньшей мере, один раз в 12 месяцев;

d) используемые в полевых и рабочих условиях эталонные приборы: лабораторная калибровка используемых в полевых и рабочих условиях эталонных приборов должна проводиться на той же самой регулярной основе, что и для рабочих термометров. Для этой цели блок датчика с охлаждаемым зеркалом может рассматриваться отдельно от блока управления. Термометр зеркала тогда может проходить автономную калибровку, а блок управления можно калибровать на той же самой регулярной основе, что и другие элементы прецизионного электронного оборудования. Калибровка используемого в полевых условиях прибора в генераторе влажности не является строго обязательной, если его компоненты были прокалиброваны отдельно, как это описано выше.

   Правильность работы прибора может быть проверена в стабильных условиях в помещении путем сравнения с образцовым прибором, таким как эталонный гигрометр с охлаждаемым зеркалом или психрометр Ассмана. В том случае, когда в используемый в полевых условиях прибор встроен детектор льда, следует проверять правильность работы и этой системы.

4.7.6.3 ***Полевая калибровка***

Все приборы для измерения влажности, эксплуатируемые в полевых условиях, нуждаются в регулярной калибровке. В зависимости от приборов калибровка проводится только в полевых условиях, только в лаборатории или, в качестве альтернативы, как в лаборатории, так и в полевых условиях.

В случае психрометров и гигрометров точки росы, в которых используется измерительный преобразователь температуры, состояние калибровки этого элемента может проверяться каждый раз, когда проводится регулярная установленная процедура обслуживания. Сравнения с рабочим эталоном, таким как психрометр Ассмана, следует проводить через четко установленные промежутки времени.

Преимущество использования аспирационного психрометра эталонного типа, такого как психрометр Ассмана, в качестве рабочего эталона заключается в том, что путем сравнения показаний смоченного и сухого термометров можно проверить безошибочность его собственной работы и что от хорошо работающего вентилятора можно ожидать надлежащей аспирации. Эталонный прибор должен и сам проходить калибровку через установленные для его типа интервалы времени.

На практике поверка в полевых условиях обычно производится при помощи хорошо сконструированных аспирационных психрометров и приборов для изменения точки росы или емкостных гигрометров в качестве рабочих эталонов. Эти специальные виды эталонов путем тщательных процедур должны быть откалиброваны по эталонам более высокого уровня. Любой прибор, используемый в качестве эталона, должен быть индивидуально прокалиброван по всем параметрам, связанным с расчетом влажности (температура воздуха, температура смоченного термометра, точка росы и т. д.). Должны быть учтены также и другие факторы, влияющие на работу этих приборов, такие как скорость воздушного потока.

Насыщенные растворы солей применяются при работе с такими приборами для измерения влажности, для которых необходим лишь небольшой объем воздуха. При этом требуется очень стабильная температура окружающей среды, поэтому нет полной уверенности в надежности таких приборов при их использовании в полевых условиях. Это ограничение можно преодолеть за счет тщательного сопоставления с рабочим эталоном над насыщенными солевыми растворами. Этот метод также может применяться в лаборатории для приборов для измерения влажности, эксплуатируемых в полевых условиях.

В случае использования растворов солей для контрольных целей следует иметь в виду, что номинальное значение влажности, приписываемое тому или иному раствору, не связано с каким-либо первичным эталоном.

Другой вариант заключается в том, чтобы создать несколько точек с конкретными показателями влажности с помощью портативного генератора влажности в полевых условиях и откалибровать с помощью рабочего эталонного гигрометра.

4.8 ПОСТОЯННЫЕ ВРЕМЕНИ, ЗАЩИТНЫЕ ФИЛЬТРЫ И БЕЗОПАСНОСТЬ

4.8.1 Постоянные времени датчиков влажности

Определение постоянной времени для какого-либо датчика влажности подразумевает, что ответная реакция датчика на ступенчатое изменение влажности соответствует известной функции. В общепринятой практике это период времени, необходимый для того, чтобы результат измерения датчиком достиг 63,2 % ($1/e$) ступенчатого изменения измеряемой величины (в данном случае влажности); при этом предполагается, что датчик обладает ответной реакцией первого порядка на изменение измеряемой величины (а именно, скорость изменения результатов измерения пропорциональна разности между результатом измерения и измеряемой величиной). При этом можно предположить, что 99,3 % изменения произойдет после периода продолжительностью в пять постоянных времени.

В таблице 4.3 приведены значения постоянной времени $1/e$, характерные для различных типов датчиков влажности.

4.8.2 Защитные фильтры

Защитный фильтр используется, как правило, для защиты датчика влажности от загрязняющих веществ, наличие которых может негативно сказаться на его работе. В тех случаях, когда датчик не подвергается принудительной вентиляции, использование фильтра увеличивает постоянную времени датчика, поскольку фильтр препятствует общему перемещению воздуха, и остается только полагаться на молекулярную диффузию сквозь фильтрующий материал. Хотя теоретически диффузия водяного пара сквозь некоторые материалы, в частности, изготовленные из целлюлозы, происходит быстрее, чем через воздух, на практике наибольшая скорость диффузии достигается при помощи

Таблица 4.3. Постоянные времени датчиков влажности

При 85 % относительной влажности	*Постоянная времени (для 1/e), с*		
Тип датчика	*20 °C*	*0 °C*	*–20 °C*
Обычный человеческий волос	32	75	440
Прокатанный волос	10	10	12
Электроемкостный	1–10	1–10	1–10
Электрорезистивный	1–10	—	—
Психрометр Ассмана	30–50	30–50	30–50
Конденсационные гигрометры			
Электролитические гигрометры			
Оптический гигрометр	< 0,01	< 0,01	< 0,01

Примечание: обычно соотношение первого порядка не очень хорошо выполняется в сорбционных датчиках, поскольку воздействующий на равновесие пара фактор — локальный градиент давления пара — зависит от перемещения молекул водяного пара внутри структуры твердотельного влагочувствительного элемента. В общем, отклик первого порядка будет наиболее четко проявляться в тех датчиках, которые имеют тонкий влагочувствительный элемент.

пористых гидрофобных мембран. Размер пор должен быть довольно небольшим с тем, чтобы улавливать вредные аэрозольные частицы (в среде над поверхностью моря могут присутствовать в значительном количестве частицы морской соли диаметром до 0,1 мкм), а пористость — достаточной для обеспечения адекватной скорости диффузии.

Размеры фильтра, как и его пористость, влияют на общую скорость диффузии. Диффузия возрастает в результате аспирации, однако следует помнить, что этот метод основывается на поддержании низкого давления воздуха на чувствительной стороне фильтра, а это может оказать значительное влияние на результаты измерения.

Невентилируемые датчики необходимо, как правило, защищать с использованием гидрофобного инертного материала. Для этой цели в различных ситуациях использовались полимерные мембраны с высокой пористостью, изготовленные из экспандированного политетрафторэтилена и которые оказались довольно прочными.

Можно использовать и металлокерамические фильтры, однако их следует нагревать во избежание проблем с конденсацией внутри материала. Это, как правило, не подходит для датчиков относительной влажности, однако приемлемо для датчиков точки росы. Металлокерамические фильтры являются прочными и хорошо подходят для применений с аспирацией, что позволяет использовать фильтры с большой площадью поверхности и соответственно с приемлемо небольшим перепадом давления.

В тех случаях, когда за счет искусственной аспирации диффузию не удается усилить, следует обращать внимание на соотношение между площадью поверхности фильтра и объемом воздуха, который в виде пробы поступает к датчику. В случае типичного сорбционного датчика, включающего плоскую подложку, плоская мембрана, размещенная близко к поверхности датчика, обеспечивает оптимальную конфигурацию. В случае цилиндрической поверхности датчика приемлемым является цилиндрический фильтр.

4.8.3 **Безопасность**

При измерениях влажности достаточно широко используются химические вещества. Свойства таких веществ должны быть хорошо известны работающему с ними персоналу. Все химические вещества следует держать в безопасной таре с четкими этикетками и хранить в надлежащих условиях. Местными властями могут предписываться правила, касающиеся использования токсических веществ.

Необходимо внимательно ознакомиться с паспортом безопасности, который также называют паспортом безопасности материала, и понять содержащуюся в нем информацию перед тем, как приступать к работе с химическими веществами. Этот обязательный документ, который предоставляется производителем для каждого химического вещества или соли, содержит всю необходимую информацию о составе, свойствах, потенциальной опасности, мерах безопасности, обращении и хранении данного химического вещества.

При измерениях влажности широко используются насыщенные солевые растворы. Ниже приводятся краткие рекомендации относительно безопасного использования некоторых наиболее часто применяемых солей:

a) хлорид бария ($BaCl_2$): вещество в виде бесцветных кристаллов; легко растворяется в воде; устойчивое, но при пожаре может испускать токсичный дым; никаких опасных реакций с водой, кислотами, основаниями, окислителями или горючими веществами; при проглатывании возникает тошнота, рвота, боли в животе и диарея; опасно при вдыхании в виде пыли, при контакте с кожей; раздражает глаза; при контакте обильно промывать водой, а в случае проглатывания обращаться за медицинской помощью;

b) хлорид кальция ($CaCl_2$): вещество в виде бесцветных кристаллов, поглощающее влагу из воздуха; легко растворяется в воде, причем растворение идет с большим выделением тепла; инициирует экзотермическую полимеризацию метилвинилового эфира; может реагировать с цинком, высвобождая водород; никаких опасных

реакций с кислотами, основаниями, окислителями или горючими веществами; оказывает раздражающее действие на кожу, глаза и систему дыхания; проглатывание вызывает раздражение желудочно-кишечного тракта; проглатывание большого количества может привести к гиперкальциемии, обезвоживанию организма и повреждению почек; при необходимости промывать обильно водой и обращаться за медицинской помощью;

c) хлорид лития (LiCl): вещество в виде бесцветных кристаллов; устойчивое, если хранится в сухих условиях; легко растворяется в воде; при пожаре испускает токсичный дым; проглатывание может повлиять на ионный баланс крови и привести к анорексии, диарее, рвоте, головокружению и нарушениям работы центральной нервной системы; если прием натрия недостаточен, может наступить повреждение почек (необходимо давать пострадавшему много воды и обратиться за медицинской помощью); никаких опасных реакций с водой, кислотами, основаниями, окислителями или горючими веществами;

d) нитрат магния ($Mg(NO_3)_2$): вещество в виде бесцветных кристаллов; легко впитывает влагу; легко растворяется в воде; может воспламенить горючий материал; может очень активно реагировать с восстанавливающими материалами, может самопроизвольно разложиться, превратившись в диметилформамид; при пожаре может испускать токсичный дым (бороться с огнем следует при помощи водяной струи); проглатывание большого количества может привести к фатальному исходу (пострадавшему следует давать много воды и обратиться за медицинской помощью); может оказывать раздражающее действие на кожу и глаза (промывать водой);

e) нитрат калия (KNO_3): вещество в виде белых кристаллов или кристаллического порошка; легко растворяется в воде; устойчиво, однако при пожаре может выделять ядовитый дым (бороться с огнем следует при помощи водяной струи); проглатывание большого количества может привести к рвоте, однако это вещество быстро выделяется с мочой (пострадавшему следует давать много воды); может вызвать раздражение глаз (следует промывать глаза водой); никаких опасных реакций с водой, кислотами, основаниями, окислителями или горючими веществами;

f) хлорид натрия (NaCl): вещество в виде бесцветных кристаллов или белого порошка; легко растворяется в воде; устойчиво; никаких опасных реакций с водой, кислотами, основаниями, окислителями или горючими веществами; проглатывание большого количества может привести к диарее, тошноте, рвоте, глубокому и быстрому дыханию и судорогам (в тяжелых случаях следует обращаться за медицинской помощью).

Рекомендации относительно безопасного использования ртути приведены в настоящем томе, глава 3, приложение 3.A, 4.

ПРИЛОЖЕНИЕ 4.A. ВОДЯНОЙ ПАР В АТМОСФЕРЕ — ТЕРМИНЫ И ОПРЕДЕЛЕНИЯ

1) ***Отношение смеси r*** влажного воздуха есть отношение массы водяного пара m_v к массе сухого воздуха m_a, с которой водяной пар находится в смеси:

$$r = \frac{m_v}{m_a} \tag{4.A.1}$$

2) ***Удельная влажность, массовая доля*** или ***содержание влаги q*** влажного воздуха есть отношение массы водяного пара m_v к массе влажного воздуха $m_v + m_a$, в котором содержится водяной пар массой m_v:

$$q = \frac{m_v}{m_v + m_a} \tag{4.A.2}$$

3) ***Концентрация пара (плотность водяного пара в смеси)*** или ***абсолютная влажность***: для смеси водяного пара и сухого воздуха концентрация пара ρ_v определяется как отношение массы пара m_v к объему V, занимаемому смесью:

$$\rho_v = \frac{m_v}{V} \tag{4.A.3}$$

4) ***Молярная доля водяного пара пробы влажного воздуха***: молярная доля x_v водяного пара в пробе влажного воздуха, состоящей из сухого воздуха массой m_a и водяного пара массой m_v определяется отношением числа грамм-молекул водяного пара ($n_v = m_v/M_v$) к общему числу грамм-молекул пробы $n_v + n_a$, где n_a — число грамм-молекул сухого воздуха ($n_a = m_a/M_a$) испытуемого образца. В результате получаем:

$$x_v = \frac{n_v}{n_a + n_v} \tag{4.A.4}$$

или:

$$x_v = \frac{r}{0,621\,98 + r} \tag{4.A.5}$$

где r — отношение смеси ($r = m_v/m_a$) водяного пара пробы влажного воздуха.

5) ***Парциальное давление*** водяного пара ***e'*** во влажном воздухе при общем давлении p и при отношении смеси r определяется следующим образом:

$$e' = \frac{r}{0,621\,98 + r}\, p = x_v \cdot p \tag{4.A.6}$$

6) ***Насыщение***: влажный воздух при данных температуре и давлении считается насыщенным, если его отношение смеси таково, что этот влажный воздух находится в состоянии безразличного равновесия относительно конденсированной фазы (жидкой или твердой) при тех же температуре и давлении, причем поверхность раздела плоская.

7) ***Отношение смеси при насыщении***: символ r_w обозначает отношение смеси насыщенного влажного воздуха над плоской поверхностью жидкости. Символ r_i обозначает отношение смеси насыщенного влажного воздуха над плоской поверхностью твердой фазы. Понятия жидкой и твердой фазы относятся к почти чистой воде и почти чистому льду соответственно; каждая их этих субстанций содержит определенное количество растворенного воздуха.

8) ***Давление насыщенного водяного пара в чистой фазе***: давление чистого водяного пара e_w в состоянии насыщения есть давление пара в состоянии его безразличного

равновесия над плоской поверхностью химически чистой воды при неизменных значениях температуры и давления; точно так же можно определить e_i по отношению ко льду; e_w и e_i — функции, зависящие исключительно от температуры, а именно:

$$e_w = e_w(T) \tag{4.A.7}$$
$$e_i = e_i(T) \tag{4.A.8}$$

9) ***Молярная доля водяного пара во влажном воздухе, насыщенном относительно воды***: молярная доля водяного пара, насыщенного по отношению к воде при давлении p и температуре T, есть молярная доля x_{vw} водяного пара пробы влажного воздуха при тех же температуре и давлении, которая находится в устойчивом равновесии над плоской поверхностью воды, содержащей некоторое количество растворенного воздуха, соответствующее состоянию равновесия. Подобным образом через x_{vi} обозначена молярная доля водяного пара, насыщенного относительно плоской поверхности льда и содержащего соответственно равновесное количество растворенного воздуха.

10) ***Давление насыщенного водяного пара влажного воздуха***: давление насыщенного пара e'_w во влажном воздухе относительно воды при давлении p и температуре T определяется по следующей формуле:

$$e'_w = \frac{r_w}{0,621\,98 + r_w} p = x_{vw} \cdot p \tag{4.A.9}$$

Подобным образом давление насыщенного пара во влажном воздухе относительно льда e'_i при давлении p и температуре T определяется по формуле:

$$e'_i = \frac{r_i}{0,621\,98 + r_i} p = x_{vi} \cdot p \tag{4.A.10}$$

11) ***Соотношение между давлением насыщенного пара в чистой фазе и во влажном воздухе***: в метеорологическом диапазоне изменения атмосферного давления и температуры справедливы следующие равенства при ошибке не более 0,5 %:

$$e'_w = e_w \tag{4.A.11}$$
$$e'_i = e_i \tag{4.A.12}$$

12) ***Термодинамическая температура точки росы*** T_d влажного воздуха при давлении p и отношении смеси r есть температура, при которой отношение смеси насыщения r_w влажного воздуха, насыщенного по отношению к поверхности воды при том же давлении, равно данному отношению смеси r.

13) ***Термодинамическая температура точки инея*** T_f влажного воздуха при давлении p и отношении смеси r есть температура, при которой отношение смеси насыщения r_i влажного воздуха, насыщенного по отношению к поверхности льда при том же давлении, равно данному отношению смеси r.

14) ***Температуры точки росы и точки инея***, определенные указанным образом, связаны с отношением смеси r и давлением p следующими уравнениями:

$$e'_w(p, T_d) = f(p) \cdot e_w(T_d) = x_v \cdot p = \frac{r \cdot p}{0,621\,98 + r} \tag{4.A.13}$$

$$e'_i(p, T_f) = f(p) \cdot e_i(T_f) = x_v \cdot p = \frac{r \cdot p}{0,621\,98 + r} \tag{4.A.14}$$

15)[1] ***Относительная влажность воздуха*** U_w ***по отношению к воде влажного воздуха*** при давлении p и температуре T есть процентное отношение молярной доли водяного

[1] Уравнения 4.A.15 и 4.A.17 не применяются для влажного воздуха, когда давление p меньше, чем давление насыщенного пара относительно чистой воды и льда, соответственно при температуре T.

пара x_v к молярной доле пара x_{vw} которая имелась бы во влажном воздухе, если бы он был насыщен по отношению к воде при тех же значениях давления p и температуры T. Таким образом:

$$U_w = 100\left(\frac{x_v}{x_{vw}}\right)_{p,T} = 100\left(\frac{px_v}{px_{vw}}\right)_{p,T} = 100\left(\frac{e'}{e'_w}\right)_{p,T} \quad (4.A.15)$$

где индексы p, T указывают, что каждый член уравнения соответствует идентичным условиям в отношении давления и температуры. Последнее выражение формально подобно классическому определению, основанному на положении закона Дальтона о парциальном давлении.

U_w также связано с отношением смеси r следующим образом:

$$U_w = 100\frac{r}{r_w}\cdot\frac{0,621\,98 + r_w}{0,621\,98 + r} \quad (4.A.16)$$

где r_w — отношение смеси насыщения при давлении и температуре влажного воздуха.

16)[1] ***Относительная влажность воздуха U_i по отношению ко льду влажного воздуха*** при давлении p и температуре T есть процентное отношение молярной доли водяного пара x_v к молярной доле пара x_{vi} которая содержалась бы в воздухе, если бы он был насыщен по отношению ко льду при тех же значениях давления p и температуры T. В соответствии с уравнением, приведенным в пункте 15, получаем:

$$U_i = 100\left(\frac{x_v}{x_{vi}}\right)_{p,T} = 100\left(\frac{px_v}{px_{vi}}\right)_{p,T} = 100\left(\frac{e'}{e'_i}\right)_{p,T} \quad (4.A.17)$$

17) ***Относительная влажность при значениях температуры ниже 0 °C*** должна оцениваться по отношению к воде. Такая процедура имеет следующие преимущества:

a) большинство гигрометров определяет относительную влажность по отношению к воде при всех значениях температуры;

b) большинство облаков при температуре ниже 0 °C состоят из воды или преимущественно из воды;

c) относительная влажность, превышающая 100 % ОВ, как правило, не наблюдается; это особенно важно для синоптических сводок погоды, поскольку атмосфера часто перенасыщена по отношению ко льду при значениях температуры ниже 0 °C;

d) большая часть существующего массива данных об относительной влажности при значениях температуры ниже 0 °C содержит значения, определенные при насыщении по отношению к воде.

18) ***Термодинамическая температура смоченного термометра во влажном воздухе*** при давлении p, температуре T и отношении смеси r есть температура T_w, которую имел бы влажный воздух, если его адиабатически привести к насыщению при давлении p посредством испарения воды в жидком состоянии при тех же давлении p и температуре T_w, и в которой содержится некоторое количество растворенного воздуха, соответствующее состоянию равновесия с насыщенным воздухом при тех же давлении и температуре. Значение T_w определяется по уравнению:

$$h(p,T,r) + \left[r_w(p,T_w) - r\right]h_w(p,T_w) = h\left(p,T_w,r_w(p,T_w)\right) \quad (4.A.18)$$

где $r_w(p,T_w)$ — отношение смеси насыщенного влажного воздуха при давлении p и температуре T_w; $h_w(p,T_w)$ — энтальпия[2] 1 грамма чистой воды при давлении p и

[2] Энтальпия системы в состоянии равновесия при давлении p и температуре T определяется как $E + pV$, где E — внутренняя энергия системы, а V — ее объем. Сумма энтальпий фаз закрытой системы сохраняется в адиабатических изобарических процессах.

температуре T_w; $h(p,T,r)$ — энтальпия 1 + r_w граммов влажного воздуха, состоящего из 1 грамма сухого воздуха и r граммов водяного пара, при давлении p и температуре T; и $h(p,T_w,r_w(p,T_w))$ — энтальпия 1 + r_w граммов насыщенного воздуха, состоящего из 1 грамма сухого воздуха и r_w граммов водяного пара, при давлении p и температуре T_w. (Это функция исключительно p и T_w и может быть обозначена соответственно как $h_{sw}(p,T_w)$.)

Если воздух и водяной пар рассматриваются как идеальные газы с постоянной удельной теплотой, то приводимое выше уравнение принимает вид:

$$T - T_w = \frac{\left[r_w\left(p,T_w\right) - r\right] L_v\left(T_w\right)}{c_{pa} + r c_{pv}} \tag{4.A.19}$$

где $L_v(T_w)$ — теплота парообразования воды при температуре T_w, c_{pa} — удельная теплоемкость сухого воздуха при постоянном давлении; и c_{pv} — удельная теплоемкость водяного пара при постоянном давлении.

Примечание: термодинамическая температура смоченного термометра, как она определена здесь, в течение некоторого времени называлась инженерами по кондиционированию воздуха «температурой адиабатического насыщения».

19) ***Термодинамическая температура смоченного термометра, покрытого льдом, во влажном воздухе*** при давлении p, температуре T и отношении смеси r есть температура T_i, при которой чистый лед при давлении p должен испаряться во влажный воздух, чтобы адиабатически привести его к состоянию насыщения при давлении p и температуре T_i. Насыщение определяется по отношению ко льду. Значение T_i находится из уравнения:

$$h\left(p,T,r\right) + \left[r_i\left(p,T_i\right) - r\right] h_i\left(p,T_i\right) = h\left(p,T_i,r_i\left(p,T_i\right)\right) \tag{4.A.20}$$

где $r_i(p,T_i)$ — отношение смеси насыщенного влажного воздуха при давлении p и температуре T_i; $h_i(p,T_i)$ — энтальпия 1 грамма чистого льда при давлении p и температуре T_i; $h(p,T,r)$ — энтальпия 1 + r граммов влажного воздуха, состоящего из 1 грамма сухого воздуха и r граммов водяного пара, при давлении p и температуре T; и $h(p,T_i,r_i(p,T_i))$ — энтальпия 1 + r_i граммов насыщенного воздуха, состоящего из 1 грамма сухого воздуха и r_i граммов водяного пара, при давлении p и температуре T_i. (Это функция исключительно p и T_i и может быть обозначена соответственно через $h_{si}(p,T_i)$.)

Если воздух и водяной пар рассматриваются как идеальные газы с постоянной удельной теплоемкостью, приведенное выше уравнение принимает вид:

$$T - T_i = \frac{\left[r_i\left(p,T_i\right) - r\right] L_s\left(T_i\right)}{c_p + r c_{pv}} \tag{4.A.21}$$

где $L_s(T_i)$ есть теплота сублимации льда при температуре T_i.

Связь между T_w и T_i и температура смоченного водой или покрытого льдом резервуара термометра согласно показаниям отдельного психрометра — это вопрос, который должен определяться посредством тщательно контролируемого эксперимента с учетом разнообразных параметров, например вентиляции, размера резервуара и радиации.

ПРИЛОЖЕНИЕ 4.B. ФОРМУЛЫ ДЛЯ РАСЧЕТА ХАРАКТЕРИСТИК ВЛАЖНОСТИ

Эти формулы удобны для расчетов и обладают достаточной точностью для всех обычных метеорологических применений, ограниченных температурой T > -45 °C для жидкой воды и T > -65 °C для льда. Ниже указанных температурных порогов эти формулы не применимы.

С более точными, расширенными и подробными формулировками этих и других характеристик влажности воздуха можно ознакомиться в работе Sonntag (1990; 1994). Что касается их ограничений, то они подходят для обычных метеорологических применений с меньшим расширением температурного диапазона, и имеют особое значение для целей радиозондирования.

Давление насыщенного пара:

$e_w(t) = 6{,}112 \exp [17{,}62\, t/(243{,}12 + t)]$ (4.B.1) Вода (от –45 °C до 60 °C) (чистая фаза)

$e'_w(p,t) = f(p) \cdot e_w(t)$ (4.B.2) Влажный воздух

$e_i(t) = 6{,}112 \exp [22{,}46\, t/(272{,}62 + t)]$ (4.B.3) Лед (от –65 °C до 0 °C) (чистая фаза)

$e'_i(p,t) = f(p) \cdot e_i(t)$ (4.B.4) Влажный воздух

$f(p) = 1{,}0016 + 3{,}15 \cdot 10^{-6}\, p - 0{,}074\, p^{-1}$ (4.B.5) [см. Примечание]

Точка росы и точка инея:

$$t_d = \frac{243{,}12 \cdot \ln\left[e' / 6{,}112 f(p)\right]}{17{,}62 - \ln\left[e' / 6{,}112 f(p)\right]}$$ (4.B.6) Вода (от –45 °C до 60 °C)

$$t_f = \frac{272{,}62 \cdot \ln\left[e' / 6.112 f(p)\right]}{22{,}46 - \ln\left[e' / 6{,}112 f(p)\right]}$$ (4.B.7) Лед (от –65 °C до 0 °C)

Психрометрические формулы для психрометра Ассмана:

$e' = e'_w(p,t_w) - 6{,}53 \cdot 10^{-4} \cdot (1 + 0{,}000\,944\, t_w) \cdot p \cdot (t - t_w)$ (4.B.8) Вода

$e' = e'_i(p,t_i) - 5.75 \cdot 10^{-4} \cdot p \cdot (t - t_i)$ (4.B.9) Лед

Относительная влажность:

$U = 100\, e'/e'_w(p,t)$ %RH (4.B.10)

$U = 100\, e'_w(p,t_d)/e'_w(p,t)$ %RH (4.B.11)

Условные обозначения:

t температура воздуха (температура сухого термометра);

t_w температура смоченного термометра;

t_i температура смоченного термометра, покрытого льдом;

t_d точка росы;

t_f точка инея;

p давление влажного воздуха;

$e_w(t)$ давление насыщенного водяного пара в чистой фазе относительно воды при температуре сухого термометра;

$e_w(t_w)$ давление насыщенного водяного пара в чистой фазе относительно воды при температуре смоченного термометра;

$e_i(t)$ давление насыщенного водяного пара в чистой фазе относительно льда при температуре сухого термометра;

$e_i(t_i)$ давление насыщенного водяного пара в чистой фазе относительно льда при температуре смоченного термометра, покрытого льдом;

$e'_w(t)$ давление насыщенного водяного пара влажного воздуха относительно воды при температуре сухого термометра;

$e'_w(t_w)$ давление насыщенного водяного пара влажного воздуха относительно воды при температуре смоченного термометра;

$e'_i(t)$ давление насыщенного водяного пара влажного воздуха относительно льда при температуре сухого термометра;

$e'_i(t_i)$ давление насыщенного водяного пара влажного воздуха относительно льда при температуре смоченного термометра, покрытого льдом;

U относительная влажность.

Примечание: фактически, f является функцией как давления, так и температуры, т. е. $f = f(p, t)$, как поясняется в публикации ВМО (ВМО, 1966) во введении к таблице 4.10. На практике зависимость от температуры (±0,1 %) намного ниже, чем от давления (от 0 % до +0,6 %). Поэтому, зависимость от температуры в формуле, приведенной выше, можно опустить (см. также публикацию ВМО (WMO, 1989a), глава 10). Тем не менее, эту формулу следует использовать только для значения давления около 1 000 гПа (т. е. для приземных наблюдений), а не для аэрологических измерений, для которых следует использовать таблицу 4.10 в публикации ВМО (ВМО, 1966).

ПРИЛОЖЕНИЕ 4.C. ИНСТРУМЕНТЫ И МЕТОДЫ, КОТОРЫЕ ИМЕЮТ ОГРАНИЧЕННОЕ ПРИМЕНЕНИЕ ИЛИ БОЛЕЕ НЕ ПРИМЕНЯЮТСЯ

1 МЕХАНИЧЕСКИЕ ИНСТРУМЕНТЫ С ПРИМЕНЕНИЕМ ОРГАНИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ

1.1 Волосной гигрометр

Для измерения влажности в гигрометрах использовалось изменение длины волоса при изменении относительной влажности воздуха. Все типы волосных гигрометров больше не используются в метеорологии, за исключением волосного гигрографа, описанного в 4.6, который постепенно выводится из употребления.

1.2 Другие механические методы

Раньше для механических методов, в которых используется изменение размеров органических материалов для определения относительной влажности, применялись чувствительные элементы из тканей животных, такие как специально обработанная «пленка» (органическая мембрана, получаемая из тканей-биомембран домашних животных). Такие чувствительные элементы больше не используются.

2 КОНДЕНСАЦИОННЫЙ ГИГРОМЕТР С ПОДОГРЕВАЕМЫМ РАСТВОРОМ ХЛОРИДА ЛИТИЯ (ПОДОГРЕВАЕМЫЙ ГИГРОМЕТР ТОЧКИ РОСЫ)

2.1 Соображения общего характера

2.1.1 *Принципы*

Равновесное давление водяного пара над поверхностью насыщенного раствора хлорида лития является весьма низким. Вследствие этого такой раствор хлорида лития чрезвычайно гигроскопичен при типичных значениях влажности приземной атмосферы; при условии, что давление находящегося в окружающем воздухе водяного пара превышает равновесное давление пара этого раствора, водяной пар конденсируется на нем (например, при температуре 0 °C водяной пар конденсируется над плоской поверхностью насыщенного раствора хлорида лития так, что относительная влажность составляет лишь примерно 15 %).

Если нагревать данный раствор, непосредственно пропуская через него электрический ток от источника с постоянным напряжением, то можно получить термодинамически саморегулирующееся устройство. Для предотвращения поляризации раствора следует использовать переменный ток. По мере того как электропроводность понижается, уменьшается и сила тока, нагревающего раствор, и в конечном итоге достигается точка равновесия, при которой поддерживается постоянная температура. Любое охлаждение раствора ведет в результате к конденсации водяного пара, что вызывает увеличение проводимости и соответственно силы тока, нагревающего раствор, и охлаждение сменяется на обратную тенденцию. Нагревание после достижения точки равновесия приводит к испарению водяного пара до тех пор, пока последовавшее понижение проводимости не вызовет такое уменьшение электрического нагревания, что его эффект будет меньше, чем потери тепла, и за этим последует охлаждение.

Из вышесказанного следует, что существует нижний предел давления водяного пара в окружающем воздухе, которое может быть измерено таким образом при любой заданной температуре. Ниже этого предельного значения солевой раствор должен подвергаться охлаждению с тем, чтобы обеспечить конденсацию водяного пара. И тогда этот метод будет эквивалентен методу с использованием охлаждаемого зеркала. Разница заключается в том, что при использовании последнего из упомянутых методов конденсация происходит при более низкой температуре, когда достигается насыщение относительно поверхности чистой воды, а именно, при точке росы окружающего воздуха.

Рассматриваемому методу присуща некоторая степень неопределенности, поскольку существует четыре разных гидрата хлорида лития. При определенных критических температурах два из этих гидратов могут находиться в равновесии с водной фазой, и на достигнутую путем нагревания температуру равновесия оказывает влияние происходящее затем превращение гидрата. Наиболее значимые для метеорологических целей неопределенности возникают при точке росы окружающего воздуха ниже –12 °C. При точке росы окружающего воздуха –23 °C, потенциальная разность значений температуры равновесия, в соответствии с которыми происходят превращения одного из двух растворов гидратов, приводит в результате к погрешности в ±3,5 K в расчетном значении точки росы.

2.1.2 ***Описание***

Гигрометр точки росы измеряет температуру, при которой равновесное давление пара для насыщенного раствора хлорида лития равно давлению водяного пара в окружающем воздухе. Эмпирические уравнения превращения, основанные на данных о давлении насыщенного пара для раствора хлорида лития и для чистой воды, позволяют получить значения давления водяного пара и точки росы окружающего воздуха относительно плоской поверхности чистой воды. Диапазону значений точки росы от –12 °C до 25 °C соответствуют значения температуры на элементе для определения точки росы в пределах от 17 °C до 71 °C.

2.1.3 ***Датчики с прямым нагревом***

Датчик состоит из трубки или катушки и вмонтированного в нее вдоль оси термометра сопротивления. Внешняя поверхность этой трубки покрыта стекловолокнистым материалом (обычно накрученным в виде ленты вокруг и вдоль трубки), который пропитан водным раствором хлорида лития, куда иногда добавляют немного хлорида калия. Снаружи на покрытие катушки намотана бифилярная серебряная или золотая проволока с равными промежутками между витками. Два конца этой бифилярной обмотки подсоединены к источнику переменного электрического тока; как правило, в качестве источника используются обычные магистральных электрические сети (50 или 60 Гц). Степень электропроводности раствора хлорида лития определяется концентрацией растворенного вещества. Ток проходит между смежными бифилярными витками, которые действуют в качестве электродов, и через раствор. Прохождение тока нагревает раствор, что повышает его температуру.

За исключением условий, когда влажность чрезвычайно низка, давление водяного пара в окружающем воздухе будет выше, чем равновесное давление водяного пара над раствором хлорида лития при температуре окружающего воздуха, и водяной пар будет конденсироваться на растворе. По мере нагревания раствора под воздействием электрического тока температура в конце концов достигнет такого значения, выше которого равновесное давление пара превысит давление пара в окружающем воздухе, начнется испарение и концентрация раствора возрастет.

Для конкретного прибора существует рабочее значение температуры равновесия, соответствующее значению давления водяного пара в окружающем воздухе. При значениях температуры выше равновесной вследствие испарения концентрация раствора будет повышаться; в результате электрический ток и нагревание уменьшатся, и потери

тепла приведут к понижению температуры раствора. При значениях температуры ниже равновесной конденсация будет приводить к уменьшению концентрации раствора; в результате электрический ток и нагревание будут увеличиваться и вызывать повышение температуры раствора. При равновесной температуре не происходит ни испарения, ни конденсации, поскольку равновесное давление пара и давление водяного пара в окружающем воздухе равны.

На практике на измеряемое значение равновесной температуры оказывают влияние индивидуальные характеристики конструкции датчика, и оно обычно выше, чем значение, которое можно предсказать на основе данных о равновесном давлении водяного пара для насыщенного раствора хлорида лития. Тем не менее, воспроизводимость результатов достаточно хороша для того, чтобы считать возможным использование стандартной функции преобразования для всех датчиков, сконструированных по какой-либо заданной спецификации.

Сильная вентиляция отрицательно сказывается на характеристиках датчика, связанных с передачей тепла, а колебания скорости вентиляции нарушают стабильность работы прибора.

Для сведения к минимуму риска прохождения слишком сильного тока в момент включения гигрометра (поскольку сопротивление раствора при температуре окружающего воздуха является довольно низким) предусматривается наличие устройства для ограничения тока в виде маленькой лампочки, которая последовательно соединена с нагреваемым элементом. Лампочка выбирается таким образом, чтобы при нормальных рабочих токах в катушке сопротивление нити накала было бы достаточно низким для надлежащего функционирования гигрометра, в то время как рабочий ток для лампы накаливания (допустимый даже для катушки, у которой электрическое сопротивление очень небольшое) должен быть ниже значения, при котором мог бы повредиться нагревающий элемент.

Равновесное давление водяного пара для насыщенного раствора хлорида лития зависит от гидрата, находящегося в равновесии с водным раствором. В диапазоне температур раствора, соответствующих точкам росы от -12 °C до 41 °C, обычно преобладает моногидрат. При температуре ниже -12 °C образуется дигидрат, а при температуре выше 41 °C — безводный хлорид лития. Вблизи точек этих превращений работа гигрометра является нестабильной, и показания носят неопределенный характер. Однако при добавлении небольшого количества хлорида калия (KCl) нижний предел точки росы (–12 °C) может быть понижен до –30 °C.

2.1.4 *Датчики с косвенным нагревом*

Повышенной точности можно достичь, если нагревать раствор хлорида лития косвенным путем. Проводимость раствора измеряется между двумя платиновыми электродами и результат измерения используется для регулирования электрического тока через нагревательную спираль.

2.2 Эксплуатация прибора

При использовании прибора измеряется равновесная температура катушки и применяется функция преобразования для получения температуры точки росы.

Следует предотвращать воздействие каких-либо помех работе датчика, поскольку равновесная температура чувствительна к изменениям в теплоотдаче с поверхности катушки.

Прибор должен постоянно находиться под напряжением. Если прибор по каким-либо причинам охлаждается в течение некоторого времени до температуры ниже равновесной, происходит конденсация, и электролит начинает стекать.

Следует регулярно проводить верификационные измерения, используя для сравнений рабочий эталонный гигрометр. Прибор рекомендуется по мере необходимости чистить и заново пропитывать раствором хлорида лития.

В том случае, если производителем не предусмотрено устройство для ограничения тока, его следует установить. При отсутствии такого устройства в момент включения возможны высокие значения силы тока, что может привести к повреждению датчика.

2.3 Размещение и установка

Гигрометр следует размещать на открытой площадке в метеорологическом экране, который защищает его от воздействия ветра и дождя. Необходимо наличие системы для обеспечения постоянной скорости аспирации.

Тепло от гигрометра может воздействовать на другие приборы; это следует учитывать при выборе места его расположения.

На работу прибора могут оказать влияние находящиеся в атмосфере загрязняющие вещества, особенно вещества, которые диссоциируют в растворе, приводя к значительной концентрации в нем ионов.

2.4 Источники ошибки

Для измерения равновесной температуры используется электрический термометр сопротивления, и, следовательно, присутствуют обычные для этого вида термометрии источники ошибок.

Достигаемая равновесная температура определяется свойствами растворенного вещества, и значительное количество загрязняющих веществ может привести к непредсказуемым последствиям.

Колебания скорости вентиляции влияют на механизмы теплообмена и, таким образом, на стабильность работы прибора. Для стабильной работы прибора необходима постоянная скорость вентиляции.

2.5 Калибровка и инспекция в полевых условиях

По меньшей мере один раз в месяц следует проводить поверку в полевых условиях путем сравнения с рабочим эталонным прибором.

Регулярно следует проводить также калибровку термометра катушки и устройства для визуального отображения температуры, как и других рабочих термометров и систем визуального отображения.

2.6 Обслуживание

Необходимо регулярно обновлять раствор хлорида лития. Такая процедура может потребоваться один раз в месяц, однако это зависит от уровня загрязнения атмосферы. При обновлении раствора следует сначала промыть катушку дистиллированной водой и затем использовать свежий раствор. В это же время следует очистить корпус прибора и метеорологический экран.

Свежий раствор можно приготовить, смешав пять весовых частей безводного хлорида лития со ста весовыми частями дистиллированной воды. Это эквивалентно смеси 1 г безводного хлорида лития и 20 мл воды.

Уход за устройством для определения температуры следует осуществлять в соответствии с рекомендациями для электрических приборов, используемых для измерений температуры воздуха, не забывая, однако, при этом о разнице в диапазоне измеряемых температур.

3 ПСИХРОМЕТР С ПРЕДВАРИТЕЛЬНЫМ ПОДОГРЕВОМ ВОЗДУХА

Приборы такого типа не используются для ведения наблюдений, но ниже для информации приводится их описание.

Принцип действия такого психрометра основан на том, что содержание водяного пара в каком-то объеме воздуха не изменяется, если его нагреть. Это свойство можно использовать для целей психрометрических измерений, поскольку тогда отпадает необходимость в измерениях смоченным термометром, резервуар которого покрыт слоем льда в условиях отрицательных значений температуры воздуха.

3.1 Описание

Воздух засасывается в канал и проходит над электронагревательным элементом, а затем попадает в измерительную камеру, в которой находятся сухой и смоченный термометры и резервуар с водой. Регулирующая схема нагревательного элемента обеспечивает такое состояние, при котором температура воздуха не опускается ниже какого-либо определенного уровня, чаще всего 10 °C. Аналогичным образом поддерживается и температура воды в резервуаре. Таким образом, ни вода в резервуаре, ни вода в фитиле не замерзает, конечно, при условии, что психрометрическая разность составляет менее 10 K и обеспечивается непрерывность действия психрометра, даже если температура воздуха ниже 0 °C. При температуре выше 10 °C нагреватель может автоматически отключаться, когда психрометр возвращается к обычному функционированию.

Принцип действия электрических термометров позволяет заключить их полностью вовнутрь измерительной камеры; при этом отсутствует необходимость в визуальном снятии показаний.

Второй сухой термометр размещается на входе во всасывающий канал с тем, чтобы обеспечивать измерение температуры окружающего воздуха. Таким образом, может быть определена относительная влажность окружающего воздуха.

Скорость воздуха, который благодаря вентиляции проходит по направлению оси резервуаров психрометрических термометров, составляет примерно 3 $м \cdot с^{-1}$.

3.2 Процедура наблюдений

Психрометр с предварительным подогревом воздуха может подойти для эксплуатации на АМС.

3.3 Размещение и установка

Сам прибор следует размещать вне психрометрической будки. Входное отверстие для воздуха, где измеряется температура окружающего воздуха, следует размещать внутри будки.

4 ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ГИГРОМЕТРЫ СОПРОТИВЛЕНИЯ

Большая часть главы 4, п. 4.2 об электрических емкостных гигрометрах (за исключением п. 4.2.2) также относится и к электрическим гигрометрам сопротивления.

Резистивные приборы для измерения влажности изготавливаются из химически обработанного пластикового материала, имеющего электропроводный поверхностный слой, составляющий одно целое с основой из непроводящего материала. Удельное сопротивление поверхности изменяется в зависимости от поглощения водяного пара, которое зависит от относительной влажности окружающего воздуха. Доминирующим является процесс адсорбции, а не абсорбции, поскольку чувствительной к влажности частью такого датчика является лишь поверхностный слой. В результате датчики этого типа способны быстро реагировать на изменения влажности окружающего воздуха.

В этот класс входят различные датчики электролитического типа, в которых наличие проводящих ионов в гигроскопичном электролите является функцией количества адсорбированного водяного пара. Электролит может иметь различную физическую форму: это может быть жидкий или гелиевый раствор либо ионообменная смола. Измерение изменения полного сопротивления переменному току, предпочтительней чем постоянному; такой выбор делается для того, чтобы избежать поляризации электролита. При этом можно использовать низкочастотное возбуждение, принимая во внимание, что должно быть измерено сопротивление постоянному току и, следовательно, можно применять достаточно длинные соединительные провода между датчиком и его электрическим интерфейсом.

СПРАВОЧНАЯ И ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ЛИТЕРАТУРА

Всемирная метеорологическая организация, 1966: *Международные метеорологические таблицы* (подгот. С. Летестю) (ВМО-№ 188, ТР. 94), изд. 1975 г. Женева.

———, 2011*b*: *Руководство по климатологической практике* (ВМО-№ 100). Женева.

———, 2015 (обновлено в 2019 г.): *Наставление по Интегрированной глобальной системе наблюдений ВМО* (ВМО-№ 1160). Женева.

Anderson, P.S., 1995: Mechanism for the behavior of hydroactive materials used in humidity sensors. *Journal of Atmospheric Oceanic Technology,* 12:662–667.

Bell, S.A., P.A. Carroll, S.L. Beardmore, C. England and N. Mander, 2017: A methodology for study of in-service drift of meteorological humidity sensors. *Metrologia*, 54(3):S63.

Bindon, H.H., 1965: A critical review of tables and charts used in psychrometry. In: *Humidity and Moisture* (A. Wexler, ed.). New York, Reinhold, 1:3–15.

British Standard, 2002: *Humidity terms definitions and formulae.* BS 1339 – Part 1.

British Standard, 2004: *Guide to the measurement of humidity.* BS 1339 – Part 3.

Burt, S., 2012: *The Weather Observer's Handbook*. Cambridge University Press.

Harrison, R.G., 2014: *Meteorological Measurements and Instrumentation*. John Wiley & Sons.

Ingleby, B., D. Moore, C. Sloan and R. Dunn, 2013: Evolution and accuracy of surface humidity reports. *Journal of Atmospheric Oceanic Technology*, 30(9):2025–2043.

Institute of Measurement and Control and National Physical Laboratory, 1996: *A Guide to the Measurement of Humidity*. London, Institute of Measurement and Control.

Joint Committee for Guides in Metrology, 2012: *International Vocabulary of Metrology – Basic and General Concepts and Associated Terms (VIM)*. Third edition. JCGM 200:2012.

Sonntag, D., 1990: Important new values of the physical constants of 1986, vapour pressure formulations based on the ITS-90 and psychrometer formulae. *Zeitschrift für Meteorologie*, 40(5):340–344.

———, 1994: Advancements in the field of hygrometry. *Meteorologische Zeitschrift*, 3(2):51–66.

Wexler, A. (ed.), 1965: *Humidity and Moisture*. Volumes 1–3. New York, Reinhold.

World Meteorological Organization, 1989*a*: *WMO Assmann Aspiration Psychrometer Intercomparison* (D. Sonntag) (WMO/TD-No. 289). Instruments and Observing Methods Report No. 34. Geneva.

———, 1989*b*: *WMO International Hygrometer Intercomparison* (J. Skaar, K. Hegg, T. Moe and K. Smedstud) (WMO/TD-No. 316). Instruments and Observing Methods Report No. 38. Geneva.

———, 1992: *Measurement of Temperature and Humidity: Specification, Construction, Properties and Use of the WMO Reference Psychrometer* (R.G. Wylie and T. Lalas) (WMO-No. 759). Technical Note No. 194. Geneva.

———, 2011*a*: *WMO Field Intercomparison of Thermometer Screens/Shields and Humidity Measuring Instruments: Ghardaia, Algeria, November 2008–October 2009* (M. Lacombe, D. Bousri, M. Leroy and M. Mezred) (WMO/TD-No. 1579). WMO Instruments and Observing Methods Report No. 106. Geneva.

ГЛАВА 5. ИЗМЕРЕНИЕ ПРИЗЕМНОГО ВЕТРА

5.1 ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

5.1.1 Определения

В этой главе используются следующие определения (более подробную информацию см. в Mazzarella, 1972):

Скорость ветра. Трехмерная векторная величина со случайными мелкомасштабными колебаниями в пространстве и времени, наложенными на крупномасштабный организованный поток. Такое определение ветра используется, например, применительно к анализу загрязнения воздуха и при обеспечении посадки самолетов. Однако для целей настоящего Руководства приземный ветер будет рассматриваться в основном как двумерная векторная величина, заданная двумя числовыми значениями, характеризующими направление и скорость. Короткопериодные пульсации ветра характеризуют его порывистость, а индивидуальные пульсации называются порывами.

Большинству пользователей информации о ветре требуется осредненный горизонтальный ветер, обычно представленный в полярной системе координат значениями скорости и направления. Во все большем количестве областей применения данных о ветре требуется информация об изменчивости или порывистости ветра. С этой целью используются три параметра, а именно: максимальный порыв и средние квадратические отклонения скорости и направления ветра.

Усредненные величины. Значения (например, горизонтальной скорости ветра), которые осредняются за период времени от 2 до 60 мин. В этой главе мы имеем дело преимущественно с осреднением за период времени 10 мин, что необходимо для целей прогноза. Климатические обобщения обычно требуют осреднения за полный час или сутки. Для аэронавигационных целей часто используются более короткие периоды осреднения (см. том III, глава 2 настоящего Руководства). Периоды осреднения менее нескольких минут не в достаточной мере сглаживают естественные турбулентные пульсации ветра, поэтому значения ветра, осредненные за 1 мин, следует рассматривать как длительный порыв ветра.

Пиковый порыв ветра. Максимальная наблюденная скорость ветра за определенный интервал времени. В ежечасных сводках погоды пиковый порыв представляет собой предельное значение скорости ветра за последний полный час.

Продолжительность порыва. Мера длительности максимального наблюдаемого порыва. Продолжительность порыва определяется чувствительностью измерительного устройства. Медленно срабатывающие устройства сглаживают экстремальные значения и измеряют продолжительные сглаженные порывы; быстро срабатывающие устройства могут регистрировать резкие порывы малой продолжительности на фронте волны.

Для определения продолжительности порыва используется идеализированная измерительная цепочка, а именно единичный фильтр скользящего осреднения колебаний ветра на интервале t_0 секунд. Максимальные значения ветра, полученные на выходе такого фильтра, считаются максимальными порывами продолжительностью t_0. Считается, что другие измерительные системы с различными фильтрующими элементами пригодны для измерения порывов продолжительностью t_0 в том случае, если фильтр скользящего осреднения на интервале t_0 выдает такое же экстремальное значение (подробности см. в Beljaars, 1987; WMO, 1987).

Среднее квадратическое отклонение.

$$s_u = \sqrt{\overline{(u_i - U)^2}} = \sqrt{\left(\left(\sum\left(u_i^2\right) - \left(\sum u_i\right)^2 / n\right) / n\right)} \qquad (5.1)$$

где u — это изменяющаяся во времени величина (например, горизонтальная скорость ветра) со средним значением U, а верхняя черта означает временное осреднение выборки из n значений u_i. Среднее квадратическое отклонение используется для характеристики колебаний конкретной величины.

Постоянная времени (системы первого порядка). Время, необходимое для того, чтобы прибор обнаружил и выдал информацию примерно о 63 % ступенчатого изменения сигнала.

Длина пути воздушной частицы до момента срабатывания датчика. Приблизительное расстояние (в метрах), которое проходит воздушный поток до того, как на выходе датчик ветра покажет примерно 63 % ступенчатого изменения входной скорости ветра.

Критическое затухание (для датчика, такого как флюгарка, чувствительность которого наилучшим образом описывается дифференциальным уравнением второго порядка). Значение затухания, при котором датчик наиболее быстро воспроизводит ступенчатое изменение характеристики при отсутствии выброса в показании.

Степень затухания. Отношение истинного затухания к критическому затуханию.

Длина естественной незатухающей волны. Расстояние, которое проходит воздушный поток, необходимое для прохождения флюгаркой одного периода колебания в условиях отсутствия затухания. Оно меньше реальной «затухающей» длины волны в $\sqrt{(1-D^2)}$ раз, где D — степень затухания.

Неустойчивый ветер, не имеющий среднего направления. Ветер, при котором полная изменчивость среднего направления ветра в течение 10 мин составляет не менее 60°, но не достигает 180°, а скорость ветра составляет менее 1,5 м·с$^{-1}$ (3 уз), или когда общая изменчивость равна или превышает 180°.

5.1.2 Единицы и шкалы измерения

Скорость и направление ветра в случае включения в синоптические сводки должны осредняться за интервал не менее 10 мин. Для аэронавигационных целей могут потребоваться средние значения за более короткий период времени (см. том III, глава 2 настоящего Руководства).

Направление ветра определяется как направление, откуда дует ветер, и измеряется по часовой стрелке от географического севера, точнее истинного севера (на основе ВГС-84 и ее ГМЗ-96.

Термин «штиль» должен применяться в том случае, когда средняя скорость ветра меньше или равна 0,2 м·с$^{-1}$ (< 1 уз). В этом случае направление ветра кодируется 00.

Направление ветра на станциях, лежащих в пределах 1° от Северного полюса или 1° от Южного полюса, должно измеряться таким образом, чтобы ноль азимутного круга совпадал с 0° по Гринвичскому меридиану.

5.1.3 Метеорологические требования

Наблюдения за ветром требуются для мониторинга и прогноза погоды, для климатологических обобщений ветровых нагрузок, для оценки вероятности ущерба от сильного ветра и оценки энергии ветра, а также в качестве составной части оценки

приземных потоков, например, для оценки испарения в интересах сельскохозяйственного производства и определения распространения загрязнения воздуха. Необходимые требования к измерениям приведены в настоящем томе, глава 1, приложение 1.A. Требуемая неопределенность измерения для горизонтальной скорости 0,5 м·с$^{-1}$ ниже 5 м·с$^{-1}$ и более чем на 10 % выше 5 м·с$^{-1}$ обычно достаточна. Направление ветра должно измеряться с неопределенностью до 5°. Кроме средних значений скорости и направления ветра, для многих применений требуются данные о среднем квадратическом отклонении и экстремальных значениях (см. 5.8.2). Современные приборы позволяют без особых усилий получить необходимую неопределенность измерений. Наиболее трудным моментом при проведении наблюдений за ветром является выбор места размещения анемометра. Так как почти невозможно найти место, где скорость ветра является репрезентативной для большой территории, рекомендуется оценить погрешности, обусловленные нерепрезентативностью места размещения анемометра (требования по размещению и установке приводятся в 5.9 и в данном томе, глава 1, приложение 1.D).

Для многих применений требуется информация о порывистости ветра. Она необходима для сверхкраткосрочных прогнозов метеорологических условий при взлете и посадке самолетов, климатических обобщений значений ветровой нагрузки, расчета распространения загрязнения воздуха и корректировки размещения анеморумбометров. Требованиям рутинных наблюдений удовлетворяют два параметра, а именно: средние квадратические отклонения направления и скорости ветра и максимальный порыв при трехсекундном осреднении (см. рекомендации 3 и 4 (КПМН-X) (ВМО, 1990)).

5.1.4 Методы измерения и наблюдения

Скорость приземного ветра может быть измерена с помощью флюгера и чашечного или крыльчатого анемометра. В тех случаях, когда приборы временно не функционируют или их нет в наличии, направление и силу ветра можно определять субъективно (в таблицах 5.1 и 5.2 приводятся эквиваленты скорости ветра для повседневного использования при оценках).

Рассматриваемые здесь приборы и методы измерений — это лишь некоторые более подходящие из возможного набора. В конце этой главы приведен достаточно полный список литературы по данному вопросу.

Датчики, кратко описанные ниже, — это вращающиеся чашечные и крыльчатые анемометры, а также флюгеры для измерения направления ветра. Чашечная вертушка и флюгер, лопастная вертушка и флюгер и просто крыльчатые вертушки — наиболее часто встречающиеся комбинации. Другие датчики, как например трубка Пито, реже используются для проведения стандартных наблюдений, хотя также могут давать удовлетворительные результаты. Приборы, находящиеся на стадии разработки или применяемые в настоящее время для исследовательских целей, с развитием техники могут найти практическое применение при стандартных наблюдениях.

Почти для всех применений, необходимо измерять средние значения скорости и направления ветра. Во многих случаях требуются данные о порывах ветра. Таким образом, любая ветроизмерительная система состоит не только из датчика, но также из блоков обработки и записи. Обработка предназначена для осреднения и расчета средних квадратических отклонений и экстремумов. В простейшем случае обработка может состоять из записи характеристик ветра перьевым самописцем и оценки среднего и экстремального значений при считывании записи.

5.2 ВИЗУАЛЬНАЯ ОЦЕНКА ВЕТРА

При отсутствии приборов для измерения ветра его следует оценивать визуально. При такой оценке ошибки могут быть довольно значительными, но если пользоваться данными наблюдений с осторожностью, то этот метод может быть оправдан, поскольку он дает

Таблица 5.1. Эквиваленты скорости ветра

Баллы по шкале Бофорта и описание		*Скорость ветра на стандартной высоте 10 м над открытой ровной поверхностью*				*Признаки для оценки скорости ветра над сушей*
		(узлы)	*(м·с$^{-1}$)*	*(км·ч$^{-1}$)*	*(миль·ч$^{-1}$)*	
0	Штиль	< 1	0–0,2	< 1	< 1	Безветренно, дым поднимается вертикально
1	Маловетрие	1–3	0,3–1,5	1–5	1–3	Направление ветра определяется по сносу дыма, но не по флюгеру
2	Легкий	4–6	1,6–3,3	6–11	4–7	Ветер ощущается лицом; листья шелестят; ветер приводит в движение обычный флюгер
3	Слабый	7–10	3,4–5,4	12–19	8–12	Листья и тонкие ветки деревьев все время колышутся, ветер развевает легкие флаги
4	Умеренный	11–16	5,5–7,9	20–28	13–18	Ветер поднимает пыль и обрывки бумаги, приводит в движение тонкие ветки деревьев
5	Свежий	17–21	8,0–10,7	29–38	19–24	Небольшие деревья с листвой качаются, на воде внутренних водоемов появляются небольшие волны с гребнями
6	Сильный	22–27	10,8–13,8	39–49	25–31	Качаются толстые ветви деревьев, гудят телеграфные провода, зонты удерживаются с трудом
7	Крепкий	28–33	13,9–17,1	50–61	32–38	Качаются стволы деревьев, идти против ветра трудно
8	Очень крепкий	34–40	17,2–20,7	62–74	39–46	Ветер ломает ветви деревьев, препятствует движению
9	Шторм	41–47	20,8–24,4	75–88	47–54	Небольшие повреждения (ветер срывает оголовники дымовых труб и черепицу)
10	Сильный шторм	48–55	24,5–28,4	89–102	55–63	На суше бывает редко, деревья вырывает с корнями, значительные разрушения строений
11	Жестокий шторм	56–63	28,5–32,6	103–117	64–72	Наблюдается очень редко, сопровождается широкомасштабными разрушениями
12	Ураган	64 и более	32,7 и более	118 и более	73 и более	

Таблица 5.2. Эквиваленты скорости ветра для арктических районов и районов без растительности

Баллы по шкале Бофорта и описание		*Скорость ветра на стандартной высоте 10 м над открытой ровной поверхностью*				*Признаки для оценки скорости ветра для арктических районов и районов без растительности*
		(узлы)	*(м·с$^{-1}$)*	*(км·ч$^{-1}$)*	*(миль·ч$^{-1}$)*	
0	Штиль	< 1	0–0,2	< 1	< 1	
1	Маловетрие	1–3	0,3–1,5	1–5	1–3	Ветер не ощущается. Дым поднимается вертикально
2	Легкий	4–6	1,6–3,3	6–11	4–7	Ветер ощущается лицом, листья шелестят
3	Слабый	7–10	3,4–5,4	12–19	8–12	Ветер шевелит волосы, колыхает одежду
4	Умеренный	11–16	5,5–7,9	20–28	13–18	Ветер поднимает пыль и бумажный мусор, перепутывает волосы
5	Свежий	17–21	8,0–10,7	29–38	19–24	Сила ветра ощущается туловищем. Предел приемлемого ветра на суше
6	Сильный	22–27	10,8–13,8	39–49	25–31	Некоторые неудобства при ходьбе
7	Крепкий	28–33	13,9–17,1	50–61	32–38	Трудно идти против ветра
8	Очень крепкий	34–40	17,2–20,7	62–74	39–46	Трудно удерживать равновесие при ходьбе
9	Шторм	41–47	20,8–24,4	75–88	47–54	Опасность быть снесенным ветром
10	Сильный шторм	48–55	24,5–28,4	89–102	55–63	Деревья вырывает с корнем, значительный ущерб сооружениям
11	Жестокий шторм	56–63	28,5–32,6	103–117	64–72	
12	Ураган	64 и более	32,7 и более	118 и более	73 и более	

данные, которые в противном случае не могли бы быть получены вообще. В тех случаях, когда на какой-либо станции данные о ветре временно или постоянно были получены путем оценивания, а не измерения, этот факт должен быть занесен в журнал наблюдений станции и стать известным пользователям.

5.2.1 **Скорость ветра**

Оценки основываются на влиянии ветра на подвижные предметы. Можно использовать почти все предметы, способные свободно перемещаться под влиянием ветра, но лучше всего воспользоваться признаками, содержащимися в описании шкалы силы ветра Бофорта, приведенной в таблицах 5.1 и 5.2.

При оценке скорости ветра наблюдатель (и подвижный предмет) должен находиться на открытой ровной местности как можно дальше от препятствий. Необходимо помнить, что даже небольшие препятствия вызывают серьезные изменения скорости ветра и отклонения в его направлении, особенно с их подветренной стороны.

5.2.2 Направление ветра

В случае отсутствия или неисправности приборов направление следует оценивать по направлению движения дыма из высокой трубы, движению листьев и т. д. на открытом месте, либо наблюдая за указателем направления или вымпелом, прикрепленным к высокому флагштоку. Кроме того, в аэропорту может быть использован ветровой конус, если скорость ветра достаточна для приведения его в движение.

Какое бы из этих средств не использовалось, возможны ошибки, обусловленные перспективой, если наблюдатель не стоит непосредственно под указателем ветра. Следует быть осторожным, чтобы ошибочно не принять местные вихри, образуемые сооружениями и т. д., за генеральное направление ветра.

На открытой местности направление приземного ветра можно определить довольно точно, если стать к нему лицом. При этом не следует учитывать направление движения облаков, какими бы низкими они ни были.

5.2.3 Пульсации ветра

Не следует проводить оценку максимальных порывов или средних квадратических отклонений при отсутствии надлежащих приборов и регистрирующих устройств.

5.3 ПРОСТЫЕ МЕТОДЫ ИНСТРУМЕНТАЛЬНЫХ НАБЛЮДЕНИЙ

Те станции, на которых нет возможности установить традиционные анемометры, можно обеспечить любыми недорогостоящими простыми приборами, которые позволят сделать наблюдения несколько более надежными, чем те, которые выполнены без помощи приборов.

5.3.1 Скорость ветра

В случае применения простых ручных анемометров, их следует настраивать и снимать с них показания в соответствии с инструкциями изготовителя. Наблюдения следует проводить в месте, открытом воздействию ветра, а не с подветренной стороны препятствий, таких как здания, деревья и холмы. При отсутствии такой возможности место для наблюдения должно быть достаточно удалено от препятствий, а именно на расстояние, по меньшей мере в 10 раз превышающее высоту самого препятствия. В случае расположения места наблюдения с наветренной стороны или в стороне от препятствия, удаление от него должно по меньшей мере двукратно превышать его высоту.

5.3.2 Направление ветра

Направление ветра можно оценивать по флюгеру (или вымпелу), установленному на столбе, к которому прикреплены указатели основных румбов компаса. Наблюдения за флюгером проводятся снизу, а направление ветра можно оценивать с точностью до 16-й доли азимутального круга. Если флюгер колеблется на ветру, то определяется среднее направление ветра в пределах его колебаний.

5.4 ЧАШЕЧНЫЕ И КРЫЛЬЧАТЫЕ АНЕМОМЕТРЫ

Для измерения скорости ветра используются чашечные и крыльчатые анемометры, которые состоят из двух узлов: вертушки и генератора сигнала. В хорошо сконструированных системах угловая скорость чашечной или крыльчатой вертушки

прямо пропорциональна скорости ветра или, в случае крыльчатой вертушки, составляющей скорости ветра, параллельной оси вращения. Кроме того, в таких хорошо сконструированных анемометрах калибровочная кривая линейна, не зависит от плотности воздуха, имеет устойчивое нулевое значение и диапазон изменчивости, легко воспроизводится в заводских условиях. Вблизи порога чувствительности, или при скорости ветра менее 4 $м \cdot с^{-1}$, калибровочная кривая чашечных анемометров может существенно отклоняться от линейной для случаев, когда длина штыря, соединяющего чашку с осью вращения, значительно больше диаметра чашки (Patterson, 1926).

Характеристикой реакции датчиков чашечного и крыльчатого типа на изменение скорости ветра является длина пути воздушной частицы до момента срабатывания датчика, величина которого прямо пропорциональна моменту инерции вертушки и, кроме того, зависит от ряда геометрических параметров (Busch and Kristensen, 1976; Coppin, 1982).

Большинство датчиков скорости ветра чашечного и крыльчатого типа реагируют быстрее на увеличение скорости ветра, чем на ее уменьшение, поэтому эти вертушки завышают фактическую среднюю скорость ветра. Более того, колебания вертикальной компоненты скорости могут также привести к завышению скорости чашечными анемометрами в результате ослабления взаимодействия чашки с наклоненным к горизонту потоком (MacCready, 1966). Общее завышение скорости может составлять 10 % для некоторых конструкций и при высокой турбулентности ветрового потока (для чашечного анемометра на высоте 10 м с расстоянием отклика 5 м над крайне неоднородной поверхностью; Coppin, 1982). Этот недостаток можно свести к минимуму путем использования анемометров с быстрым откликом (малой инерцией) — либо чашечных анемометров с хорошей реакцией на наклонный к горизонту поток, либо крыльчатых анемометров, которые, фактически, не реагируют на вертикальную составляющую скорости. В случае, когда нет возможности исследовать характеристики анемометра в аэродинамической трубе, можно провести его сверку с поверенным прибором в полевых условиях (Albers et al., 2000).

Поскольку и чашечные, и крыльчатые вертушки вращаются с угловой скоростью, прямо пропорциональной скорости ветра или его компоненту вдоль оси вращения, они особенно удобны для приведения в действие генераторов сигнала различной конструкции. Применяются генераторы сигнала переменного и постоянного тока, оптические и магнитно-импульсные генераторы, счетчики оборотов, а также самописцы (WMO, 2001). Выбор генератора сигналов или датчика в значительной степени зависит от используемого средства обработки и способа считывания данных. Необходимо принять меры для того, чтобы подшипники и генераторы сигналов характеризовались низкими начальным и вращающим моментами трения, а также чтобы момент инерции генератора сигнала не приводил бы к росту времени реакции анемометра на изменение скорости потока. В случае передачи генерированного датчиком электрического сигнала на большое расстояние, он ослабевает за счет сопротивления кабеля, что делает использование импульсного сигнала более предпочтительным, поскольку он не столь подвержен изменениям при передаче на расстояние.

Требуемые и реально достижимые характеристики датчиков скорости ветра приведены в настоящий том, глава 1, приложение 1.A.

5.5 ФЛЮГЕРЫ ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ НАПРАВЛЕНИЯ ВЕТРА

Для получения удовлетворительных результатов измерений может быть целесообразным использовать флюгер, который должен быть сбалансирован таким образом, чтобы он не стремился занять какую-либо предпочтительную позицию в случае, если его ось отклонится от вертикали. Желательно, чтобы элементы оперения флюгера были параллельны его оси, поскольку флюгер с двумя элементами оперения, располагающимися под углом более 10° к его оси, имеет два устойчивых положения, каждое из которых существенно отличается от действительного направления ветра (Wieringa and van Lindert, 1971).

Реакция обычного флюгера с докритическим затуханием на резкое изменение направления ветра обычно характеризуется поворотом на угол, превышающий угол реального поворота ветра, с дальнейшими колебаниями вблизи истинного направления ветра, при этом амплитуда колебаний экспоненциально уменьшается со временем. Для описания такой реакции используются два параметра: «естественная частота колебаний с докритическим затуханием» или «длина волны» и «степень затухания» (т. е. отношение истинного затухания к критическому) (MacCready, 1966; Mazzarella, 1972). Степень затухания в пределах от 0,3 до 0,7 считается удовлетворительной, поскольку при этом не возникают слишком большие отклонения направления флюгера от реального направления ветра, а реакция флюгера остается достаточно быстрой (Wieringa, 1967). Само собой разумеется, что в тех случаях, когда необходимо рассчитать среднее за длительный период на основе данных, полученных для короткого временного интервала, могут быть использованы датчики с меньшей степенью затухания.

Генератор сигнала представляет собой, в сущности, преобразователь угол–код. Используется несколько видов генератора сигнала, такие как потенциометры, сельсины переменного и постоянного тока, цифровые дисковые преобразователи угол–код, угломерные круги прямого считывания, поворотные переключатели. Выбор генератора сигнала в основном зависит от используемого средства обработки и способа считывания данных. Необходимо принимать меры для того, чтобы подшипники флюгарки и генератора характеризовались низкими значениями трения покоя и вращения. Простейший метод записи сигнала состоит в том, что перо самописца медленно перемещается сверху вниз по листу бумаги, обмотанному вокруг цилиндра, вращающемуся вместе с осью флюгера.

Абсолютная точность измерения направления ветра зависит также от тщательности, с которой прибор ориентирован относительно истинного севера. Требуемые и реально достижимые характеристики флюгеров для измерения направления ветра приведены в настоящем томе, глава 1, приложение 1.A.

5.6 ДРУГИЕ ПРИБОРЫ ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ВЕТРА

Для измерения направления и скорости ветра можно использовать множество физических принципов, каждый из которых имеет свои достоинства и недостатки. Некоторые системы были разработаны для конкретных целей, таких как измерение мелкомасштабных пульсаций и исследование загрязнения воздуха (см., например, Smith (1980)). При этом используются следующие нестандартные типы датчиков:

a) Анемометры, основанные на принципе трубки Пито, измеряющей избыточное давление в трубке, ориентируемой по направлению ветра с помощью флюгера (см. описание анемометра Динеса в Gold (1936) и WMO (1984*a*)). Линеализированная система регистрации Динеса решает проблему осреднения скорости, вызванную параболической формой уравнения связи между скоростью ветра и давлением, а также обеспечивает запись данных о порывах без использования электроэнергии.

b) Акустические анемометры, измеряющие время между излучением и приемом ультразвукового импульса, распространяющегося вдоль фиксированного отрезка (Kaimal, 1980). Поскольку акустические анемометры, в силу физических принципов их работы, не содержат движущихся элементов, они отличаются большим временем службы и сравнительно медленным ухудшением точности измерений со временем.

c) Анемометры с горячим диском — это твердотельные приборы, измеряющие градиент температуры внутри чипа. Это позволяет получить как скорость, так и направление ветра при неопределенностях в рамках спецификаций, приведенных в настоящем томе, глава 1, приложение 1.A (van Oudheusden and Huijsing, 1991; Makinwa et al., 2001). Они прочны и имеют устойчивую во времени калибровку, но опыт их применения пока ограничен.

d) Анемометры с горячей нитью измеряют степень охлаждения тонкой разогретой нити. В рабочем плане они довольно ненадежны как из-за своей чрезмерной хрупкости, так и из-за того, что их калибровка довольно быстро меняется в условиях загрязненной или влажной окружающей среды. Их не рекомендуется использовать при выпадении осадков.

e) Устаревшие флюгеры с качающейся доской ненамного лучше полного отсутствия приборов.

f) Технологии дистанционного зондирования поля ветра с помощью звуковых (содар), световых (обнаружение света и дальность (лидар)) или электромагнитных (радар) волн менее распространены в обычных метеорологических сетях. Они подробно описаны в томе III, глава 5 настоящего Руководства и в работе Lenschow (1986).

5.7 ДАТЧИКИ И ИХ КОМБИНАЦИИ ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ СОСТАВЛЯЮЩИХ ВЕТРА

Крыльчатые вертушки, которые чувствительны только к составляющей скорости ветра, параллельной оси вращения вертушки, можно располагать перпендикулярно друг другу, что дает возможность получать два показания, прямо пропорциональных ортогональным составляющим вектора ветра. Другие датчики, такие как двухосный акустический анемометр, выполняют ту же функцию за счет более сложных дополнительных электронных блоков. Недостаток ортогонально-ориентированных крыльчатых вертушек состоит в том, что трудно достичь т. н. косинусоидального разрешения (т. е. чувствительность непосредственно к составляющей ветра). При вычислении компонентов ветра по результатам измерения скорости и направления ветра в качестве устройств для измерения составляющих ветра можно также использовать комбинацию чашечный анемометр–флюгер или крыльчатый анемометр с флюгаркой.

5.8 МЕТОДЫ ОБРАБОТКИ ДАННЫХ

Данные измерений с помощью комбинаций анемометра и флюгера могут обрабатываться и осредняться самыми различными способами. Прежде чем рассматривать особенности полной цепочки измерения параметров ветра (установка датчика, измерения, передача, фильтрация, регистрация и обработка данных), полезно обсудить вопрос осреднения. В настоящей главе рассматриваются следующие результаты измерения ветра: осредненные значения параметров горизонтального ветра (составляющие или скорость/направление), средние квадратические отклонения и максимальный порыв.

5.8.1 Осреднение

Осреднение векторов ветра или его составляющих — в принципе задача несложная, но здесь имеется ряд трудностей. Во-первых, осреднение всех мгновенных значений скорости ветра дает небольшое (обычно на несколько процентов) завышение средней векторной скорости ветра U (MacCready, 1966; Wieringa, 1980*a*). При необходимости это различие можно скорректировать в случае, если определяется среднее квадратическое отклонение ветра s_d; соотношение между U и средними значениями составляющих ветра равно (Frenkiel, 1951):

$$U \Big/ \overline{\sqrt{\left(u_i^2 + v_i^2\right)}} = 1 - s_d^2 \,/\, 2 \qquad (5.2)$$

Это влияние ортогональных к среднему направлению ветра турбулентных пульсаций часто путают с завышением скорости, вызывающей искажения в значениях среднего квадратического отклонения s_u (см. 5.4).

Во-вторых, это отсутствие непрерывности направления ветра между 0° и 360°. Эта проблема решается путем осуществления записи на цилиндр или расширения диапазона регистрации, например до 540° (при этом электронное устройство производит переключение диапазона с 0° до 360° и с 540° до 180°), либо путем использования компьютерной программы, которая в случае необходимости позволяет сделать последовательные серии измерений непрерывными путем прибавления или вычитания 360°. Скорость реакции чашечного анемометра и флюгера несопоставимы, поскольку чашечный анемометр обладает чувствительностью первого порядка, а флюгер — чувствительностью второго порядка. Эта проблема, однако, не существенна, поскольку различия в чувствительности проявляются только в высокочастотной части спектра пульсаций ветра.

С точки зрения теории, предпочтительнее осреднять составляющие ветра, нежели измеренные независимо друг от друга его скорость и направление. Однако различия очень незначительны, и для большинства применений средние значения составляющих ветра можно легко получить из средних значений его скорости и направления. Это также относится к соответствующим средним квадратическим отклонениям. С технической точки зрения, по целому ряду соображений предпочтение следует отдать независимой обработке значений скорости и направления. Во-первых, обработка данных о скорости и направлении ветра являются независимыми друг от друга, что позволяет продолжать работу с одним прибором в случае, если другой выходит из строя. Во-вторых, такой тип обработки данных проще, чем в случае, когда нужно вычислять составляющие ветра. Наконец, независимая обработка значений скорости и направления ветра позволяет получить данные в формате, широко применяемом в практических целях (включая кодирование по SYNOP и SHIP).

Средние значения горизонтальной составляющей скорости ветра могут быть получены с помощью различных приборов — как механических, так и электрических. Вероятнее всего, самым простым из них является счетчик оборотов чашечного анемометра, который, как правило, используется для оценки скорости ветра за определенный промежуток времени. На другом конце линейки сложности находятся электроимпульсные генераторы, управляющие специализированными процессорами, которые легко вычисляют средние значения, максимальные порывы и средние квадратические отклонения.

Если скорость и направление ветра регистрируются в виде непрерывного графика, то наблюдатель может оценивать десятиминутные средние значения этих параметров достаточно точно по записи пера регистратора. Эту же запись можно также использовать для считывания максимальных порывов ветра. Использование для наблюдений цифровых дисковых преобразователей или других измерительных приборов позволяет получить представление о скорости и изменчивости ветра, но приводит к значительным ошибкам при получении средних значений. Мгновенные отсчеты, таким образом, менее подходят для тех случаев, когда требуются десятиминутные средние значения для стандартных сводок погоды.

5.8.2 Максимальные порывы и средние квадратические отклонения

Результаты вычислений или регистрации пульсаций ветра предельно чувствительны к характеристикам реакции — динамическим характеристикам — всех элементов измерительной цепочки, включая такие параметры датчиков, как длина пути воздушной частицы до момента срабатывания датчика и степень затухания. Кроме того, динамические характеристики всей системы в целом определяют продолжительность измеряемых максимальных порывов, как это описано в 5.1.1. Медленно реагирующие системы сглаживают экстремумы и регистрируют длительные порывы с малой амплитудой, а высокочувствительные системы — высокие и узкие пики скорости (порывы малой продолжительности). Ясно, что динамические характеристики систем для измерения параметров ветра следует тщательно проектировать с тем, чтобы получать данные о порывах, сопоставимые с данными регистрации на других станциях, а также получать точные и надежные значения средних квадратических отклонений.

Прежде чем задать динамические характеристики систем для измерения параметров ветра, необходимо определить минимальную регистрируемую продолжительность порыва с учетом требований пользователя. Экстремальные значения параметров ветра в основном используются для подготовки предупреждений об опасных явлениях, а также для климатологических обобщений экстремальной нагрузки на здания, сооружения и самолеты. Важно понимать, что кратковременные порывы ни по времени, ни по горизонтальной протяженности не способны в полной мере оказать разрушающее воздействие на большие сооружения. Согласно заключению ВМО (WMO, 1987) данные о порывах ветра продолжительностью три секунды удовлетворяют требованиям большинства потенциальных пользователей. При сильном ветре порывы ветра продолжительностью около трех секунд соответствуют «пробегу ветра» (продолжительность порыва, умноженная на среднюю скорость ветра) от 50 до 100 м. Этого достаточно для того, чтобы разрушить сооружения характерного размера для пригорода/города или подвергнуть их максимальной нагрузке от потенциально разрушительного порыва.

Стандартное отклонение направления и скорости ветра можно легко вычислить для выборки с интервалом около одной секунды с помощью микропроцессорного оборудования. Частота выборки не должна быть слишком большой, поскольку датчик сам по себе сглаживает ветер в пределах длины пути воздушной частицы до момента срабатывания датчика (Wieringa, 1980*b*). В большинстве случаев достаточна частота выборки в 0,25 Гц, но это зависит от длины пути воздушной частицы до момента срабатывания датчика и скорости ветра. Теоретические основы определения частоты выборки подробно рассмотрены в томе V, глава 2 настоящего Руководства.

Одновременное вычисление среднего квадратического отклонения горизонтальной составляющей ветра за 10 мин совместно с выявлением порывов ветра с продолжительностью в несколько секунд предъявляет интересные требования к электронным фильтрам. Характеристики регистрируемых порывов особенно зависят от параметров фильтра, так что на практике системы оптимизируются именно для них. Любой низкочастотный фильтр, применяемый для определения максимальных порывов, измеренных с помощью высокочастотных анемометров, сглаживающих данные на интервале в несколько секунд, может занизить среднее квадратическое отклонение на величину до 10 %. Это занижение можно скорректировать, если только известны характеристики фильтров в измерительной цепочке. На практике занижение часто оказывается меньшим, поскольку, когда среднее значение скорости ветра имеет положительный или отрицательный тренд, среднее квадратическое отклонение увеличивается. С другой стороны, можно независимо записывать исходный сигнал без какой-либо фильтрации с целью получения несмещенной оценки среднего квадратического отклонения. В следующем разделе даны рекомендации по созданию систем для измерения ветра с конкретными значениями характеристик фильтров.

Для точного измерения максимальных порывов желательно делать выборку из ряда отфильтрованных значений характеристик ветра каждые 0,25 с (частота 4 Гц). Можно использовать выборку более низкой частоты, однако следует принимать во внимание, что оценка максимального значения будет в большинстве случаев занижена, поскольку экстремальное значение порыва в отфильтрованном ряде может попасть в промежуток между отсчетами.

Что касается направления ветра, то следует избегать какой-либо дополнительной фильтрации помимо возникающей за счет инерции флюгера. Это означает, что для большинства моделей флюгера стандартное отклонение направления ветра может быть определено с точностью до 2 %.

Для точного расчета среднего квадратического отклонения направления ветра требуется минимальная разрешающая способность процесса оцифровки сигнала, которая часто осуществляется посредством цифрового кодирующего устройства, установленного на оси флюгера. В этом случае вполне достаточным является разрешение 7 бит, так как при этом среднее квадратическое отклонение в 5° может быть измерено с неопределенностью до 1 % (WMO, 1987).

5.8.3 Рекомендации по конструированию систем для измерения ветра[1]

Системы для измерения параметров ветра могут иметь самые разные конструкции, так что в данной главе невозможно описать все возможные варианты. Здесь приведены два распространенных примера: один с преимущественно аналоговой обработкой сигнала, а другой с цифровой обработкой сигнала (WMO, 1987).

Первая система состоит из анемометра, для которого длина пути воздушной частицы до момента срабатывания датчика составляет 5 м; импульсного генератора, вырабатывающего импульсы с частотой, пропорциональной скорости вращения анемометра (желательно несколько импульсов за один оборот); счетчика, который считает импульсы с интервалом в 0,25 с, и микропроцессора для вычисления средних значений скорости ветра и стандартного отклонения за десятиминутные периоды времени на основе данных, получаемых каждые 0,25 с. Предельные значения должны определяться на основе трехсекундных средних, например, посредством скользящего осреднения данных последних 12 замеров. Скользящее осреднение следует производить каждые 0,25 с (т. е. С перекрытием трехсекундных интервалов осреднения каждые 0,25 с). Направление ветра измеряется с помощью флюгера (для которого длина незатухающей волны составляет 5 м, степень затухания — 0,3), снабженного цифровым преобразователем в 7 бит, производящим выборку данные каждую секунду. Средние значения и стандартные отклонения вычисляются за десятиминутные периоды времени, в течение которых последовательные выборки проверяются на непрерывность. Если две следующих друг за другом выборки направления ветра отличаются более чем на 180°, то разница сокращается за счет прибавления к значениям второй выборки или вычитания из них 360°. Если длина пути воздушной частицы до момента срабатывания датчика составляет 5 м для анемометра и флюгера (степень затухания 0,3; длина незатухающей волны 10 м), то средние квадратические отклонения скорости и направления ветра уменьшаются на 7 % и 2 % соответственно. Продолжительность порыва, соответствующая такой измерительной цепочке (в соответствии с определением в 5.1.1), составляет около трех секунд.

Вторая система состоит из анемометра, расстояние отклика которого составляет 5 м, генератора напряжения, вырабатывающего напряжение, пропорциональное скорости вращения анемометра при ежесекундном преобразовании сигнала из аналоговой формы в цифровую, и цифровой обработки измерений. Для измерения направления ветра используется флюгер с длиной незатухающей волны 5 м и степенью затухания 0,3 при ежесекундном преобразовании из аналоговой формы в цифровую и последующем вычислении средних значений направления и его стандартных отклонений для цифровых выборок. Для определения максимального порыва ветра генерируемое датчиком напряжение фильтруется с помощью фильтра системы первого порядка при постоянной времени, составляющей одну секунду, и преобразуется из аналоговой формы в цифровую каждые 0,25 с. Что касается фильтрации, эта система немного отличается от первой: стандартные отклонения скорости ветра и его направления сглаживаются на 12 % и 2 % соответственно, а минимальная продолжительность порыва составляет примерно три секунды. В этой системе вместо АЦП также может быть использован перьевой самописец, соединенный с аналоговым выходом устройства. В этом случае можно считывать только средние и предельные значения скорости и направления ветра, а продолжительность измеряемого порыва составляет около трех секунд, если только используемый перьевой самописец не сглаживает сигнал сильнее, чем цифровой фильтр первого порядка.

Описанная выше процедура обработки сигнала соответствует Рекомендации 3 (КПМН-X) (ВМО, 1990) и гарантирует оптимальную точность. Однако эта процедура довольно сложна и требует применения скользящего осреднения и сравнительно высокой частоты выборки. Для многих применений совершенно приемлемо сократить дискретность измерения до одного измерения каждые три секунды при условии, что сигнал осредняется по непересекающимся трехсекундным интервалам. В результате минимальная регистрируемая продолжительность порыва составляет пять секунд, а среднее квадратическое отклонение уменьшается на 12 % (Beljaars, 1987; WMO, 1987).

[1] Рекомендовано 10-й сессией Комиссии по приборам и методам наблюдений (1989 г.).

5.9 РАЗМЕЩЕНИЕ ПРИБОРОВ ДЛЯ НАБЛЮДЕНИЯ ЗА ВЕТРОМ

5.9.1 Общее описание проблем

Скорость ветра значительно увеличивается с высотой, особенно над неровной поверхностью. В связи с этим была определена стандартная высота установки ветроизмерительных приборов на открытой местности, равная 10 м. Соответствующий сдвиг направления ветра с высотой над открытой местностью относительно мал, и при наблюдениях за ветром у поверхности земли им можно пренебречь. Оптимальным местом для наблюдения за ветром является такое, где наблюдаемый ветер является репрезентативным для участка местности размером, по меньшей мере, в несколько километров или где ветер может быть легко приведен к репрезентативному.

Если местность неровная, пересеченная или с неоднородной поверхностью, то и скорость, и направление ветра могут значительно искажаться. Во многих случаях возможна корректировка наблюдений за ветром, и уже появляются средства для расчета соответствующих поправок. С целью улучшения репрезентативности данных о ветре следует передавать пользователям необходимую информацию для проведения таких корректировок в дополнение к данным прямых измерений.

5.9.2 Размещение анемометров над сушей

Стандартная высота установки приборов для наблюдений за ветром над открытой ровной местностью составляет 10 м над поверхностью земли. Открытым считается участок местности, на котором расстояние между анемометром и любым препятствием равно не менее чем десятикратной высоте препятствия. Наблюдения за ветром, проводимые с подветренной стороны от группы деревьев, зданий или других препятствий, не представляют особой ценности и содержат мало информации о невозмущенном потоке воздуха. Поскольку волновые возмущения воздушного потока могут распространяться на расстояние, равное 12–15-кратной высоте препятствия, требование об удалении от препятствий на расстояние, равное их десятикратной высоте, является абсолютно минимальным. На практике часто бывает трудно найти хорошее или даже удовлетворительное место размещения станции для измерения ветра. Важность оптимального выбора расположения места измерения ветра трудно переоценить, тем не менее трудно дать универсальные рекомендации по этому вопросу. В некоторых случаях, однако, данные могут быть значительно скорректированы с поправкой на препятствия следующим образом:

a) расстояние до препятствия более чем в 30 раз превышает его высоту: поправка не требуется;

b) расстояние до препятствия более чем в 20 раз превышает его высоту: поправка может применяться;

c) расстояние до препятствия более чем в 10 раз превышает его высоту: поправка может применяться в некоторых ситуациях с особой осторожностью.

Следует отметить, что, когда расстояние не превышает двадцатикратную высоту препятствия, погрешность измеренного значения до корректировки может составлять до 25 %, а когда расстояние приблизительно в 10 раз превышает высоту препятствия, измеренное значение может в некоторых случаях даже указывать на противоположное направление.

Более подробная информация о корректировке данных с учетом размещения прибора содержится в 5.9.4.

В таблице 5.3 кратко приводится классификация площадок по наблюдению за ветром на основе размещения и установки приборов. Данные в полном объеме о классификации размещения площадок для наземных станций приземных наблюдений, включая

Таблица 5.3. Классификация площадок по наблюдению за ветром на основе размещения и установки приборов

Класс	*Расстояние от мачты до окружающих препятствий[a] (с высотой h)*	*Расстояние от датчиков до узких препятствий[b] (с высотой > 8 м, шириной w)*	*Показатель класса шероховатости[c]*	*Не учитывать единичные препятствия ниже x м*
1	≥ 30 h	≥ 15 w	2–4 (коэффициент шероховатости ≤ 0,1 m)	x = 4
2	≥ 10 h	≥ 15 w	2–5 (коэффициент шероховатости ≤ 0,25 м)	x = 4
3	≥ 5 h	≥ 10 w		x = 5
4	≥ 2,5 h	Не имеется препятствий с угловой шириной > 60° и высотой > 10 м в радиусе 40 м		x = 6, при измерении ≥ 10 м
5	Не отвечает требованиям ни одного другого класса			

Примечания:
a Препятствием считается объект, имеющий угловую ширину > 10°.
b Узкое препятствие — это, например, мачта, тонкое дерево или фонарный столб.
c Определение «шероховатости» приводится в приложении к данной главе.

дополнительные руководящие указания по выбору площадки и местоположению датчика ветра в целях повышения репрезентативности данных, можно найти в настоящем томе, глава I, приложение 1.D.

Необходимо учитывать два важнейших аспекта. Во-первых, анемометры следует, насколько это возможно, располагать подальше от местных препятствий. В тех случаях, когда измерения ветра проводятся не на вершине мачты или вышки, а сбоку от нее, приборы следует размещать на выносных штангах, длина которых составляет, как минимум, три ширины мачты или вышки (Gill et al., 1967). При размещении приборов на зданиях они должны быть приподняты над крышей не менее, чем на ширину здания. Во-вторых, следует тщательно описывать состояние окружающей местности (Wieringa, 1983). Должна быть, как минимум, составлена карта окрестностей станции в радиусе не менее 2 км, описывающая расположение и высоту препятствий и растительности, орографию местности и т. п. Изменения, происходящие в окрестностях станции, такие как, строительство зданий или увеличение высоты деревьев, должны быть исчерпывающе описаны в документации станции. Также должны быть подробно описаны размещенные на станции приборы.

В тех случаях, когда стандартная установка невозможна, анемометр должен устанавливаться на такой высоте, чтобы на его показания не влияли местные препятствия, а также чтобы эти показания по возможности давали представление о том, каким был бы ветер на высоте 10 м при отсутствии поблизости каких-либо препятствий. Если изменения рельефа местности по азимуту незначительные, то анемометр обычно помещают на уровень, превышающий 10 м на величину, зависящую от показателя шероховатости окружающей местности z_0 (см. приложение): около 13 м при z_0 = 0,1 м и около 19 м при z_0 = 0,5 м. Как показано в работе Wieringa (1980*b*), стратегия повышения уровня размещения анеморумбометра не работает в случае, когда высота рельефа значительно изменяется с азимутом. Сейчас имеются простые методы количественной оценки влияния топографии местности (Walmsley et al., 1990), а для определения поправок на размещение прибора в условиях неоднородной окружающей местности используются климатологические ряды данных о порывистости ветра (Verkaik, 2000). Evans and Lee (1981) и Grimmond et al. (1998) рассматривают характер этой проблемы для условий города (см. также том III, глава 9 настоящего Руководства).

В условиях погоды с отрицательной температурой необходимо принимать особые меры для защиты ветровых приборов от гололеда и обледенения. В некоторых районах, возможно, следует предусмотреть искусственный обогрев открытых частей ветровых приборов с помощью, например ИК-излучателя с автоматическим поддержанием заданной температуры. Для определенных видов ветроизмерительных приборов уже разработаны специальные экраны для защиты от гололеда и обледенения (см. Curran et al., 1977).

5.9.3 Размещение анемометров на море

Все более насущной становится потребность в инструментальных измерениях ветра на море, особенно с помощью необслуживаемых автоматических систем (см. также том III, глава 4 настоящего Руководства). Решение этой задачи сопряжено с определенными трудностями, поскольку в морских условиях, из-за состояния моря и/или колебания уровня при приливе и отливе, не всегда можно выполнить стандартное требование, разработанное для суши, по установке приборов на высоте 10 м. Очевидное распространение на морские условия критерия установки прибора на суше приводит к мысли о том, что на заякоренных буях, например, следует устанавливать анемометр на высоте 10 м над ватерлинией буя. Однако другие источники ошибок зачастую являются более значительными, чем те, которые связаны с различной высотой размещения ветровых приборов (см. обзор в WMO, 1981). В случае стационарных платформ и судов очень важно, чтобы датчики ветра устанавливались достаточно высоко над платформой и ее надстройками, для того чтобы избежать зачастую довольно сильного влияния самой платформы на локальную структуру поля ветра. В общем случае нельзя с полной уверенностью утверждать, что на датчик ветра не влияет конструкция платформы, даже если он расположен по крайней мере на 10 м выше самого высокого препятствия на платформе, за исключением тех случаев, когда платформа относительно мала. В обзоре ВМО (WMO, 1981) делается вывод о том, что для получения точных и полезных результатов измерений ветра следует отдавать приоритет правильному расположению приборов в морских условиях, а не размещению приборов на стандартной высоте 10 м (WMO, 1989). Несмотря на тщательный выбор размещения анемометра, на практике зачастую невозможно избежать связанных с этим ошибок. С целью обеспечения возможности проведения корректировки данных с учетом высоты измерения и возмущения воздушного потока необходимо иметь запись и подробную информацию о размещении анемометра, а также о платформе или типе судна (геометрическая форма, размер). В случае, когда скорость ветра измеряется на высоте существенно большей 10 м (т. е., когда соответствующий коэффициент приведения превышает 1,2), необходимо привести скорость ветра к уровню 10 м путем процедур, рекомендуемых в следующем пункте, и с использованием постоянной, соответствующей «открытому морю» в таблице, приведенной в приложении.

5.9.4 Корректировка данных с учетом размещения датчиков

При наблюдениях за приземным ветром вряд ли возможно избежать проблем, связанных с размещением приборов. Требование относительно размещения станции на открытой ровной местности выполнить сложно, поэтому для большинства станций на суше, где производятся измерения ветра, возникают трудности, связанные с возмущениями ветра, вызванными либо орографией, либо неоднородностью поверхности, либо с тем и другим одновременно (WMO, 1987; Wieringa, 1996).

Ясно, что ошибки, допущенные при размещении датчиков ветра, создают проблемы для пользователей данных о ветре и зачастую делают эти данные бесполезными. Эта проблема является особенно серьезной при использовании данных в численных моделях прогноза погоды, где существует тенденция к раздельному анализу полей ветра и давления. Данные о приземном ветре, однако, могут быть использованы для инициализации модели только в том случае, если они являются репрезентативными для большой территории. Это означает, что ошибки, связанные с местными условиями и/или нестандартной высотой наблюдения, должны быть устранены.

Корректировка данных наблюдений за ветром для локальных условий размещения может производиться только при наличии данных измерений приемлемого качества и полученных для участков с не слишком шероховатой ($z_0 \leq 0{,}5$ м) и относительно ровной поверхностью. Не следует пытаться корректировать данные измерений, которые едва ли характеризуют средние значения по региону. Так, данные о ветре, полученные на станции в глубокой долине, где преобладают стоковые ветры, могут быть полезны для локальных прогнозов, но не являются репрезентативными для региона в целом.

Если U — это скорость ветра, измеренная на высоте z, то скорректированная скорость ветра U_c, которая наблюдалась бы на высоте 10 м над поверхностью с шероховатостью z_0, определяется из:

$$U_c = U \cdot C_F \cdot C_T \cdot \frac{\ln\left(10 / z_{0u}\right)}{\ln\left(z / z_{0u}\right)} \cdot \frac{\ln\left(60 / z_{0u}\right)\ln\left(10 / z_0\right)}{\ln\left(10 / z_{0u}\right)\ln\left(60 / z_0\right)} \tag{5.3}$$

где C_F — поправка на искажение потока; C_T — поправочный множитель, учитывающий влияние рельефа местности; z_{0u} — обобщенный параметр шероховатости поверхности с наветренной стороны от места наблюдений; z_0 — высота уровня шероховатости, принятая в данном виде расчетов (например, в пределах расчетной ячейки численной модели прогноза). В этом соотношении значения z, z_0 и z_{0u} выражены в метрах. Различные поправки означают следующее:

a) искажение потока: поправка на искажение потока C_F учитывает влияние крупных местных объектов. Это особенно важно для анемометров, установленных на буровых установках, судах и морских платформах. Лучшим способом определения C_F как функции направления ветра является моделирование в аэродинамической трубе (Mollo-Christensen and Seesholtz, 1967). Также могут проводиться оценки, основанные на соотношениях для потенциального потока вокруг простых конструкций (Wyngaard, 1981; WMO, 1984*b*). В случае измерения ветра на вершине одиноко стоящей мачты возмущением воздушного потока можно пренебречь ($C_F = 1$);

b) влияние топографии: эта поправка учитывает влияние высоты местности, окружающей станцию для измерения ветра. C_T представляет собой отношение осредненной по региону скорости ветра (осредненная скорость на высоте 10 м над горными хребтами и долинами в данном регионе) и скорости ветра, наблюдаемой на станции. Если станция расположена на вершине отдельного холма, значение C_T должно быть менее единицы, чтобы учесть влияние усиления ветра, вызванного холмом, и сделать результат репрезентативным не только для вершины холма, но и для всей местности в целом. Для ровной местности $C_T = 1$. Для отдельно стоящих холмов и горных хребтов оценки C_T могут проводиться на основе простых рекомендаций (Taylor and Lee, 1984). В более сложных топографических условиях требуются модельные расчеты на основе подробных карт рельефа окружающей станцию местности (Walmsley et al., 1990). Такие расчеты достаточно сложны, но должны производиться только один раз для одной станции для получения таблицы значений C_T как функции направления ветра;

c) нестандартная высота наблюдения: этот эффект легко скорректировать посредством формулы U_c, допуская логарифмический профиль ветра в сочетании с параметром шероховатости z_{0u} подстилающей поверхности с наветренной стороны от места измерения. Для морских станций этот способ приведения к стандартной высоте может иметь большое значение. В этом случае поправки на устойчивость стратификации довольно незначительны, что оправдывает логарифмическую форму зависимости поправки от высоты;

d) влияние шероховатости: влияние на ветер шероховатости поверхности с наветренной стороны, а также наземных препятствий может корректироваться путем экстраполяции скорости ветра по логарифмическому закону на высоту 60 м с учетом параметра шероховатости для конкретной станции z_{0u} и последующей обратной интерполяции на высоту 10 м с использованием параметра шероховатости z_0, выбираемого в зависимости от вида применения данных. Параметр

шероховатости z_{0u} должен быть репрезентативным для двухкилометровой области с наветренной стороны от станции; величина z_{0u} обычно зависит от направления ветра. Методика определения z_{0u} описана в приложении.

Если возмущение потока и влияние топографии незначительны или были скорректированы, применяется (c) к поправке на расположение анемометра (d) с использованием формулы 5.3 при z = 10 м и z_0 = 0,03 м. В этом случае исправленная скорость ветра будет эквивалентна той, которая была бы измерена на гипотетической станции, расположенной в данном месте и отвечающей требованиям ВМО в части выполнения измерений на высоте 10 м. Скорость ветра, скорректированная таким образом, именуется потенциальной скоростью ветра (WMO, 2001). Здесь уместно сделать два замечания. Во-первых, высоту экстраполяции 60 м не следует рассматривать как твердо определенную величину. Высота между 40–80 м является вполне допустимой; выбор высоты 60 м является наиболее корректным применительно к двухкилометровой области, для которой величина z_{0u} является репрезентативной, и дает удовлетворительные результаты (Wieringa, 1986). Во-вторых, в диапазоне высот 10–60 м поправки профиля ветра на степень устойчивости вертикальной стратификации не могут не приниматься во внимание. Однако, при данной формулировке влияние степени устойчивости относительно мало, так как поправки на устойчивость при экстраполяции скорости ветра вверх и интерполяции ее вниз приблизительно компенсируют друг друга. Практический пример применения методов коррекции ветра в оперативной работе приведен в публикациях ВМО (WMO, 2000; WMO, 2001). Хотя большинство поправок на размещение приборов можно ввести непосредственно к измеренному ветру, включать в сводки надо как непосредственно измеренные (уровень I), так и скорректированные (уровень II) значения ветра.

5.10 КАЛИБРОВКА И ОБСЛУЖИВАНИЕ

Полностью надежная калибровка чашечных, крыльчатых и лопастных анемометров возможна лишь в аэродинамической трубе. Однако в настоящее время эксплуатационные качества таких приборов хорошо известны, и для большинства видов использования приборов, когда они находятся в хорошем состоянии, можно полагаться на калибровку изготовителя. Исследования в аэродинамической трубе полезны для специальных проектов или испытаний новых моделей приборов. Для получения дополнительной информации см. стандарты ИСО (ИСО 16622:2002 и ИСО 17713-1:2007).

В полевых условиях анемометры подвержены износу, поэтому рекомендуются их регулярные поверки. Изменение характеристик датчика, приводящее к ухудшению качества данных о ветре, может произойти в результате физического повреждения приборов, усиления трения в подшипнике или ухудшения процесса преобразования (например, снижения производительности генератора чашечного или крыльчатого анемометра в результате износа щетки).

Изучение записи в аналоговом режиме позволит выявить неисправности, такие как неверное положение нуля отсчета, ступенчатая форма кривых, вызванная трением, шум (который может проявляться при небольших скоростях ветра), низкий уровень чувствительности (при малых скоростях), а также нерегулярная или заниженная изменчивость регистрируемого ветра.

Следует проверять приборы на наличие повреждений путем поверки положения нуля анемометрической системы методом фиксирования чашек или лопастей, а ориентацию флюгера – путем фиксирования его в изначально заданном положении или положениях. Датчики, как правило, целесообразно ремонтировать только в условиях мастерской.

Следует регулярно проводить проверки системы путем контроля электрических и электронных компонентов электрических регистрирующих и телеметрических приборов. Поверять нулевую отметку и диапазон измерения следует у датчиков как скорости, так и направления ветра.

ПРИЛОЖЕНИЕ. ИНТЕГРАЛЬНЫЙ ПАРАМЕТР ШЕРОХОВАТОСТИ

Для целей корректировки размещения ветроизмерительных приборов требуется информация о параметре шероховатости z_0, репрезентативном для двухкилометровой области, расположенной с наветренной стороны от станции, как функции направления ветра. Эффективность введения поправки на шероховатость существенно зависит от точности определения этого параметра.

Предполагая равномерную выборку над морем, расчет коррекции параметра шероховатости относительно прост, поскольку может быть применено так называемое соотношение Чарнока. Оно выражает шероховатость морской поверхности в зависимости от скорости трения u^* и ускорения под действием силы тяжести g с помощью уравнения $z_{0u} = \alpha\, u^{*2}/g$, где α — эмпирическая константа, приблизительно равная 0,014. Связь скорости трения с вертикальным профилем ветра при нейтральной стратификации можно выразить с помощью уравнения $U(z) = (u^*/\kappa)\ \ln\ (z/z_{0u})$, где κ — постоянная Кармана (0,4), а z — высота наблюдения. Эти два уравнения приходится решать методом итерации, применение которого следует начать со значения z_{0u}, равного 0,000 1, и вычислить u^* для логарифмического профиля ветра, затем еще раз рассчитать z_{0u} и повторять эту процедуру расчета несколько раз.

Параметр шероховатости подстилающей поверхности зависит от типа поверхности и вида ее использования и поэтому, как правило, трудно поддается оценке. Субъективный способ определения z_{0u} основан на визуальном обследовании территории вокруг станции и использовании приведенной ниже таблицы, справедливость которой была недавно подтверждена (Davenport et al., 2000). Наиболее приемлемым способом является задание секторов в 30° по направлению ветра до расстояния 2 км. В условиях высокой степени неоднородности подстилающей поверхности интегральный параметр ее шероховатости должен определяться путем осреднения значений ln (z_{0u}), а не собственно z_{0u}.

Классификация местности по Davenport (1960), адаптированная Wieringa (1980*b*) применительно к аэродинамическому параметру шероховатости z_0

Класс	*Краткое описание местности*	z_0 *(м)*
1	Открытое море, длина разгона не менее 5 км	0,0002
2	Плоская заиленная равнина, снежный покров; отсутствие растительности, препятствий	0,005
3	Открытая плоская поверхность; трава, редкие отдельно стоящие препятствия	0,03
4	Невысокие сельскохозяйственные культуры; редкие большие препятствия, $x/H > 20$	0,10
5	Высокие сельскохозяйственные культуры; умеренное количество препятствий, $15 < x/H < 20$	0,25
6	Парковые насаждения, кусты; многочисленные препятствия, $x/H \approx 10$	0,5
7	Зона с регулярно расположенными высокими препятствиями (городская окраина, лес)	1,0
8	Городской центр с высокими и низкими зданиями	≥ 2

Примечание: здесь x — типичное расстояние от препятствия с наветренной стороны от него, а H — высота соответствующих крупных препятствий. Более детальное и современное описание классов местности содержится в Davenport et al. (2000) (см. также том III, глава 9, таблица 9.2 настоящего Руководства).

Лучшим способом определения z_{0u} является его оценка на основе рядов данных о средних квадратических отклонениях длиной в 1 год. Средние квадратические отклонения скорости ветра и его направления связаны с параметром шероховатости поверхности на участках протяженностью в несколько километров и могут быть использованы для объективной оценки z_{0u}. Как среднее квадратическое отклонение скорости ветра s_u, так и среднее квадратическое отклонение направления ветра s_d (в радианах) могут использоваться при расчетах z_{0u} с помощью следующих формул:

$$s_u / U = c_u \kappa \left[\ln \left(z / z_{0u} \right) \right]^{-1} \qquad \text{5.A.1}$$

$$s_d / U = c_v \kappa \left[\ln \left(z / z_{0u} \right) \right]^{-1} \qquad \text{5.A.2}$$

где c_u =2,2, c_v = 1,9 и κ = 0,4 в случае, когда значения s_u и s_d основаны на нефильтрованных измерениях. Для измерительных систем, описанных в 5.8.3, фильтрация сигнала приводит к уменьшению среднего квадратического отклонения скорости ветра приблизительно на 12 %, а направления ветра — на 2 %, что означает уменьшение c_u и c_v до 1,94 и 1,86 соответственно. Для применения вышеуказанных уравнений необходимо выбрать случаи сильного ветра (U > 4 м·с$^{-1}$) и осреднить s_u/U и/или s_d для всех имеющихся данных и секторов направления ветра (шириной 30°) и сезонов (шероховатость подстилающей поверхности зависит, например, от степени густоты лиственного покрова деревьев). После этого можно определить значение z_{0u} с помощью вышеуказанных уравнений, а сравнение результатов расчетов с использованием s_u и s_d даст некоторое представление о полученной точности.

В случаях, когда отсутствуют данные о среднем квадратическом отклонении, а максимальный порыв ветра определяется за период осреднения ветра (10 мин или 1 час), для расчетов z_{0u} можно также использовать отношение максимальных порывов к средним значениям за тот же период (коэффициент порывистости) (Verkaik, 2000). Для применения этого подхода необходимы сведения о динамике системы, а именно о длине пути воздушной частицы до момента срабатывания датчика и времени реакции измерительной цепочки.

СПРАВОЧНАЯ И ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ЛИТЕРАТУРА

Всемирная метеорологическая организация, 1990: *Сокращенный окончательный отчет десятой сессии Комиссии по приборам и методам наблюдений* (ВМО-№ 727). Женева.

———, 2011 (обновлено в 2017 г.): *Наставление по кодам* (ВМО-№ 306), том I.1. Женева.

Ackermann, G.R., 1983: Means and standard deviations of horizontal wind components. *Journal of Climate and Applied Meteorology*, 22:959–961.

Albers, A., H. Klug and D. Westermann, 2000: Outdoor comparison of cup anemometers. *DEWI Magazin*, No. 17.

Beljaars, A.C.M., 1987: The influence of sampling and filtering on measured wind gusts. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 4:613–626.

Busch, N.E. and L. Kristensen, 1976: Cup anemometer overspeeding. *Journal of Applied Meteorology*, 15:1328–1332.

Coppin, P.A., 1982: An examination of cup anemometer overspeeding. *Meteorologische Rundschau*, 35:1–11.

Curran, J.C., G.E. Peckham, D. Smith, A.S. Thom, J.S.G. McCulloch and I.C. Strangeways, 1977: Cairngorm summit automatic weather station. *Weather*, 32:60–63.

Davenport, A.G., 1960: Rationale for determining design wind velocities. *Journal of the Structural Division*, American Society of Civil Engineers, 86:39–68.

Davenport, A.G., C.S.B. Grimmond, T.R. Oke and J. Wieringa, 2000: Estimating the roughness of cities and sheltered country. *Preprints of the Twelfth American Meteorological Society Conference on Applied Climatology* (Asheville, NC, United States), pp. 96–99.

Evans, R.A. and B.E. Lee, 1981: The problems of anemometer exposure in urban areas: a wind-tunnel study. *Meteorological Magazine*, 110:188–189.

Frenkiel, F.N., 1951: Frequency distributions of velocities in turbulent flow. *Journal of Meteorology*, 8:316–320.

Gill, G.C., L.E. Olsson, J. Sela and M. Suda, 1967: Accuracy of wind measurements on towers or stacks. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 48:665–674.

Gold, E., 1936: Wind in Britain: The Dines anemometer and some notable records during the last 40 years. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 62:167–206.

Grimmond, C.S.B., T.S. King, M. Roth and T.R. Oke, 1998: Aerodynamic roughness of urban areas derived from wind observations. *Boundary-Layer Meteorology*, 89:1–24.

International Organization for Standardization, 2002: *Meteorology – Sonic Anemometers/Thermometers – Acceptance Test Methods for Mean Wind Measurements*, ISO 16622:2002. Geneva.

———, 2007: *Meteorology – Wind Measurements – Part I: Wind Tunnel Test Methods for Rotating Anemometer Performance*, ISO 17713-1:2007. Geneva.

Kaimal, J.C., 1980: Sonic anemometers. In: *Air-sea Interaction: Instruments and Methods* (F. Dobson, L. Hasse and R. Davis, eds.). Plenum Press, New York, pp. 81–96.

Lenschow, D.H. (ed.), 1986: *Probing the Atmospheric Boundary Layer*. American Meteorological Society, Boston.

MacCready, P.B., 1966: Mean wind speed measurements in turbulence. *Journal of Applied Meteorology*, 5:219–225.

MacCready, P.B. and H.R. Jex, 1964: Response characteristics and meteorological utilization of propeller and vane wind sensors. *Journal of Applied Meteorology*, 3:182–193.

Makinwa, K.A.A., J.H. Huijsing and A. Hagedoorn, 2001: Industrial design of a solid-state wind sensor. *Proceedings of the First ISA/IEEE Conference* (Houston, November 2001), pp. 68–71.

Mazzarella, D.A., 1972: An inventory of specifications for wind-measuring instruments. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 53:860–871.

Mollo-Christensen, E. and J.R. Seesholtz, 1967: Wind tunnel measurements of the wind disturbance field of a model of the Buzzards Bay Entrance Light Tower. *Journal of Geophysical Research*, 72:3549–3556.

Patterson, J., 1926: The cup anemometer. *Transactions of the Royal Society of Canada*, 20(III):1–54.

Smith, S.D., 1980: Dynamic anemometers. In: *Air-sea Interaction: Instruments and Methods* (F. Dobson, L. Hasse and R. Davis, eds.). Plenum Press, New York, pp. 65–80.

Taylor, P.A. and R.J. Lee, 1984: Simple guidelines for estimating wind speed variations due to small scale topographic features. *Climatological Bulletin*, Canadian Meteorological and Oceanographic Society, 18:3–22.

van Oudheusden, B.W. and J.H. Huijsing, 1991: Microelectronic thermal anemometer for the measurement of surface wind. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 8:374–384.

Verkaik, J.W., 2000: Evaluation of two gustiness models for exposure correction calculations. *Journal of Applied Meteorology*, 39:1613–1626.

Walmsley, J.L., I.B. Troen, D.P. Lalas and P.J. Mason, 1990: Surface-layer flow in complex terrain: Comparison of models and full-scale observations. *Boundary-Layer Meteorology*, 52:259–281.

Wieringa, J., 1967: Evaluation and design of wind vanes. *Journal of Applied Meteorology*, 6:1114–1122.

———, 1980*a*: A revaluation of the Kansas mast influence on measurements of stress and cup anemometer overspeeding. *Boundary-Layer Meteorology*, 18:411–430.

———, 1980*b*: Representativeness of wind observations at airports. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 61:962–971.

———, 1983: Description requirements for assessment of non-ideal wind stations, for example Aachen. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*,11:121–131.

———, 1986: Roughness-dependent geographical interpolation of surface wind speed averages. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 112:867–889.

———, 1996: Does representative wind information exist? *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 65:1–12.

Wieringa, J. and F.X.C.M. van Lindert, 1971: Application limits of double-pin and coupled wind vanes. *Journal of Applied Meteorology*, 10:137–145.

World Meteorological Organization, 1981: *Review of Reference Height for and Averaging Time of Surface Wind Measurements at Sea* (F.W. Dobson). Marine Meteorology and Related Oceanographic Activities Report No. 3. Geneva.

———, 1984*a*: *Compendium of Lecture Notes for Training Class IV Meteorological Personnel* (B.J. Retallack). (WMO-No. 266), Volume II. Geneva.

———, 1984*b*: Distortion of the wind field by the Cabauw Meteorological Tower (H.R.A. Wessels). Paper presented at the WMO Technical Conference on Instruments and Cost-effective Meteorological Observations (TECEMO). Instruments and Observing Methods Report No. 15. Geneva.

———, 1987: *The Measurement of Gustiness at Routine Wind Stations: A Review* (A.C.M. Beljaars). Instruments and Observing Methods Report No. 31. Geneva.

———, 1989: *Wind Measurements Reduction to a Standard Level* (R.J. Shearman and A.A. Zelenko). Marine Meteorology and Related Oceanographic Activities Report No. 22 (WMO/TD-No. 311). Geneva.

———, 1991: *Guidance on the Establishment of Algorithms for Use in Synoptic Automatic Weather Stations: Processing of Surface Wind Data* (D. Painting). Report of the CIMO Working Group on Surface Measurements, Instruments and Observing Methods Report No. 47 (WMO/TD-No. 452). Geneva.

———, 2000: Wind measurements: Potential wind speed derived from wind speed fluctuations measurements, and the representativity of wind stations (J.P. van der Meulen). Paper presented at the WMO Technical Conference on Meteorological and Environmental Instruments and Methods of Observation (TECO-2000). Instruments and Observing Methods Report No. 74 (WMO/TD-No. 1028). Geneva.

———, 2001: *Lecture Notes for Training Agricultural Meteorological Personnel* (J. Wieringa and J. Lomas) (WMO-No. 551). Geneva.

Wyngaard, J.C., 1981: The effects of probe-induced flow distortion on atmospheric turbulence measurements. *Journal of Applied Meteorology*, 20:784–794.

ГЛАВА 6. ИЗМЕРЕНИЕ КОЛИЧЕСТВА ОСАДКОВ

6.1 ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

В настоящей главе описаны хорошо известные методы измерения количества осадков на наземных станциях.

В ней также рассматриваются измерения интенсивности осадков (в частности, величины дождевых осадков или интенсивности дождевых осадков) в связи со всевозрастающей необходимостью таких измерений для интерпретации особенностей дождевых осадков, моделирования и прогнозирования такого явления, как дождевые осадки.

Хотя эта глава включает измерение осадков в виде снега и других твердых продуктов конденсации водяного пара, измерение снега на почве и свежевыпавшего снега подробно обсуждается в томе II, глава 2 настоящего Руководства. В этой главе не рассматриваются измерения, при которых определяются структура и характер осадков, требующие специализированных приборов или не относящиеся к стандартным метеорологическим наблюдениям (например, распределение по размеру капель). Морские и радиолокационные измерения рассматриваются в томе III, главы 4 и 7, настоящего Руководства соответственно, в то время как наблюдения из космоса рассматриваются в томе IV.

Общая проблема репрезентативности особенно остро стоит при измерении количества осадков. На измерения количества осадков существенное влияние оказывают местоположение приборов, ветер и топография, в связи с чем особую важность для потребителей представляют метаданные, описывающие условия, в которых проводятся измерения.

Анализ данных об осадках становится более простым и надежным, если по всей сети используются одинаковые осадкомеры и критерии размещения осадкомерных постов. Это должно быть основным рассматриваемым фактором при проектировании сетей.

6.1.1 Определения

Осадки определяются как жидкие или твердые продукты конденсации водяного пара, выпадающие из облаков, в виде дождя, мороси, снега, снежных зерен, снежных гранул, града и ледяных гранул; или выпадающие из чистого воздуха в виде алмазной пыли. Твердые осадки менее плотные, чем жидкие, и более изменчивы с точки зрения структуры (например, различные формы кристаллов льда или «форм кристаллического строения») и связанной с ними аэродинамики.

Влага также может переноситься на подстилающую поверхность через росу, град, иней или туман, но эти формы осаждающихся из воздуха частиц не включены в определение осадков. Тем не менее, они описаны в 6.6.

Общее количество осадков, которое достигает земной поверхности за какой-то определенный период времени, выражается высотой слоя воды (или водным эквивалентом в случае твердых осадков), который покрыл бы в жидком состоянии горизонтальную проекцию земной поверхности.

Под интенсивностью осадков понимается количество атмосферных осадков, собранных за единицу временного интервала. В соответствии с этим определением данные об интенсивности осадков могут определяться как производная величина от количества измеренных осадков с использованием обычного осадкомера. В этом смысле

интенсивность осадков является вторичным параметром, вычисленным из первичного параметра — количества осадков. Однако интенсивность осадков также может быть измерена напрямую (см. 6.1.4.1).

6.1.2 Единицы измерения

Единица измерений осадков представляет собой линейную высоту, которая обычно для жидких осадков выражается в миллиметрах (объем/площадь) или в кг·м$^{-2}$ (масса/площадь). Суточное количество осадков следует определять с точностью до 0,2 мм, а если возможно, то до 0,1 мм. Недельное или месячное количество осадков надо определять с точностью, по меньшей мере, до 1 мм. Суточные измерения осадков следует производить в одно и то же время, общее для всей сети или всех сетей, где производятся измерения. Если количество осадков не превышает 0,1 мм (или 0,2 мм в зависимости от используемого разрешения), то обычно говорят о следах осадков.

Единица измерения интенсивности выражается линейной высотой осадков за один час (мм·ч$^{-1}$). Интенсивность дождевых осадков обычно измеряется или определяется как производная величина за временные интервалы, равные одной минуте, в связи с высокой изменчивостью интенсивности от минуты к минуте.

6.1.3 Метеорологические и гидрологические требования

Глава 1, приложение 1.A настоящего тома содержит общее изложение требований к неопределенности, диапазону и разрешению для измерений количества осадков.

Обычно для синоптических, климатологических и гидрологических целей наблюдения производят ежечасно, через 3 часа и ежесуточно. Для некоторых целей, например, для проектирования и управления городскими дренажными системами, прогнозирования и смягчения последствий бурных паводков, принятия мер по обеспечению безопасности транспорта и в целом для большинства применений, когда данные о дождевых осадках получаются в реальном времени, требуется гораздо большее временное разрешение, например, для измерения очень интенсивных осадков за очень короткие периоды (обычно 1 минута для измерения интенсивности дождевых осадков). Некоторые другие прикладные задачи требуют использования суммарных осадкомеров, и интервалы наблюдений составляют недели или месяцы, а в горах и пустынях, даже год.

6.1.4 Методы измерений

6.1.4.1 *Приборы*

Осадкомеры (или дождемеры, когда можно измерить только жидкие осадки) являются наиболее распространенными для измерения количества осадков приборами. Как правило, используется открытая емкость с вертикальными стенками, имеющая форму правильного цилиндра с воронкой, если основная цель состоит в измерении дождевых осадков. Поскольку размеры и форма приемного отверстия и высота осадкомеров в разных странах различаются, результаты измерений не являются строго сопоставимыми (WMO, 1989*a*). Измеряется объем или масса осадков, собранных в осадкомере, причем последнее относится, прежде всего, к твердым осадкам. Приемное отверстие осадкомера может располагаться на одной из многих точно заданных высотах над поверхностью земли или на одном уровне с окружающей поверхностью земли. Отверстие должно находиться выше уровня, соответствующего максимальной высоте предполагаемого слоя снежного покрова, и на такой высоте, чтобы исключить попадание брызг с поверхности земли. Более чем в 100 странах чаще всего отверстие осадкомера располагается на высоте от 0,5 до 1,5 м над поверхностью земли (WMO, 1989*a*).

Измерение осадков существенно зависит от местоположения прибора и особенно от ветра. Для измерения твердых осадков, которые более подвержены воздействию

ветра, чем измерения жидких осадков из-за меньшей плотности гидрометеоров, вокруг отверстия датчика следует установить искусственный экран. Месторасположение прибора обсуждается в разделе 6.2, а в разделе 6.4 довольно подробно описываются ошибки, характерные для измерений, произведенных осадкомерами, и возможные вводимые поправки.

Интенсивность дождевых осадков может быть получена как производная величина от количества осадков, измеренных с использованием плювиографов (см. 6.5), или измерена напрямую. Последнее может быть сделано, например, используя осадкомер и измеряя поток собранной воды путем измерения прироста количества собранной воды в функции времени, или используя некоторые оптические принципы измерения. Ряд методик по определению количества осадков основывается на этих непосредственных измерениях интенсивности осадков за счет интегрирования измеренной интенсивности за определенный интервал времени.

В этой главе также упоминаются некоторые другие специальные методы измерения твердых осадков и других типов осадков (роса и тому подобное). Некоторые методы и приборы, которые используются в оперативном применении, здесь не рассматриваются; к примеру, одним из таких приборов является оптический осадкомер, в основу которого положен принцип оптического рассеяния. Полезную информацию о новых разрабатываемых методах можно почерпнуть из отчетов регулярно проводимых конференций, таких как Техническая конференция по приборам и методам наблюдений в области метеорологии и окружающей среды (ТЕКО), международные учебно-практические семинары по измерениям количества осадков (Slovak Hydrometeorological Institute and Swiss Federal Institute of Technology, 1993; WMO, 1989*b*), а также взаимные сравнения приборов, организуемые КПМН (например WMO, 1998).

Измерения осадков в точках служат в качестве основного источника данных для анализа осадков по площади. Однако даже наилучшие измерения осадков в одной точке репрезентативны лишь для ограниченного района, размеры которого представляют собой функцию длительности периода накопления, физико-географической однородности района, местной топографии и осадкообразующего процесса. Радиолокаторы и спутники, используются для определения и количественного выражения пространственного распределения осадков. В принципе можно ожидать, что соответствующая интеграция всех трех источников данных об осадках по площади (автоматические осадкомеры, радиолокаторы и спутники) в национальных осадкомерных сетях обеспечит достаточно точные оценки осадков по площади на оперативной основе для широкого круга потребителей данных об осадках.

Приборы, которые обнаруживают осадки и идентифицируют их тип отдельно от их измерения, могут использоваться в качестве современных датчиков погоды и упоминаются в настоящем томе, глава 14.

6.1.4.2 ***Эталонные осадкомеры и взаимные сравнения***

Несколько типов осадкомеров используется в качестве эталонных приборов. Основная особенность их конструкции состоит в том, что уменьшается или регулируется влияние ветра на количество осадков, попавших в прибор. Это влияние является основной причиной различий в показаниях осадкомеров. Эталонные осадкомеры выбираются также для уменьшения других ошибок, описанных в 6.4.

Осадкомеры, установленные на одном уровне с поверхностью земли, используются в качестве эталонных приборов для измерения жидких осадков. Из-за почти полного отсутствия ошибок, обусловленных влиянием ветра, они обычно регистрируют больше осадков, чем любой другой осадкомер, расположенный над поверхностью земли (WMO, 1984, 2009). Осадкомер устанавливается в углублении таким образом, чтобы его приемное отверстие находилось на уровне земли в достаточном отдалении от ближайшего края углубления, чтобы исключить попадание брызг с поверхности земли. Углубление должно закрываться прочной пластиковой или металлической решеткой для защиты от брызг

с отверстием в середине для осадкомера. Необходимо принять меры для осушения углубления. Описание и чертежи стандартного осадкомера приведены в приложении 6.A, и более подробное описание содержится в публикации WMO (2009) и стандарте EN-13798: 2010 (Европейский комитет по стандартизации (CEN), 2010).

Эталонный осадкомер для измерения твердых осадков представляет собой так называемый эталон с двойной заборной защитой, предназначенный для взаимных сравнений (DFIR). Он снабжен восьмиугольной вертикальной двойной заборной защитой; она устанавливается вокруг осадкомера Третьякова, который сам по себе имеет специальную форму ветровой защиты. Чертежи и описание содержатся в публикациях Goodison et al. (1989) и (WMO, 1985, 1998).

Рекомендации по сравнению осадкомеров с эталонными осадкомерами приводятся в приложении 6.B.

6.1.4.3 ***Документация***

На результаты измерений количества осадков очень сильно влияет местоположение прибора, поэтому при составлении полного исторического описания станции, используемого при климатологических и других исследованиях и для обеспечения качества данных (ОК), необходимо тщательно зарегистрировать метаданные, т. е. условия измерений.

В разделе 6.2 приводится информация о размещении осадкомерных пунктов, которую необходимо хранить, а именно: подробное описание площадки, включая угловую высоту значительных препятствий вокруг осадкомера, конфигурации осадкомера, высоты расположения приемного отверстия осадкомера над поверхностью земли и высоты над поверхностью земли прибора, измеряющего скорость ветра.

Изменения в методах наблюдения за осадками, главным образом использование другого типа датчика осадков и/или изменение местоположения или конфигурации датчика (например, высота установки, ветрозащитный экран), могут вызвать временные неоднородности во временных рядах осадков (см. Том V, глава 2 настоящего Руководства).Изменения в методах наблюдений за осадками, главным образом, использование различных типов осадкомеров и/или изменение места размещения или конфигурации (например, высота установки приборов, ветрозащитный экран) могут привести к возникновению неоднородностей во временных рядах данных об осадках (см. том V, глава 2 настоящего Руководства). Использование различных типов осадкомеров и различия в их размещении приводят к возникновению пространственных неоднородностей. Это связано с систематическими ошибками в измерении осадков, в основном с ошибками, вызванными влиянием ветра. Статистические методы корректировки позволяют устранить неоднородности в измерениях, произведенных осадкомерами, расположенными по соседству друг с другом, а внесение в результаты измерений поправок на влияние ветра позволяет уменьшить погрешности значений, полученных в результате измерений.

В последующих разделах (особенно в 6.4), посвященных различным типам приборов, описаны поправки, которые могут вводиться в результаты измерений количества осадков. Такие поправки могут также иметь погрешности, поэтому необходимо хранить первоначальные результаты измерений и формулы, по которым поправки рассчитывались.

Следует также документировать любые изменения в методах наблюдений.

6.2 РАЗМЕЩЕНИЕ И УСТАНОВКА

Все методы измерения количества осадков должны быть направлены на получение пробы, репрезентативной по отношению к истинному количеству осадков, выпадающему в исследуемом районе синоптического, мезо- или микромасштаба. Поэтому важен выбор места, а также определение систематической погрешности измерений. Влияние выбора места обсуждается в публикации Sevruk and Zahlavova (1994).

Немаловажным является размещение осадкомерных пунктов в исследуемом районе, так как число этих пунктов и их расположение определяют, насколько репрезентативны произведенные измерения количества осадков для данного района. Более подробная информация о репрезентативности данных о дожде и снеге приведена в публикации WMO (1992*a*). Введение в литературу, посвященную расчету осадков по площади и поправкам на топографию, содержится в публикации WMO (2008).

Влияние на поле ветра предметов, расположенных поблизости от осадкомерного пункта, может приводить к регистрации локальных излишков или дефицита осадков в месте расположения осадкомера. Желательно, чтобы никакие объекты не находились от осадкомера на расстоянии, меньшем их удвоенной высоты над отверстием осадкомера. Для каждого осадкомерного пункта следует рассчитать среднюю угловую высоту препятствий и составить план пункта. Следует избегать установки осадкомеров на наклонной поверхности или на крыше здания. Пункты, выбранные для измерения количества выпавшего снега и/или высоты снежного покрова, следует располагать в местах, возможно более защищенных от ветра. Наилучшие места для расположения осадкомерных пунктов часто находятся на лесных полянах или в садах, среди деревьев, в кустарниковом редколесье или там, где другие объекты представляют собой эффективную защиту от ветра со всех направлений.

Однако воздействие ветра и влияние места размещения прибора на степень этого воздействия можно уменьшить, используя для измерения жидких осадков осадкомер, расположенный на уровне поверхности земли, или заставив поток воздуха проходить горизонтально над приемным отверстием осадкомера при помощи следующих методов (перечислены в порядке уменьшения их эффективности):

a) в районах с однородной густой растительностью; высоту растительности при помощи регулярного подрезания следует поддерживать таким образом, чтобы она равнялась высоте приемного отверстия осадкомера;

b) в других районах следует стимулировать эффект, описанный в пункте (a), путем применения соответствующих ограждений, таких как используемых для DFIR;

c) следует использовать ветровую защиту вокруг осадкомера.

Поверхность, окружающая осадкомер, может быть покрыта низкой травой, гравием или галькой, но необходимо избегать твердых гладких покрытий, таких как бетон, с целью предотвращения излишнего попадания брызг в осадкомер.

Классификация мест размещения прибора для производства измерений была разработана для того, чтобы дать количественную оценку и задокументировать влияние окружающей осадкомер среды (см. настоящий том, глава 1, приложение 1.D). В этой классификации используется относительно простое описание (наземных) мест размещения.

6.3 НЕРЕГИСТРИРУЮЩИЕ ОСАДКОМЕРЫ

6.3.1 Обычные осадкомеры

6.3.1.1 *Приборы*

Повсеместно используемый осадкомер состоит из коллектора, помещенного над воронкой, соединенной с контейнером, в котором вода или растаявший снег накапливаются и хранятся между сроками наблюдений. Как показано на рисунке 6.1, в мире используются осадкомеры различной формы. Там, где твердые осадки выпадают часто и в большом количестве, для повышения точности измерений используется ряд специальных модификаций. Такие модификации включают удаление воронки дождемера перед началом снежного сезона или применение специального снегозадерживающего щита (см. WMO, 1998) для защиты от выдувания снега. Ветровая защита вокруг осадкомера уменьшает ошибку, обусловленную деформацией поля ветра над осадкомером и задуванием снега в осадкомер. Она рекомендована для измерения количества осадков и необходима для измерения количества выпавшего снега. Используемые осадкомеры весьма разнообразны по конструкции (см. WMO, 1989*a*).

Накопленная вода либо собирается в измерительном сосуде, либо переливается из контейнера в измерительный сосуд, либо ее уровень в контейнере измеряется непосредственно с помощью проградуированной рейки. Размер приемного отверстия коллектора не оказывает существенного влияния на измерение жидких осадков, но если ожидается значительное количество твердых осадков, то площадь отверстия

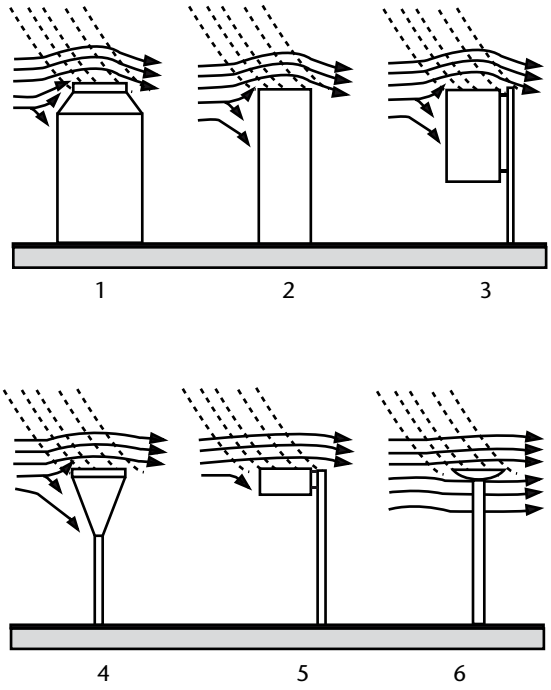


Рисунок 6.1. Различные формы стандартных осадкомеров. Сплошными линиями показаны воздушные потоки и пунктирными линиями показаны траектории движения частиц, образующих осадки. Первый прибор показывает самую сильную деформацию ветрового поля над приемным отверстием осадкомера, а последний прибор — наименьшую. Соответственно, поправка на влияние ветра для первого прибора больше, чем для последнего осадкомера.

Источник: Sevruk and Nespor (1994)

должна составлять по меньшей мере 200 см^2. Площадь от 200 до 500 см^2 будет, вероятно, наиболее подходящей. Основные требования, предъявляемые к осадкомеру, сводятся к следующему:

a) ободок коллектора должен иметь острый край и быть строго вертикальным внутри и пологим снаружи; конструкция осадкомеров для измерения количества снега должна быть такой, чтобы сужение приемного отверстия из-за скопления мокрого снега вокруг ободка не могло быть значительным;

b) площадь приемного отверстия должна быть известна с точностью до 0,5 %, и конструкция осадкомера должна быть такой, чтобы эта площадь оставалась постоянной при обычном использовании осадкомера;

c) коллектор должен быть сконструирован таким образом, чтобы осадки не выбрызгивались изнутри наружу и чтобы брызги не попадали внутрь. Этого можно достичь, если вертикальная стенка достаточно высока и наклон воронки достаточно пологий (по крайней мере 45 %). Подходящее устройство коллекторов показано на рисунке 6.2;

d) конструкция должна быть такой, чтобы свести к минимуму потери на смачивание. Этого можно достичь путем выбора подходящего материала и сведения к минимуму суммарной внутренней поверхности коллектора;

e) входное отверстие контейнера должно быть узким, и контейнер должен быть в достаточной мере защищен от воздействия солнечных лучей, чтобы свести до минимума потери на испарение. Осадкомеры, используемые в местах, где целесообразно снимать показания прибора один раз в неделю или месяц, должны быть аналогичными по конструкции осадкомерам, применяемым для суточных измерений, но с контейнером большей емкости и более прочной конструкции.

Мерный стакан должен изготавливаться из прозрачного стекла или пластика с подходящим коэффициентом теплового расширения и иметь четкую маркировку, указывающую размер или тип осадкомера, с которым его следует использовать. Его диаметр должен составлять не более 33 % диаметра приемного отверстия прибора; чем меньше соответствующий диаметр, тем выше точность измерения. Деления следует наносить четко; вообще деления рекомендуется наносить с интервалом 0,2 мм и четко оцифровывать линии каждого целого миллиметра. Кроме этого, желательно, чтобы была нанесена линия-риска, соответствующая 0,1 мм. Максимальная погрешность градуировки не должна превышать ±0,05 мм у отметки 2 мм или выше и ±0,02 мм ниже этой отметки.

Для того чтобы измерить небольшое количество осадков с достаточной точностью, внутренний диаметр мерного стакана должен уменьшаться к основанию. При всех измерениях уровень воды определяется по нижнему краю мениска, и при снятии

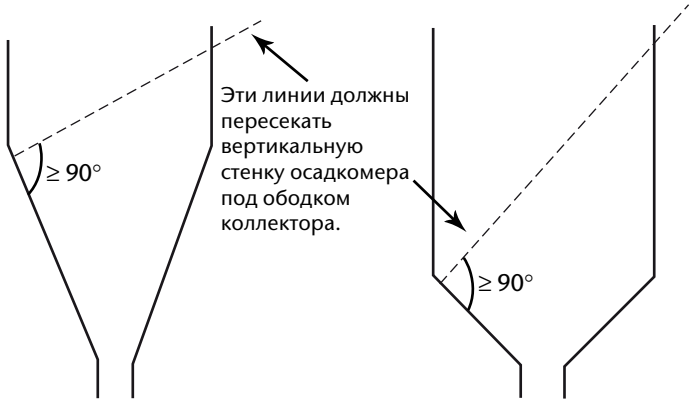


Рисунок 6.2. Подходящее устройство коллектора осадкомеров

показаний мерный стакан следует держать вертикально во избежание ошибок параллакса. Нанесение основных градуировочных линий на внутреннюю сторону стакана также помогает уменьшить такие ошибки.

Мерные рейки следует изготавливать из кедра или другого подходящего материала, который слабо поглощает воду и имеет незначительный коэффициент капиллярности. Деревянные мерные рейки непригодны, если в коллектор для уменьшения испарения добавлено масло. В этом случае рекомендуется использовать рейки из металла или других материалов, с которых масло легко удаляется. Неметаллические рейки во избежание быстрого износа должны быть снабжены латунным наконечником и градуироваться в соответствии с соотношением площадей поперечного сечения приемного отверстия осадкомера и коллектора; деления должны наноситься, по крайней мере, через каждые 10 мм, и следует предусматривать поправку на вытеснение жидкости самой мерной рейкой. Максимальная ошибка градуировки мерной рейки не должна превышать ±0,5 мм в любой точке. Измерения, проводимые при помощи мерной рейки, рекомендуется, где это возможно, проверять по мерному стакану.

6.3.1.2 *Эксплуатация*

При снятии показаний наблюдатель должен держать мерный стакан вертикально во избежание ошибок параллакса. Снег, накопленный в нерегистрирующих осадкомерах, должен либо взвешиваться, либо растапливаться сразу после каждого наблюдения, а затем измеряться с использованием стандартного градуированного мерного стакана. Количество собранных осадков можно также измерять точным взвешиванием. Этот метод имеет некоторые преимущества. Определяется общая масса мерного сосуда и его содержимого, затем вычитается масса сосуда, которая известна заранее. В этом случае возможность разлить воду маловероятна, и любое количество жидкости, оставшееся в мерном сосуде, включается в эту массу. Однако обычно используемые (объемные) методы являются более простыми и дешевыми.

6.3.1.3 *Калибровка и техническое обслуживание*

Градуировка мерного стакана или рейки должна, разумеется, соответствовать выбранному размеру коллектора. Поэтому калибровка осадкомера включает проверку диаметра приемного отверстия осадкомера: следует обеспечить, чтобы он находился в пределах разрешаемого допуска. Калибровка также включает в себя объемные проверки мерного стакана и рейки. Для измерений, основанных на весовых единицах, требуется регулярная калибровка весов.

Регулярное техническое обслуживание должно включать в себя поддержание в любое время уровня осадкомера для предотвращения нарушения его горизонтальности (см. Rinehart, 1983; Sevruk, 1984). Согласно требованиям, периодически следует чистить внешний контейнер осадкомера (как внутри, так и снаружи) и градуировку с помощью щетки с длинной ручкой и мыльной воды, после чего производится ополаскивание чистой водой. Изношенные, поврежденные или сломанные части должны по необходимости заменяться. Растительность вокруг осадкомера должна подрезаться на высоте 5 см (где это применимо). Следует проверять и фиксировать местоположение с точки зрения подверженности внешним воздействиям.

6.3.2 Суммарные осадкомеры

Суммарные осадкомеры используются для измерений общего сезонного количества осадков в отдаленных и малонаселенных районах. Такие осадкомеры состоят из коллектора, помещенного над воронкой, соединенной с контейнером, объем которого достаточен для того, чтобы вместить сезонный сбор (или месячный сбор в районах с повышенной влажностью). Для уменьшения испарения в контейнер необходимо

налить слой подходящего масла толщиной не менее 5 мм или другого вещества, препятствующего испарению (WMO, 1972). Осадки должны иметь возможность свободно попадать в раствор, находящийся под этим слоем.

В контейнер может быть налит раствор антифриза для превращения снега, попадающего в осадкомер, в жидкость. Важно, чтобы раствор антифриза оставался диспергированным. Смесь, состоящая на 37,5 % по массе из технического хлористого кальция (степень чистоты 78 %) и на 62,5 % из воды, образует удовлетворительный раствор антифриза. В качестве альтернативы используются водные растворы этиленгликоля или 1,2-пропиленгликоля. Не рекомендуется использовать компоненты антифриза с опасными свойствами (считаются опасными грузами для перевозки или опасными материалами при обращении), такие как компоненты, содержащие метанол, опасный материал, классифицированный как (высокотоксичный). Настоятельно рекомендуется внимательно ознакомиться с паспортом безопасности, также называемым паспортом безопасности материалов. Эти документы предоставляются производителем и содержат всю необходимую информацию о составе, свойствах, потенциальной опасности, мерах безопасности, обращении и хранении материала.

Хотя эти растворы более дорогостоящие, они в меньшей степени вызывают коррозию, чем хлористый кальций, и предохраняют от замерзания при большей степени разбавления, которое происходит в результате последующего попадания осадков. Объем раствора, первоначально помещаемого в контейнер, не должен превышать 33 % общего объема осадкомера.

В некоторых странах такой раствор антифриза и масла считается токсичным отходом и, следовательно, представляет угрозу для окружающей среды. Рекомендации по удалению токсичных веществ следует получить у местных органов по охране окружающей среды.

Сезонный сбор осадков определяется путем взвешивания или измерения объема содержимого контейнера (как для обычных осадкомеров; см. 6.3.1). Следует точно учитывать количество масла и антифриза, помещенных в контейнер в начале сезона, и любое уменьшение его объема при проведении объемных измерений. Поправки могут вводиться те же, что и в случае обычных осадкомеров.

Функционирование и техническое обслуживание суммарных осадкомеров в отдаленных районах создает ряд проблем, таких как занесение прибора снегом, трудность в установке осадкомера в местах, удобных для снятия показаний и т. д., которые требуют специального контроля. Особенно большое внимание следует уделять оценке качества данных, полученных с помощью таких осадкомеров.

6.4 ПОГРЕШНОСТИ И ПОПРАВКИ ПРИ ИЗМЕРЕНИИ КОЛИЧЕСТВА ОСАДКОВ

На этом этапе уместно описать погрешности и поправки, которые касаются в определенной степени большинства осадкомеров, будь то регистрирующие или нерегистрирующие приборы. Особые случаи, касающиеся регистрирующих приборов, описаны в 6.5.

Всестороннее описание погрешностей и поправок можно найти в публикациях WMO (1982, 1984, 1986; конкретно для снега в публикации 1998; и конкретно для интенсивности дождевых осадков 2006, 2009). Подробные сведения о моделях, используемых для коррекции необработанных данных об осадках в Канаде, Дании, Финляндии, Швейцарии, Российской Федерации и США, приводятся в публикации WMO (1982). В публикации WMO (1989*a*) описывается происхождение погрешностей. В публикациях WMO (1986, 1989*b*) собраны доклады конференций по этой теме. Подробное рассмотрение вопроса о повышении надежности измерений интенсивности дождевых осадков, полученных

с помощью традиционных плювиографов с самоопорожняющимся контейнером, весовых плювиографов и других типов осадкомеров (оптических, поплавковых/сифонных и т. д.), приводится в публикациях WMO (2006, 2009).

Количество осадков, измеряемых при помощи повсеместно используемых осадкомеров, может быть меньше фактического количества осадков, достигающих поверхности земли, и эта разница может достигать 30 % и более. Систематические потери изменяются в зависимости от типа осадков (снег, снег с дождем и дождь) и скорости ветра. Систематическая погрешность измерений твердых осадков, как правило, велика и может на порядок превышать величину погрешности, обычно характерной для измерения жидких осадков.

Для многих гидрологических целей необходимо сначала произвести коррекцию данных с учетом погрешностей, прежде чем делать расчеты. Такая коррекция, конечно, не может быть точной (и даже может увеличить погрешность). Поэтому исходные данные рекомендуется хранить в основном архиве как для того, чтобы поддерживать целостность данных, так и для того, чтобы иметь наилучшую основу для проведения более совершенной коррекции в будущем, если это будет возможно.

Традиционная оценка погрешностей в осадкомерах относится к так называемым погрешностям метеорологического характера. Общепринято, что измерение жидких осадков на уровне земли подвержено воздействию различных источников систематических и случайных ошибок, главным образом обусловленных потерями за счет ветра, смачивания и испарения (см. WMO, 1982), которые приводят к сомнительной надежности измерений слабых и умеренных дождевых осадков в отсутствие точной калибровки. Погрешности на ветер все еще оказывают влияние на измерение интенсивности дождевых осадков величиной порядка 20–50 мм·ч$^{-1}$ с частотой числа случаев около 5 % наблюдений на некоторых станциях взаимного сравнения в центральной Европе (WMO, 1984). Признается также, что погрешность пробоотбора вследствие дискретной природы измерения количества дождевых осадков зависит от размера контейнера (для плювиографов с самоопорожняющимся контейнером) и интервала пробоотбора или инерции прибора, но не от интенсивности осадков, и может быть вычислена аналитически (Colli et al., 2013*a*).

Истинное количество осадков рекомендуется оценивать с учетом поправок, принимая во внимание некоторые или все причины возникновения погрешностей, перечисленных ниже:

a) погрешность из-за систематической деформации поля ветра над приемным отверстием осадкомера: как правило, составляет 2–10 % в случае дождя и 10–50 % в случае снега;

b) погрешность из-за потерь на смачивание внутренних стенок коллектора;

c) погрешность из-за потерь жидкости, остающейся в контейнере при его опорожнении: обычно 2–15 % летом и 1–8 % зимой для (b) и (c) вместе взятых;

d) погрешность из-за испарения жидкости из контейнера (особенно важна для мест с жарким климатом): 0–4 %;

e) погрешность из-за низовой метели и поземки;

f) погрешность из-за попадания брызг в контейнер и выбрызгивания воды из контейнера: 1–2 %;

g) систематические механические погрешности и погрешности пробоотбора, погрешности динамических воздействий (например, систематическая задержка из-за инерции прибора): как правило, 5–15 % для интенсивности дождевых осадков или даже больше при интенсивных явлениях (см. WMO, 2009);

h) случайные ошибки наблюдений и погрешности приборов, включая некорректное время считывания показаний осадкомера.

Первые семь компонентов погрешности носят систематический характер и перечислены в порядке их значимости. Суммарная погрешность из-за низовой метели и поземки и из-за выбрызгивания воды из контейнера и попадания брызг в контейнер быть может как положительной, так и отрицательной, в то время как систематические погрешности, возникающие из-за деформации поля ветра и других факторов, являются отрицательными. Поскольку погрешности, указанные выше в пунктах (e) и (f), как правило, количественно оценить трудно, общая модель для коррекции данных большинства осадкомеров, первоначально предложенная в публикации WMO (1982) и позже преобразованная в работе Legates and Willmott (1990), может быть записана как:

$$P_k = k_r P_{cr} + k_s P_{cs} = k_r \left(P_{gr} + \Delta P_{1r} + \Delta P_{2r} + \Delta P_{3r} + \Delta P_{4r} \right) + k_s \left(P_{gs} + \Delta P_{1s} + \Delta P_{2s} + \Delta P_{3s} + \Delta P_{4s} \right) \quad (6.1)$$

где подстрочные *r* и *s* относятся соответственно к жидким (дождь) или твердым (снег) осадкам; P_k — скорректированное количество осадков; *k* (см. рисунок 6.3) — поправочный коэффициент для учета влияния деформации поля ветра; P_c — количество осадков, собранных в коллекторе прибора; P_g — измеренное количество осадков в осадкомере; ΔP_1 — поправка на потерю жидкости за счет смачивания внутренних стенок коллектора; ΔP_2 — поправка на потерю жидкости, остающейся в контейнере после его опорожнения; ΔP_3 — поправка на испарение из контейнера и ΔP_4 — поправка на систематическую механическую погрешность.

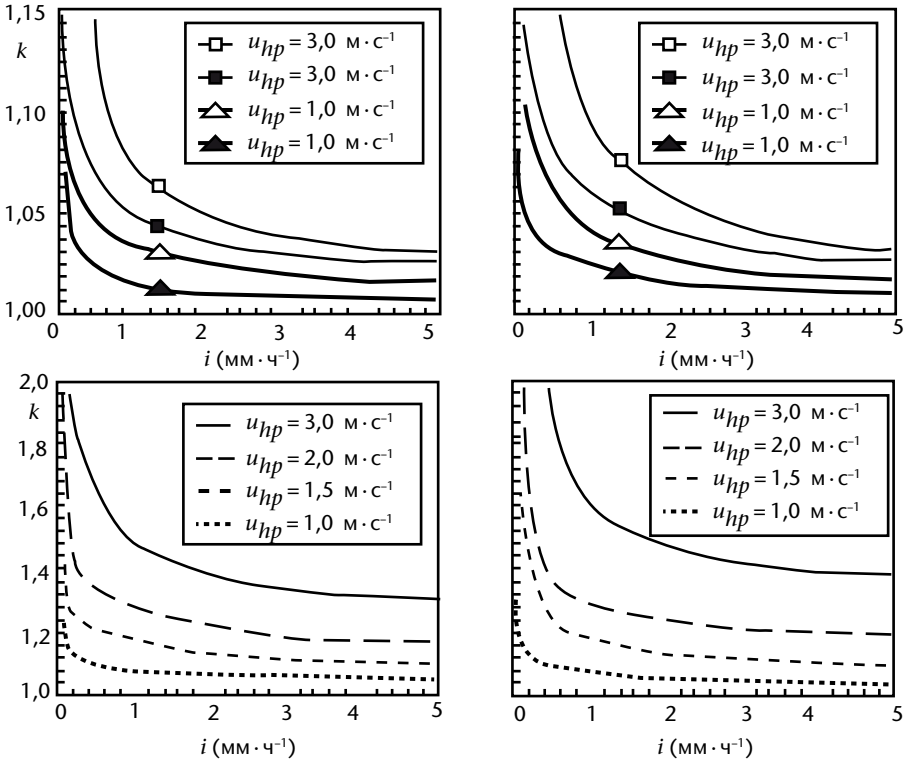


Рисунок 6.3. Коэффициент перехода *k* определяется соотношением «истинного» значения к измеренной величине осадков для дождя (вверху) и снега (внизу) для двух неэкранированных осадкомеров в зависимости от скорости ветра u_{hp}, интенсивности *i* и типа метеорологической обстановки по Nespor and Sevruk (1999). Слева показаны значения для ручного стандартного осадкомера Германа Хелмана, а справа график для плювиографа с самоопорожняющимся контейнером Ламбрехта. Незакрашенные обозначения вверху диаграммы относятся к орографическому дождю, а закрашенные черным обозначения к ливневым осадкам. Обратите внимание на разные шкалы для дождя и снега. Для экранированных осадкомеров *k* может быть меньше: до 50–70 % для снега и смешанных осадков соответственно (WMO, 1998). Потери на тепло не представлены на этой диаграмме (в Швейцарии они изменяются с изменением высоты между 10 % и 50 % от измеренных значений свежевыпавшего снега).

Погрешности на метеорологические условия для коллектора, а также погрешности на смачивание, разбрызгивание и испарение обычно рассматриваются как погрешности водосбора. Они указывают на способность прибора собирать точное количество воды в соответствии с определением осадков на уровне земли, что подразумевает общее количество воды, выпадающей над проекцией площади коллектора над землей. Систематические механические погрешности и погрешности пробоотбора, обычно относимые к количественным погрешностям, указывают на способность прибора точно обнаруживать количество воды, собираемой прибором. Лабораторные и полевые взаимные сравнения ВМО измерений интенсивности дождевых осадков осадкомерами (WMO, 2006, 2009) внесли вклад в оценку количественных погрешностей и позволили задокументировать проведение лабораторных и полевых методов калибровки для выявления и/или корректировки количественных погрешностей при измерении интенсивности дождевых осадков. Очевидно, что эти погрешности могут быть производными от очень разных аспектов на этапе обнаружения осадков, поскольку приборы могут различаться по применяемым принципам измерения, конструктивным особенностям, эксплуатационным решениям и так далее.

Поправки на погрешности измерения осадков вводятся для суточных и месячных сумм осадков, а иногда и для отдельных случаев измерения количества осадков.

При проведении измерений интенсивности осадков систематические механические погрешности могут быть точно откорректированы с помощью стандартизированной лабораторной калибровки, именуемой динамической калибровкой в неизменных устойчивых условиях эталонной скорости потока (Niemczynowicz, 1986; WMO, 2009). Более подробная информация представлена в приложении 6.C.

Вообще, для выполнения коррекции, относящейся к метеорологическим условиям, необходимы вспомогательные данные, в частности скорость ветра над приемным отверстием осадкомера во время выпадения осадков, размер капель, интенсивность выпадения осадков, температура и влажность воздуха и характеристики места установки осадкомера. Хотя температура воздуха и оказывает некоторое воздействие на занижение количества осадков, попадающих в контейнер осадкомера, это воздействие не такое значительное, как воздействие скорости ветра на высоте установки прибора (Yang et al., 1993; Yang et al., 1995). Скорость ветра, тип осадков или их интенсивность могут быть достаточными параметрами для определения поправок. Иногда используется только скорость ветра. На постах, где такие наблюдения не проводятся, для выполнения коррекции можно использовать данные, полученные путем интерполяции данных наблюдений с соседних станций, но делать это надо с осторожностью и только для месячных сумм осадков.

Для большинства осадкомеров наиболее важным фактором окружающей среды, приводящим к занижению результатов измерений твердых осадков, является скорость ветра. Данные о ветре с целью проведения суточной коррекции следует получать путем стандартных метеорологических наблюдений на станции. В отдельных случаях, когда скорость ветра не измеряется на высоте приемного отверстия осадкомера, ее можно привести к этой высоте, используя процедуру получения средней скорости ветра, зная шероховатость окружающей поверхности и угловую высоту окружающих препятствий. Предлагаемая схема показана в приложении 6.D.[1] Эта схема во многом зависит от конкретного пункта, причем оценка требует хорошего знания местоположения конкретной станции и прибора. Защищенные осадкомеры улавливают больше осадков, чем незащищенные, особенно в случае твердых осадков. Поэтому осадкомеры следует защищать либо естественным образом (например, вырубка леса), либо искусственно (например, защита Альтера, канадская защита Нифера, ветровая защита Третьякова) для сведения к минимуму неблагоприятного влияния скорости ветра на измерения твердых осадков (информацию о конструкциях защиты можно найти в публикациях WMO, 1998, 2008). От типа конфигурации ветровой защиты и от типа осадкомера зависит взаимосвязь между скоростью ветра и эффективностью улавливания осадков и однородность полученных данных.

[1] Схема приведения скорости ветра рекомендована КПМН на одиннадцатой сессии (1994 г.).

Потери на смачивание (Sevruk, 1974*a*) являются еще одной кумулятивной систематической погрешностью ручных измерений, которая варьирует в зависимости от типа осадков и осадкомера; ее величина также зависит от того, сколько раз опустошался контейнер. В среднем потери на смачивание могут составить до 0,2 мм на наблюдение. На синоптических станциях, где осадки измеряются каждые 6 часов, это может привести к очень серьезным потерям. В некоторых странах, согласно расчетам, потери на смачивание достигают 15–20 % количества измеренных зимних осадков. Приемлемой альтернативой является поправка на потерю жидкости за счет смачивания во время измерения. Потери на смачивание могут оставаться низкими в хорошо спроектированном осадкомере. Для определения потерь на смачивание при использовании ручных осадкомеров достаточно методики (WMO, 1998). Рекомендуется, чтобы величина потерь на смачивание периодически пересматривалась (например, каждые 5 лет), так как зачастую она меняется по мере старения коллектора. Внутренние поверхности должны изготавливаться из материала, который может оставаться гладким и чистым; например, покрытие краской неприемлемо, но прошедшая термообработку эмаль удовлетворяет поставленным условиям. Соединительные швы в конструкции должны быть сведены к минимуму.

Потери на испарение (Sevruk, 1974*b*) варьируют в зависимости от типа осадкомера, климатической зоны и времени года (сезоны, упомянутые ниже, соответствуют северному полушарию). Потери на испарение являются проблемой осадкомеров, которые не имеют предохранительной воронки в контейнере, особенно поздней весной в средних широтах. Сообщается о потерях, превышающих 0,8 мм в сутки. Потери зимой гораздо ниже, чем в летние месяцы, и составляют от 0,1 до 0,2 мм в сутки. Однако эти потери являются кумулятивными. В хорошо спроектированном осадкомере воздействию испарения подвержена лишь небольшая поверхность воды, ее вентиляция сведена до минимума, а температура воды удерживается низкой с помощью отражающей внешней поверхности. При использовании суммарных и накопительных регистрирующих осадкомеров, погрешности, связанные с испарением, фактически можно устранить, если в коллекторе использовать масло.

Ясно, что для достижения сопоставимости данных при использовании различных типов осадкомеров и защиты при всех погодных условиях в фактические измерения необходимо вводить поправки. Во всех случаях, когда измерения количества осадков корректируются с целью уменьшения погрешности, настоятельно рекомендуется публиковать как измеренные, так и скорректированные значения.

6.5 ПЛЮВИОГРАФЫ

Преимущество автоматической регистрации количества осадков заключается в том, что она может обеспечить лучшее временное разрешение, чем ручные измерения, и имеется возможность сократить потери на испарение и смачивание. Разумеется, такие измерения тоже подвержены влиянию ветра, описанному в 6.4.

Широко применяются три типа плювиографов: весовой, с самоопорожняющимся контейнером и поплавковый. Из этих трех типов только весовой подходит для измерения всех видов осадков, в то время как два других в основном используются для измерения жидких осадков. Существует также несколько других автоматических плювиографов, в которых нет движущихся частей. В этих осадкомерах используются такие устройства, как емкостные датчики, датчики давления, акустические и оптические датчики, или небольшие радиолокационные устройства для выработки электрического сигнала, пропорционального эквиваленту осадков. Очень важным компонентом плювиографа являются часы, позволяющие определить периоды времени, в которые производились записи, и проставлять даты записей.

Из-за высокой изменчивости интенсивности осадков, измеряемой за срок свыше 1 минуты, единичное одноминутное значение интенсивности дождевых осадков не является репрезентативным для более продолжительных периодов времени. Поэтому интенсивность дождевых осадков за 1 минуту не должна использоваться при схеме

пробоотбора по срокам, например одно синоптическое измерение каждый час или три часа. Очень хорошая синхронизация по времени, не менее 10 с, требуется между эталонным временем и различными приборами наблюдательной станции.

6.5.1 Весовой плювиограф

6.5.1.1 *Приборы*

В приборах этого типа вес контейнера вместе с накопленными в нем осадками непрерывно регистрируется с помощью пружинного механизма, системы балансировочных весов или вибрационных проволочных датчиков и тензодатчиков. Таким образом, записывается общая масса осадков, как жидких, так и твердых, по мере их выпадения. Обычно приборы этого типа не имеют приспособления для удаления из них собранных осадков; их емкость (т. е. максимальное количество накопленных осадков между перезаправками) колеблется от 250 до 1 500 мм в зависимости от модели. Модели с малой емкостью не должны использоваться в районах, где может отмечаться максимальное накопление осадков за короткий период времени. Такие приборы следует обслуживать так, чтобы свести потери от испарения к минимуму, чего можно достичь путем добавления в контейнер достаточного количества масла или другого вещества, препятствующего испарению, для создания пленки на поверхности воды. Колебание весов во время сильных ветров, затрудняющее снятие показаний, можно уменьшить при помощи специального программирования микропроцессора для устранения влияния этих колебаний на показания прибора. Такие весовые плювиографы особенно полезны для регистрации осадков в виде снега, града и смеси снега с дождем, так как для записи количества твердых осадков их не нужно растапливать. Для работы зимой контейнер-накопитель заправляется раствором антифриза (см. 6.3.2) для растапливания твердых осадков. Количество антифриза зависит от ожидаемого количества осадков и минимальной температуры, предполагаемой во время минимального разбавления. Эти приборы не используют никаких движущихся механических частей в механизме взвешивания; используются только эластичные деформации частей. Поэтому значительно уменьшается потребность в обслуживании прибора, не имеющего механического износа деталей.

Цифровой выходной сигнал обычно усредняется и фильтруется. Интенсивность осадков также может быть рассчитана по разнице между двумя или более последовательными весовыми измерениями. Точность такого рода осадкомеров непосредственно связана с их характеристиками измерения и/или регистрации, которые могут меняться в зависимости от завода-изготовителя.

Многие приборы имеют выходные данные, содержащие диагностические параметры, которые очень полезны для последующей оценки данных измерений и для контроля качества данных (КК).

Технология взвешивания в сочетании с самоопорожняющимся контейнером обеспечивает высокое разрешение и высокую точность измерений при очень небольшом объеме конструкции. Этот тип прибора измеряет вес воды в самоопорожняющемся контейнере объемом до 20 мл и может определять меньшее количество осадков по сравнению с «классическими» плювиографами с самоопорожняющимся контейнером (см. 6.5.2).

6.5.1.2 *Погрешности и поправки*

За исключением погрешности за счет потерь на смачивание контейнера после опорожнения для весовых плювиографов характерны остальные источники погрешностей, описанные в 6.4. Кроме того, следует отметить, что сами по себе автоматические плювиографы не позволяют определить тип осадков. Существенной проблемой для этого типа осадкомеров являются такие осадки, как, например замерзающий дождь или влажный снег, которые могут прилипнуть к внутренней поверхности приемного отверстия осадкомера и попасть внутрь контейнера только некоторое время спустя. Это серьезно ограничивает способность весовых плювиографов

точно определять время выпадения осадков. Другим общим недостатком весовых плювиографов является раскачивание под влиянием ветра. Это обычно происходит при сильных ветрах, когда турбулентные воздушные потоки над накопительным контейнером и вокруг него вызывают колебания весового механизма. Погрешности, связанные с такими аномальными показаниями, могут быть сведены к минимуму путем осреднения показаний за короткие временные интервалы, обычно за период от 1 до 5 мин. Погрешности в работе часов прибора могут привести к тому, что периоды времени, в которые осуществлялся сбор осадков, и даты сбора осадков будут определены неправильно. Некоторые весовые плювиографы также могут проявлять некоторую температурную чувствительность в механизме взвешивания, что добавляет одну составляющую к результату, которая пропорциональна суточному температурному циклу.

Использование весовых плювиографов позволяет исключить или, по крайней мере, свести к минимуму некоторые потенциальные погрешности, обусловленные измерением осадков вручную. Сводятся к минимуму случайные погрешности измерений, связанные с ошибками наблюдателя, а также определенные систематические погрешности, особенно за счет потерь на испарение и смачивание. В некоторых странах при наблюдении следов осадков количеству осадков официально придается значение нуль, что приводит к смещению в сторону недооценки суммарных сезонных осадков. Эта проблема сводится к минимуму путем применения весовых плювиографов, поскольку даже при очень небольшом количестве осадки накапливаются со временем.

Основной характеристикой весового плювиографа при измерении интенсивности осадков является его инерционность (включая процесс фильтрования), которая приводит к погрешности измерений (систематическая задержка). Время отклика, приведенное в руководстве по эксплуатации или определенное в процессе предыдущего взаимного сравнения ВМО (WMO, 2009), составляет примерно от шести секунд до нескольких минут, в зависимости от устройства и модели прибора. Одноминутное разрешение величины интенсивности осадков, измеряемых весовыми плювиографами, может сильно отличаться от прибора к прибору и зависит от разрешения преобразователя. Такие осадкомеры могут также обнаруживать ограничение или избирательные пороговые величины для определения интенсивности осадков.

Внесение поправок в данные весовых плювиографов на ежечасной или ежесуточной основе может быть более трудной задачей, чем на основе более длительных периодов времени, например для месячных климатических сводок. Дополнительные данные с АМС, такие как скорость ветра на высоте установки осадкомера, температура воздуха, погода в срок наблюдения или высота снежного покрова, будут полезными для точной интерпретации и коррекции результатов измерений количества осадков с помощью автоматических осадкомеров.

6.5.1.3 ***Калибровка и техническое обслуживание***

Весовые плювиографы, как правило, имеют не много движущихся частей и поэтому не требуют частой калибровки. Калибровка обычно предусматривает использование разновесов, которые помещаются в контейнер или контейнер-накопитель и представляют собой заранее определенные эквиваленты количества осадков. Калибровка обычно должна проводиться в лаборатории согласно инструкциям завода-изготовителя.

В приложении 6.C приводится альтернативная процедура калибровки весовых плювиографов, применяемых для измерения интенсивности осадков. Эта калибровка, называемая динамической калибровкой в неизменных устойчивых условиях эталонной скорости потока, проводится для оценки погрешности измерений весовыми осадкомерами. Эта процедура также может использоваться для оценки динамического отклика весового осадкомера путем проведения классической проверки отклика прибора на ступенчатое воздействие с помощью сравнения прибора с эталонной скоростью потока, показывающего разовое скачкообразное изменение от нуля до скорости потока, эквивалентной дождевым осадкам. Кроме того, повторение динамической калибровки в неустойчивых условиях (меняющаяся со временем эталонная скорость потока для

имитации реальных природных явлений) позволяет более точно откалибровать весовые осадкомеры (особенно для определения систематической задержки, вызванной инерционностью прибора) и может привести к улучшению динамических рабочих характеристик и точности измерений в реальных условиях работы (Colli et al., 2013*b*).

Регулярное техническое обслуживание должно проводиться каждые 3 или 4 месяца в зависимости от условий выпадения осадков на осадкомерном посту. Необходимо обследовать осадкомер как снаружи, так и изнутри, на предмет незакрепленных или сломанных частей и проверки горизонтальности расположения прибора. Результаты любого ручного считывания показаний прибора должны сверяться с записью данных на сменном носителе на предмет сопоставимости до того, как запись будет удалена и аннотирована. Самоопорожняющийся контейнер или контейнер-накопитель должны быть опорожнены, обследованы, очищены, если требуется, и заправлены маслом для измерения только дождевых осадков либо антифризом и маслом, если ожидаются твердые осадки (см. 6.3.2). Регистрирующее устройство должно быть установлено на ноль с тем, чтобы максимально использовать диапазон измерений. Объем цифровой памяти, а также источник энергии должны быть проверены и при необходимости их следует заменить. Необходимо проверять периоды времени и даты, в которые производилась запись.

В рамках обслуживания и проверки прибора следует также проводить на регулярной основе надлежащую калибровку в полевых условиях и проверку калибровки или проверку в полевых условиях, принимая во внимание ограничения, накладываемые местом установки прибора и его рабочими характеристиками. Для измерения интенсивности дождевых осадков осадкомерами в приложении 6.E приводятся рекомендованные процедуры проверки с помощью портативного прибора с эталонной скоростью потока.

6.5.2 Плювиограф с самоопорожняющимся контейнером

Плювиограф с самоопорожняющимся контейнером пригоден для измерения общего количества накопленных осадков и интенсивности дождя. Следует применять подходящие поправки на интенсивность осадков (см. 6.5.2.2) для повышения точности измерения интенсивности и компенсирования занижения интенсивности в случае высокой интенсивности дождевых осадков и переоценки интенсивности в случае слабой интенсивности дождя; оба случая являются типичными примерами некорректных показаний плювиографа с самоопорожняющимся контейнером.

6.5.2.1 *Приборы*

Принцип действия такого прибора прост. Плювиограф с самоопорожняющимся контейнером использует металлический или пластиковый челнок, разделенный на два отделения, которые находятся в неустойчивом равновесии относительно горизонтальной оси для измерения поступающей в них воды в равновесных порциях. Когда один челнок наполняется водой, его центр массы оказывается вне центра вращения и баланс изменяется, в результате чего сливается собранная вода, и другой челнок приводится в положение для сбора осадков. Отделения челнока имеют такую форму, что вода вытекает из того из них, которое находится в данный момент ниже. Масса воды, содержащейся в челноке, является постоянной величиной (m (г)), поэтому используя плотность воды (ρ = 1 г/см^3), соответствующий объем (V (см^3)) определяется по весу воды и, следовательно, соответствующая высота (h (мм)) накопленной воды извлекается расчетами из используемой площади коллектора (S (см^2)). Уравнение:

$$V = m/\rho = h \cdot S \qquad (6.2)$$

Таким образом, используя плотность воды рассчитывается h, где 1 мм соответствует 1 г воды на площади 10 см^2. Для того чтобы иметь подробную запись измерения осадков, количество дождевых осадков не должно превышать 0,2 мм. Для площади осадкомера, равной 1 000 см^2, эта величина соответствует 20 г воды, содержащейся в челноке.

В плювиографах с самоопорожняющимся контейнером используется замыкание контакта (геркон или контакт реле), так что каждый наконечник генерирует электрический импульс в виде выходного сигнала. Этот выходной сигнал должен быть записан регистрирующим устройством или АЦП (система регистрации данных оснащена портами считывания геркона). Этот механизм обеспечивает непрерывное измерение без вмешательства человека.

Интенсивность дождевых осадков, получаемая с помощью плювиографа с самоопорожняющимся контейнером, рассчитывается по количеству замыканий контактов в течение периода пробоотбора (обычно 6 с или 10 с) и усредняется за выбранный интервал времени (например за 1 мин). Таким способом каждую минуту получается значение интенсивности осадков, которое представляет интенсивность за последнюю минуту или минуты. Эта схема пробоотбора уменьшает неопределенности усреднения. Кроме того, разрешение интенсивности дождевых осадков зависит от размера челнока и выбранного интервала времени. Например, опрокидываемый объем воды, равный 0,2 мм, соответствует при 1-минутном разрешении интенсивности дождевых осадков, равной 12 мм·ч$^{-1}$, что является постоянной величиной в пределах измерений осадкомером, если не применяются поправки в зависимости от интенсивности.

Для того, чтобы челнок наклонился и опрокинулся, необходимо небольшое, но определенное время, и во время первой половины этого движения в то отделение, в котором находится уже вычисленное количество осадков, может попасть еще какое-то их количество. Потери воды по время опрокидывания челнока указывают на систематическую механическую погрешность, которая в большей степени является функцией интенсивности осадков и может быть существенной во время сильного дождя (> 100 мм·ч$^{-1}$). Однако она может быть откорректирована путем использования процедуры калибровки, описанной в приложении 6.C, и применения кривой поправок или алгоритма (см. 6.4). Альтернативный метод состоит в использовании устройства, подобного сифону, у основания воронки для направления воды в челноки с контролируемой скоростью. Это сглаживает очень краткосрочные пики интенсивности. Можно также применить дополнительное устройство для ускорения наклона челнока: по существу, это маленькая лопасть, о которую ударяется вода, вытекающая из коллектора, что придает дополнительное ускорение наклоняющемуся челноку, изменяющееся по мере изменения интенсивности осадков.

Плювиограф с самоопорожняющимся контейнером особенно удобен для АМС, поскольку он легко приспосабливается к цифровым методам. Импульсы, вырабатываемые контактным устройством, могут прослеживаться с помощью регистратора данных, предпочтительно включающего регистрацию времени, когда произошло опрокидывание, для того чтобы рассчитать откорректированное значение интенсивности дождевых осадков, которое затем может быть использовано для исправления количества осадков за выбранный период. Он может также использоваться с ленточным самописцем.

6.5.2.2 ***Погрешности и поправки***

Поскольку источники погрешностей плювиографа с самоопорожняющимся контейнером несколько отличаются от источников погрешностей других плювиографов, рекомендуются специальные меры предосторожности и коррекции. Некоторые источники погрешностей перечислены ниже:

a) потери воды из челнока при его опрокидывании во время сильных осадков; они могут быть значительно уменьшены путем проведения динамической калибровки (см. приложение 6.C) и применения поправки на интенсивность дождя;

b) при обычной конструкции челнока открытая поверхность воды по отношению к объему довольно велика, поэтому возможны значительные потери из-за испарения, особенно в регионах с жарким климатом. Эта погрешность будет наиболее значительной во время слабого дождя;

c) прерывистый характер записи может не предоставить удовлетворительных данных во время слабой мороси или очень слабого дождя. В частности, невозможно точно определить время начала и конца выпадения осадков;

d) вода может прилипнуть к стенкам и к краю челнока, и в результате дополнительная масса укоротит время переворачивания. Испытания с вощеными челноками привели к сокращению на 4 % объемов, необходимых для переворачивания, по сравнению с невощеными челноками. Объемная калибровка может измениться без поворота калибровочных винтов ввиду изменения смачивания челнока под влиянием окисления поверхности или загрязнения примесями и изменения поверхностного натяжения;

e) поток воды, падающей из воронки в челнок, может вызвать изменение показаний в сторону увеличения в зависимости от размеров, формы и положения горловины;

f) прибор особенно подвержен погрешностям в связи с трением в подшипниках и нарушением равновесия челноков, обусловленным негоризонтальным положением прибора;

g) ограниченная повторяемость различной интенсивности дождевых осадков за интервал времени между опрокидываниями челнока ухудшает измерения вследствие низкой стабильности работы механических частей челнока (например движение челнока); это систематическое механическое воздействие может быть изучено с помощью определенных тестов, записывающих последовательность интервалов времени между опрокидываниями, что делает возможным оценить механическую точность работы челнока (см. Colli et al., 2013*b*). Такая погрешность может быть уменьшена за счет улучшения качества сборки осадкомера;

h) погрешность пробоотбора с помощью плювиографа с самоопорожняющимся контейнером (Habib et al., 2001) оказывает дополнительное сильное влияние на работу прибора в полевых условиях при режиме слабых дождевых осадков; эти погрешности выражаются в задержке срабатывания механизма самоопорожнения челнока при определении накопленного количества воды за соответствующий интервал времени; существуют различные методики расчета для уменьшения влияния погрешности пробоотбора и обеспечения измерений интенсивности дождя с более высоким разрешением, чем позволяет чувствительность плювиографа с самоопорожняющимся контейнером (см. Colli et al., 2013*a; Stagnaro et al., 2016*).

Тщательная калибровка может обеспечить коррекцию систематических частей этих погрешностей. Введенные поправки для улучшения измерений интенсивности дождевых осадков (WMO, 2009) и, следовательно, соответствующее накопленное количество воды выражаются в проведении динамической калибровки и применении кривой поправок (см. 6.4), например, путем применения коррекции с помощью программного обеспечения или алгоритма в системе усвоения данных. В качестве альтернативы они могут задействовать проведение процедуры спрямления в электронной цепи прибора (генерируя эмиссию экстра-импульсов в зависимости от интенсивности осадков) или посредством специального приспособления (например, небольших дефлекторов, стимулирующих динамическое давление, которое увеличивается с возрастанием интенсивности осадков, позволяя опрокидываться челноку до того, как он наполнится водой). В публикации (WMO, 2009) показано, что спрямление электронными экстра-импульсами хорошо подходит для измерения количества осадков и хуже для измерения интенсивности осадков. С другой стороны, механическое спрямление компенсирует потери воды во время движения балансира и существенно минимизирует недооценку интенсивности во время интенсивных осадков. Коррекция с помощью программного обеспечения (кривая поправок или алгоритм) является наиболее эффективным методом для корректировки систематических механических погрешностей. Эксплуатационные характеристики для полевых условий трех различных типов плювиографов с самоопорожняющимся контейнером: без коррекции, с коррекцией с помощью программного обеспечения и с дополнительной импульсной коррекцией в тропических условиях можно найти в работе Chan et al. (2015).

Результаты измерений с помощью плювиографов с самоопорожняющимся контейнером могут быть скорректированы с учетом воздействия факторов места их установки таким же способом, как и для других типов осадкомеров.

В холодное время года, особенно при измерении количества твердых осадков, могут использоваться обогревательные устройства. Однако характеристики подогреваемых плювиографов с самоопорожняющимся контейнером могут быть неудовлетворительными из-за больших погрешностей, обусловленных как ветром, так и испарением растапливаемого снега. Поэтому следует рассматривать другие типы приборов для использования при измерении количества зимних осадков в регионах, где температура опускается ниже 0 °C в течение длительных периодов времени. Однако эффект испарения можно свести к минимуму с помощью приборов с регулируемыми нагревательными элементами, которые поддерживают температуру критических частей немного выше температуры плавления воды.

6.5.2.3 *Калибровка и техническое обслуживание*

Калибровка плювиографа с самоопорожняющимся контейнером обычно выполняется путем пропускания через механизм опрокидывания известного количества воды с различной скоростью и регулирования механизма с учетом известного объема. Эта процедура должна проводиться в лабораторных условиях. Процедура калибровки, рекомендованная для таких плювиографов, описана в приложении 6.C.

В рамках обслуживания и проверки прибора следует также проводить на регулярной основе надлежащую полевую калибровку и проверку полевой калибровки или осмотр прибора в полевых условиях, принимая во внимание ограничения, накладываемые местом установки прибора и его рабочими характеристиками. Для измерения интенсивности дождевых осадков осадкомерами в приложении 6.E приводятся рекомендованные процедуры проверки с помощью портативного прибора с эталонной скоростью потока.

Ввиду большого числа источников ошибок, характеристики регистрации и калибровка плювиографов с самоопорожняющимися контейнерами представляют собой результат сложного взаимодействия многих параметров. Ежедневные сравнения с эталонным осадкомером могут дать полезные поправочные коэффициенты и являются хорошей практикой. Поправочные коэффициенты могут изменяться от станции к станции. В целом поправочные коэффициенты превышают 1,0 (заниженные показания) при малой интенсивности выпадения осадков и составляют менее 1,0 (завышенные показания) при их большой интенсивности. Зависимость между поправочным коэффициентом и интенсивностью является нелинейной и имеет форму кривой.

Регулярное техническое обслуживание должно включать в себя чистку воронки и челноков от накопившейся грязи и наносов, а также обеспечение горизонтального положения прибора. Весьма рекомендуется ежегодная замена механизма опрокидывания заново откалиброванным устройством. Необходимо проверять даты и периоды времени, в которые производилась запись.

6.5.3 **Поплавковый плювиограф**

В этом типе прибора жидкие осадки попадают в поплавковую камеру, в которой находится легкий поплавок. Когда уровень воды в камере повышается, вертикальное перемещение поплавка при помощи специального механизма приводит в работу перо, которое начинает двигаться по разграфленной бумажной ленте, или цифровое устройство. Можно использовать любой масштаб записи, если соответствующим образом отрегулировать размеры приемного отверстия коллектора, поплавка и поплавковой камеры.

Чтобы произвести запись за какой-либо выбранный период времени (обычно за 24 ч) необходимо иметь или очень большую поплавковую камеру (в этом случае получают сжатый масштаб записи на ленте или на другом средстве записи), или механизм для

быстрого автоматического слива жидкости из поплавковой камеры, как только она наполнится, для того чтобы перо или другой индикатор вернулись к началу отсчета. Для слива осадков обычно используется приспособление сифонного типа. Процесс слива воды следует начинать при точно установленном уровне так, чтобы вода не переливалась через край ни в начале, ни в конце процесса, который не должен занимать больше 15 секунд. В некоторых приборах поплавковая камера устанавливается на рычаге весов с помощью опорных призм для того, чтобы наполненная камера перевешивала; подъем воды облегчает процесс слива, и после того как камера опорожняется, она возвращается в первоначальное положение. Некоторые плювиографы имеют механизм принудительного слива, который позволяет производить его менее чем за 5 секунд. В плювиографе с принудительным сливом есть небольшая камера, отделенная от основной, в которой собираются жидкие осадки, выпадающие в момент слива. Вода из этой камеры поступает в основную камеру, когда прекращается слив, что гарантирует правильность записи общего количества жидких осадков.

Во избежание замерзания воды в поплавковой камере в зимний период в плювиографе должен устанавливаться обогревательный прибор (желательно, чтобы он регулировался термостатом). Это предотвратит порчу поплавка и поплавковой камеры и даст возможность регистрировать количество жидких осадков в зимний период. При наличии сети электропитания достаточно небольшого нагревательного элемента или маломощной электрической лампочки; в противном случае можно использовать другие источники питания. В этих целях удобно использовать короткую спираль, которая наматывается на коллектор и подсоединяется к батарее большой мощности. Количество подаваемого тепла не должно превышать минимума, необходимого только для того, чтобы предотвратить замерзание, так как подача излишнего тепла может понизить точность наблюдений, приводя к вертикальному перемещению воздуха над прибором и увеличению потерь за счет испарения.

В некоторых странах сообщается о существенном занижении показаний незащищенных обогреваемых плювиографов, обусловленном влиянием ветра и испарением растопленного снега, как это наблюдается и для весовых плювиографов (см. 6.5.1.2).

За исключением того, что калибровка выполняется с использованием известного объема воды, техническое обслуживание этого прибора аналогично обслуживанию весового плювиографа (см. 6.5.1.3).

6.5.4 Другие приборы для измерения осадков

С развитием технологий измерения с помощью электронных средств и интеллектуальных измерительных инструментов в последние годы были разработаны другие приборы для измерения осадков. Их эксплуатационные качества примерно такие же, как и у традиционных осадкомеров с самоопорожняющимся контейнером. Однако эти приборы обеспечивают измерения интенсивности дождя с более высоким разрешением по сравнению с классическими методами, начиная с 0,01 мм, и они особенно подходят для труднодоступных районов, поскольку требуют меньшего технического обслуживания. Эти приборы описаны в настоящем томе, глава 14.

6.6 ИЗМЕРЕНИЕ РОСЫ, ОТЛОЖЕНИЯ ЛЬДА И ОСАДКОВ В ВИДЕ ТУМАНА

6.6.1 Измерение росы и увлажненности листа

Выпадение росы — это явление, характерное в основном для ночного времени. Несмотря на то, что количество выпадающей росы относительно невелико и зависит от местности, это явление имеет немаловажное значение в аридных зонах. В очень засушливых районах оно может быть приравнено к дождю. Подверженность листьев деревьев влиянию

жидкой влаги в результате выпадения росы, тумана и осадков также играет важную роль в заболеваемости растений, деятельности насекомых-вредителей, а также для уборки и хранения урожая.

Для того чтобы оценить роль росы в гидрологии, необходимо различать источники ее образования:

a) нисходящий перенос атмосферной влаги, конденсирующейся на охлажденных поверхностях, известный как выпадение росы;

b) испарение из почвы и растений влаги, конденсирующейся на охлажденных поверхностях, и известной как дистиллированная роса;

c) выделение воды листьями, известное как гуттация.

Вообще говоря, количество осаждающейся росы складывается из этих трех источников, хотя только первый создает дополнительное увлажнение земной поверхности, а последний обычно сказывается на остаточных потерях. Другим источником влаги являются туман или облачные капельки, которые собираются на листьях и ветвях и падают на землю в виде капель или стекают непрерывной струей.

Количество росы, осевшей на данной поверхности за определенный период, обычно выражается в кг·м$^{-2}$ или в миллиметрах слоя росы. По мере возможности, значения этих величин должны определяться с точностью до одной десятой миллиметра.

Увлажненность листа можно описать как легкую, умеренную или сильную, но ее наиболее важными характеристиками являются время наступления и продолжительность.

Обзор приборов, предназначенных для измерения росы и продолжительности периода увлажненности листа, а также библиография по этому вопросу приведены в публикации WMO (1992*b*).

Рассмотрим следующие методы измерения увлажненности листа.

Количество росы критическим образом зависит от свойств и параметров поверхности, таких как радиационные свойства, размеры и расположение (горизонтальное или вертикальное). Для измерений используются определенным образом расположенные пластина или поверхность, естественные или искусственные, с известными или стандартизованными качествами, и количество росы оценивается посредством ее взвешивания, визуального наблюдения или использования некоторых ее свойств, например электрической проводимости. Проблема состоит в выборе поверхности, поскольку полученные результаты инструментальных измерений не всегда четко отражают осаждение росы на окружающих предметах. Следовательно, необходимо установить эмпирические соотношения между результатами инструментальных измерений и реальным осаждением росы на естественную поверхность для каждой отдельной совокупности условий, отражающих состояние поверхности и ее подверженность внешним воздействиям, с учетом того, в результате какого процесса образовалась роса, если это важно для конкретного применения.

Был разработан ряд приборов для прямого определения выпадения росы, ее количества, продолжительности периода увлажненности листа и наличия росы. В устройствах, регистрирующих продолжительность периода наличия росы, используются либо элементы, которые сами изменяются под воздействием росы таким образом, что становятся индикаторами влажности или регистраторами продолжительности влажного периода, либо электрические датчики, которые реагируют на изменение электропроводности естественных или искусственных листьев под воздействием влаги, будь то дождь, снег, туман с моросью или роса. В приборах, основанных на принципе взвешивания, количество влаги, осаждающееся в виде осадков или росы, взвешивается или регистрируется. Большинство приборов, обеспечивающих непрерывную

регистрацию в виде кривой, позволяют определить источник выпавшей влаги — туман, росу или дождь. Единственный известный метод измерения суммарного количества росы основан на использовании чувствительного лизиметра (см. настоящий том, глава 10).

В публикации WMO (1992*b*) два конкретных электронных прибора для измерения увлажненности листа рекомендуются для разработки в качестве эталонных приборов, а также предлагаются различные модели увлажнения листа. Одни модели основаны на принципе энергетического баланса (обратная модель испарения), другие используют корреляцию. Многие из них требуют микрометеорологических измерений. К сожалению, не существует признанного стандартного метода измерения, позволяющего произвести их проверку.

6.6.2 Измерение отложения льда

Лед может накапливаться на поверхностях в результате нескольких явлений. Отложение льда в результате замерзания осадков, часто называемое гололедом, является наиболее опасным типом обледенения и может вызвать обширные повреждения деревьев, кустарников, телефонных линий и линий электропередачи. Опасные условия создаются на дорогах и взлетно-посадочных полосах. Изморозь образуется в тех случаях, когда воздух с точкой росы ниже точки замерзания доводится до насыщения путем охлаждения. Изморозь кристаллическая представляет собой отложение сцепленных между собой ледяных кристаллов, образующихся путем прямого осаждения водяного пара, находящегося в воздухе, на предметах обычно небольшого диаметра, таких как ветви деревьев, стебли растений, края листьев, провода, столбы и т. д. Изморозь зернистая представляет собой гранулированные отложения льда белого или молочного цвета, образующиеся при быстром замерзании переохлажденных капель воды при их соприкосновении с открытыми предметами.

6.6.2.1 *Методы измерений*

На метеорологических станциях наблюдение за отложением льда, как правило, носит скорее качественный, чем количественный характер, главным образом ввиду отсутствия соответствующего датчика. Указатели нарастания льда обычно изготавливаются из анодированного алюминия и используются для наблюдения и сообщения о возникновении замерзающих осадков и гололедо-изморозевых отложений.

Наблюдения за отложением льда могут включать в себя как измерения размеров и массы отложения льда, так и описание его внешних свойств. Эти наблюдения особенно важны в горных районах, где величина таких отложений с наветренной стороны гор может превышать нормальное количество осадков. Для наблюдений за отложением льда может быть использовано приспособление, состоящее из стержней и стоек, на которых устанавливаются две пары параллельно расположенных проводов; одна пара располагается в направлении север-юг, другая — в направлении восток-запад. Провода можно подвесить на любом уровне, причем верхний провод каждой пары рекомендуется делать съемным. Во время проведения наблюдений оба верхних провода снимают, помещают в ванночку и вносят в теплое помещение для оттаивания и последующего взвешивания растаявшей пробы. Поперечное сечение отложения измеряется на постоянно закрепленных нижних проводах.

В некоторых странах для постоянной регистрации ледовых отложений используются записывающие устройства. В качестве датчика применяются вертикальный или горизонтальный стержень, кольцо или пластина. Увеличение количества ледовых отложений за какой-то период времени записывается на ленте. Для определения появления и продолжительности существования гололедо-изморозевых отложений применяется простой прибор, называемый ледоскопом. Ледоскоп состоит из круглого фанерного диска диаметром 30 см, который можно поднимать и опускать, устанавливая на любой высоте на вертикальной оси, вкопанной в землю. Обычно диск устанавливается на одном уровне с поверхностью снега для сбора изморози и инея. Изморозь также собирают

на кольце, закрепленном на стержне. Диаметр кольца составляет 20 см. Кольцо удалено на 20 см от верхнего конца стержня. Проволока или нить диаметром 0,2–0,3 мм, натянутая между кольцом и верхним концом стержня, используется для наблюдения изморозевых отложений. По мере необходимости каждый датчик может быть снят и взвешен.

В стандарте ИСО 12494:2017 (ISO, 2017), который применяется для определения нарастания льда на всех видах конструкций, за исключением проводов воздушной линии электропередач, стандартный прибор для измерения льда описывается следующим образом:

a) гладкий цилиндр диаметром 30 мм, установленный на вертикальную ось и вращающийся вокруг этой оси. Высота цилиндра должна быть минимум 0,5 м, но если ожидается сильное нарастание льда, высоту цилиндра следует увеличить до 1 м;

b) цилиндр устанавливается на высоте 10 м над землей;

c) регистрация величин веса льда может выполняться автоматически.

В работе Fikke et al. (2007) описываются несколько типов детекторов льда, некоторые из которых используются для определения начала и окончания периода нарастания льда, в то время как другие могут также давать количественные характеристики скорости нарастания льда (обычно выражается в кг·м$^{-2}$·ч$^{-1}$). Многие датчики основаны на принципе измерения массы льда на вертикальной трубке, используемой в качестве цели для отложения льда. Оптический датчик (ИК луч) определяет изменения в отражающей способности поверхности целевой трубки, когда она покрывается льдом. Другой датчик, широко используемый для определения переохлажденного дождя, включает в себя вибрирующую насадку. Нарастание льда на этой насадке меняет частоту вибрации, что позволяет как определить условия обледенения, так и оценить скорость нарастания льда. Встроенный в насадку нагреватель применяется для плавления льда и поддержания датчика в рабочем состоянии.

6.6.2.2 ***Лед на дорожном покрытии***

Разработаны и используются датчики для обнаружения и описания льда на дорогах и взлетно-посадочных полосах; они используются также для обоснования выпуска штормовых предупреждений и технического обслуживания. Более подробная информация по этому вопросу представлена в томе III, глава 10 настоящего Руководства.

Сочетание различных измерений позволяет обнаружить сухой и влажный снег и различные формы льда. Один датчик, в котором используются два электрода, утопленные заподлицо в дорожное покрытие, измеряет электрическую проводимость поверхности и позволяет легко различить сухую и влажную поверхности. Второй датчик измеряет поляризацию ионов, определяемую способностью поверхности удерживать электрический заряд; небольшой заряд пропускается между парой электродов в течение короткого времени, и те же самые электроды измеряют остаточный заряд, величина которого возрастает при наличии на поверхности электролита со свободными ионами, такого как подсоленная вода. Поляризация и проводимость, измеренные одновременно, позволяют различать сухую, влажную и мокрую поверхности, изморозь, снег, белый лед и некоторые химические вещества, использующиеся против обледенения. Однако в связи с тем, что по поляризуемости некристаллизованный черный лед отличить от воды в некоторых условиях практически невозможно, определить наличие опасного черного льда с помощью этих двух датчиков до сих пор не представляется возможным. Эта проблема решена, по крайней мере, в одной системе путем добавления третьего специализированного измерения электрической емкости, которое позволяет обнаруживать уникальную структуру черного льда.

Вышеуказанный метод является пассивным. Существует и активный метод измерений *in situ* с использованием либо нагревательного элемента, либо нагревательного и охлаждающего элементов для растапливания или замораживания любого льда или жидкости,

присутствующих на поверхности. Одновременные измерения температуры и тепловой энергии, участвующих в цикле таяние — замораживание, используются для определения наличия льда и для оценки точки замерзания смеси на поверхности.

Большинство систем измерения *in situ* включают в себя термометр для измерения температуры поверхности дороги. Качество измерения критическим образом зависит от установки (особенно от материалов) и размещения приборов, и следует принимать меры во избежание ошибок, связанных с солнечной радиацией.

В стадии разработки находятся два метода дистанционного измерения, при использовании которых возможна установка датчиков на автомобиле. Один основан на отражении ИК и микроволнового излучения на некоторых частотах (около 3 000 нм и 3 ГГц соответственно). С помощью микроволнового отражения можно определить толщину слоя воды (и, следовательно, риск потери сцепления с дорогой), но не условия обледенения. Чтобы распознать, в каком состоянии дорога — сухая, влажная или покрыта льдом — могут использоваться две частоты ИК диапазона. Продемонстрирована также зависимость величины отраженного сигнала на длине волны около 2 000 нм от толщины слоя льда.

Во втором методе применяется методика распознавания характеристик по отражению лазерного излучения от дорожного покрытия с целью проведения различия между сухой и влажной поверхностью и черным льдом.

6.6.3 Измерение осадков в виде тумана

Туман состоит из мельчайших капелек воды, взвешенных в атмосфере и формирующих облако у поверхности Земли. Диаметр капель тумана составляет примерно от 1 до 40 мкм и скорость падения от менее чем 1 см·с$^{-1}$ до приблизительно 5 см·с$^{-1}$. На самом деле скорость падения капель тумана настолько мала, что даже при слабом ветре капли перемещаются почти горизонтально. При наличии тумана горизонтальная видимость составляет менее 1 км, и он редко наблюдается, когда температура и точка росы различаются более чем на 2 °C.

Метеорологи, как правило, рассматривают туман как источник ухудшения видимости, а не как форму осадков. Однако, в возвышенных районах, покрытых лесом, часто наблюдается туман в результате адвекции облаков над поверхностью гор. С гидрологической точки зрения в этих случаях рассмотрение осадков без учета тумана может привести к значительной недооценке количества воды, пополняющей водосбор (Stadtmuller and Agudelo, 1990). Позднее признание тумана в качестве источника водоснабжения в районах плоскогорий (Schemenauer and Cereceda, 1994*a*) и канала влажных выпадений (Schemenauer and Cereceda, 1991; Vong et al., 1991) привело к необходимости стандартизации методов и единиц измерения. Рассмотрим несколько методов измерения осадков в виде тумана.

Несмотря на то, что за прошедшее столетие проводилось большое число измерений сбора тумана деревьями и различными типами коллекторов, сравнить величины такого сбора в количественном отношении трудно. Наиболее широко используемый прибор для измерения тумана представляет собой вертикально расположенный цилиндр из проволочной сетки, центр которого укреплен поверх осадкомера таким образом, что он полностью открыт для свободного потока воздуха. Диаметр цилиндра составляет 10 см, высота — 22 см, а размеры ячеек сетки — 0,2 x 0,2 см (Grunow, 1960). Капли из воздуха, насыщенного влагой, осаждаются на сетке и падают вниз, в коллектор осадкомера, где они измеряются или регистрируются таким же образом, как осадки. Некоторые трудности, связанные с этим прибором, заключаются в его малых размерах, отсутствии репрезентативности по отношению к растительному покрову, удержании воды в небольших ячейках сетки и возможности попадания осадков непосредственно в осадкомер, что вносит путаницу в измерение осаждения частиц тумана. Кроме того, расчет количества осадков в виде тумана путем простого вычитания количества дождевых

осадков, накопленного в обычном осадкомере (Grunow, 1963), из количества влаги, накопленной в коллекторе тумана, приводит к ошибочным результатам всякий раз, когда наблюдается ветер.

В работе Schemenauer and Cereceda (1994*b*) предложены недорогой стандартный коллектор тумана площадью 1 м^2 и стандартная единица измерения для количественного определения осаждения частиц тумана, имеющего важное значение в возвышенных районах, покрытых лесом, и для измерения потенциальных объемов сбора в лишенных растительности или пустынных горных районах. Коллектор состоит из плоской панели, изготовленной из ячеек прочного полипропилена, и установлен так, что его основание находится на высоте 2 м над землей. Коллектор соединен с плювиографом с самоопорожняющимся контейнером для определения скорости осаждения. Измерения скорости ветра, проводимые одновременно с измерениями тумана, позволяют получить достоверные оценки соотношения тумана и дождя, выпадающих на вертикальную ячеистую панель. Этот коллектор собирает литры воды. Поскольку площадь его поверхности составляет 1 м^2, единицей измерения является 1 л·м$^{-2}$.

ПРИЛОЖЕНИЕ 6.A. СТАНДАРТНЫЙ ЭТАЛОННЫЙ ОСАДКОМЕР ЯМОЧНОГО ТИПА

Эталонный осадкомер устанавливается в яму с хорошей дренажной системой в соответствии с конструкцией и спецификацией, описанной в стандарте EN-13798:2010 (CEN, 2010) для сведения к минимуму влияния окружающей среды на измеренную интенсивность дождевых осадков и защиты от забрызгивания с помощью металлической или пластиковой решетки. Ожидается, что прикопанный или утопленный осадкомер (см. Koschmider, 1934, Sieck et al., 2007) показывает более высокие значения дождевых осадков, чем прибор, установленный над землей, с возможной разницей в 10 % или более, когда оба прибора работают идеально и точно. Решетки предпочтительно устанавливать на уровне земли для того, чтобы избежать поверхностного стока воды (см. общую конфигурацию на рисунке 6.A.1). Яма должна быть достаточной глубины, чтобы вместить в себя осадкомер и выровнять коллектор осадкомера на одном уровне с решеткой (уровень земли) и разместить прибор по центру ямы. Форма ямы должна учитывать размеры осадкомера и метод установки прибора. В основании ямы делается углубление (дополнительная яма) для сбора дренажной воды и ее отвода из ямы. Квадратная ячейка решетки также подбирается в соответствии с диаметром коллектора осадкомера для того, чтобы удовлетворять стандартным требованиям, изложенным в стандарте CEN (2010). Стенки ямы укрепляются кирпичами с раствором для укрепления и предотвращения обрушения стенок. Поддерживающие стенки располагаются по краям решетки размером приблизительно 1 875 x 1 875 x 120 мм (Д x Ш x В), которая устанавливается на стенки ямы с возможностью снятия решетки для доступа к осадкомеру с целью проверки работы и обслуживания прибора. Сторона ячейки решетки составляет приблизительно 120–125 мм. Решетка должна быть достаточно прочной, чтобы по ней можно было ходить и она при этом сохраняла свою форму без деформаций. Для предотвращения разбрызгивания капель дождя на поверхности решетки толщина полос, которые образуют решетку, составляет 2 мм, а расстояние между краем центрального квадрата и землей должна быть более 600 мм (более подробная информация приводится в CEN (2010)). На рисунке 6.A.2 представлен пример установки четырех стандартных эталонных осадкомеров ямочного типа, описанных в публикации WMO (2009).

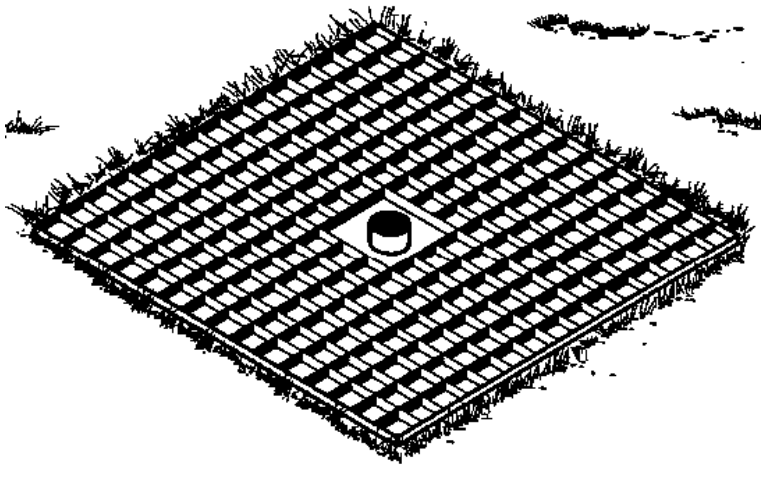


Рисунок 6.A.1. Осадкомер ямочного типа и его решетка (вариант установки на уровне земли)

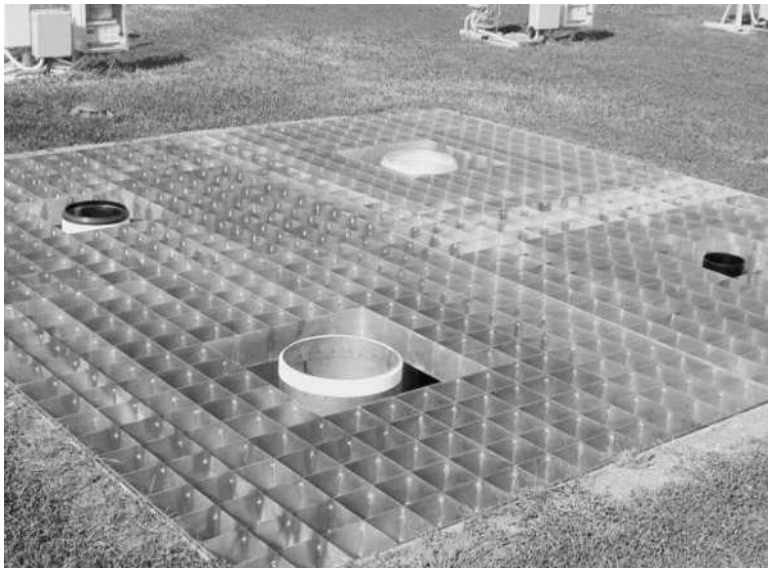


Рисунок 6.A.2. Установка эталонных осадкомеров ямочного типа на станции Винья-ди-Валле, Италия (2007 г.) во время проведения ВМО полевых взаимных сравнений измерений интенсивности осадков

ПРИЛОЖЕНИЕ 6.B. СТАНЦИИ ПРОВЕДЕНИЯ ВЗАИМНЫХ СРАВНЕНИЙ ИЗМЕРЕНИЙ ОСАДКОВ

Нижеследующий текст о станциях для взаимных сравнений измерения осадков подготовлен с учетом заявлений, сделанных КПМН на ее одиннадцатой сессии, состоявшейся в 1994 г., и он был обновлен с учетом решений ее пятнадцатой сессии в 2010 г.:

Комиссия подтвердила преимущества существования национальных станций или центров, в которых могут быть оценены на современной основе прошлые, современные и будущие приборы и методы наблюдения за осадками. Эти станции должны:

a) эксплуатировать рекомендованные ВМО конфигурации измерительных устройств для жидких осадков (эталонный наземный осадкомер ямочного типа) и для снега DFIR. Установка и эксплуатация будут производиться в соответствии со спецификациями, полученными по результатам взаимных сравнений измерений осадков, проводимых по линии ВМО. Установка DFIR не требуется, когда ведутся наблюдения только за жидкими осадками;

b) эксплуатировать оперативные осадкомеры, использовавшиеся в прошлом, существующих и новых типов или применять другие методы наблюдений в соответствии со стандартными оперативными процедурами (СОП) и оценивать точность и технические характеристики в сравнении с рекомендованными эталонными приборами ВМО;

c) проводить вспомогательные метеорологические измерения, которые дают возможность разработки и проверки применения процедур коррекции осадков;

d) обеспечивать контроль качества (КК) данных, помещать в архив в простом приемлемом формате, предпочтительно цифровом, все данные взаимных сравнений измерений осадков, включая связанные с ними данные метеорологических наблюдений и метаданные;

e) функционировать непрерывно как минимум 10 лет;

f) производить проверку всех имеющихся процедур коррекции осадков (в особенности тех, которые описаны в окончательных отчетах о взаимных сравнениях, проводимых по линии ВМО) для измерений жидких и твердых осадков;

g) содействовать проведению научных исследований в области измерения осадков. Не ожидается, что центры будут осуществлять калибровку или проверку приборов. Они должны готовить рекомендации о национальных стандартах наблюдений и оценивать влияние изменений методов наблюдений на однородность временных рядов данных по осадкам в регионе. На месте проведения наблюдений должно быть обеспечено наличие эталонного стандарта для калибровки и валидации наблюдений осадков, проводимых с помощью радиолокаторов или дистанционного зондирования.

ПРИЛОЖЕНИЕ 6.C. СТАНДАРТИЗИРОВАННАЯ ПРОЦЕДУРА ДЛЯ ЛАБОРАТОРНОЙ КАЛИБРОВКИ ПРИБОРОВ НАКОПИТЕЛЬНОГО ТИПА, ИЗМЕРЯЮЩИХ ИНТЕНСИВНОСТЬ ДОЖДЯ

1. **Принципы**

Лаборатория калибровки должна быть хорошо подготовлена для проведения калибровки приборов, которые используются для оперативной работы. Помимо наличия правильно разработанной эталонной системы, перед началом каждой калибровки все процедуры калибровки должны быть документально оформлены со всеми подробностями и хорошо отработаны, а персонал должен быть хорошо подготовлен перед началом поверочных работ (см. подробную информацию в стандарте ИСО/МЭК 17025 (ISO/IEC, 2017)). Результаты каждой калибровки должно быть оформлены свидетельством о проведении калибровки с описанием результатов (включая описание применявшихся поправок), что позволяет провести проверку на соответствие рекомендациям ВМО.

В свидетельстве также должна быть указана неопределенность измерения для интенсивности дождя. В свидетельстве должны быть документально оформлены результаты сопоставления с эталонной системой измерения интенсивности дождя, условия окружающей среды (такие как температура) и указан применявшийся метод осреднения по времени.

Калибровку приборов для измерения интенсивности дождя следует производить, используя систему калибровки, которая:

a) может создавать постоянную интенсивность поступления воды при разных уровнях интенсивности, охватывающих весь рабочий диапазон измерения интенсивности дождя (рекомендованный диапазон: от 0,2 мм·ч$^{-1}$ до 2 000 мм·ч$^{-1}$);

b) может измерять поток воды посредством взвешивания количества воды, поступившей за определенный период времени;

c) может производить измерение выходного сигнала откалиброванного прибора через регулярные промежутки времени или при возникновении сигнального импульса, что характерно для большинства осадкомеров с самоопорожняющимся контейнером.

2. **Требования**

a) Система калибровки должна обеспечивать получение неопределенностей менее 1 % для генерируемой интенсивности дождя, и такую работу системы следует подробно детализировать и описать;

b) при использовании осадкомеров с самоопорожняющимся контейнером следует проконтролировать точность и соответствие требованиям к балансировке челнока, чтобы обеспечить минимальные расхождения в длительности опрокидывания во время процесса измерения;

c) следует использовать, по крайней мере, пять контрольных уровней интенсивности с надлежащими интервалами между ними, чтобы охватить весь рабочий диапазон прибора;

d) количество контрольных точек для измерения интенсивности дождя должно быть достаточно большим, чтобы посредством интерполяции по точкам можно было построить кривую. Следует выбрать контрольные точки и расположить их на достаточном расстоянии друг от друга, позволяющем посредством интерполяции построить калибровочную кривую таким образом, чтобы неопределенность кривой, построенной по точкам, была ниже неопределенности, предусмотренной для всего диапазона измерений;

e) расчет интенсивности поступления воды основывается на измерении массы поступившей воды и времени;

f) измерение массы должно быть с точностью выше чем 0,1 %;

g) каждое испытание должно быть достаточно продолжительным, чтобы гарантировать при созданной интенсивности неопределенность менее 1 %;

h) максимальное временное разрешение для измерения интенсивности дождя должно составлять 1 с;

i) при осуществлении связанной с калибровкой лабораторной деятельности, рассматривая возможные источники ошибок, следует учесть следующее:

    i) качество/степень чистоты воды, используемой для калибровки, должно быть строго определенным;

    ii) воспроизводимость условий калибровки следует выделить в качестве приоритета;

    iii) следует использовать надлежащее оборудование для контроля и записывания (управляемое с помощью персонального компьютера);

    iv) все приемные системы должны удовлетворять требованиям электромагнитной совместимости во избежание паразитических импульсов;

j) обычно при измерении количества осадков говорится о высоте слоя осадков, выраженной в миллиметрах, хотя весовые осадкомеры измеряют массу. Так как интенсивность дождя зависит от температуры окружающей среды, связь между массой и эквивалентной высотой слоя дождя вносит неточность, которую следует принимать во внимание при калибровке и расчете неопределенности;

k) условия окружающей среды во время каждой калибровки должны быть отмечены и зарегистрированы:

    i) дата и время (начало/завершение);

    ii) температура воздуха (°C);

    iii) температура воды (°C);

    iv) атмосферное давление (гПа);

    v) относительная влажность окружающей среды (%);

    vi) какие-либо особые условия, касающиеся калибровки (например, вибрация);

    vii) необходимо оценить потери, связанные с испарением (мм);

l) количество испытаний, проведенных для каждого прибора, их описание в единицах времени и/или количество опрокидываний должны быть документально оформлены.

3. **Процедура интерпретации данных**

a) Результаты должны быть представлены в форме графика, где относительная погрешность наносится против значения контрольного уровня интенсивности. Для каждой контрольной скорости потока относительная погрешность оценивается как:

$$e = \frac{I_m - I_r}{I_r} \cdot 100\ \%$$

где I_m — интенсивность, измеренная прибором, и I_r — фактический контрольный уровень интенсивности, обеспечиваемый прибором;

b) для каждого ряда контрольных уровней интенсивности следует провести по возможности пять испытаний, но минимально три, так чтобы для каждого прибора было получено пять значений погрешности. Среднее значение погрешности и средние значения I_r и I_m рассчитываются посредством отбрасывания минимального и максимального значений e, полученных для каждого контрольного уровня интенсивности поступления воды, и последующего определения среднего арифметического трех оставшихся значений погрешности и значений контрольных уровней интенсивности. Для каждого уровня интенсивности следует представить диаграмму погрешностей, включающую все пять значений погрешности, использованные для определения средних значений;

c) кроме того, можно построить график зависимости между I_r и I_m, где I_r и I_m — средние значения, рассчитанные как указано выше; все данные согласовываются с кривой интерполяции, полученной в качестве наилучшего приближения (допустимо использование линейного приближения, экспоненциального закона или полинома второго порядка);

d) на графиках, представляющих результаты, должны быть нанесены ограничения ±5 %, которые позволяют легко сравнить результаты с рекомендациями ВМО;

e) если происходит накопление воды при интенсивности ниже максимального заявленного уровня интенсивности, то следует отметить уровень интенсивности, с которого началось накопление воды, в свидетельстве о проведении калибровки и рассмотреть уровни интенсивности, превышающие этот уровень;

f) в дополнение к измерениям, основанным на постоянной скорости потока воды, для каждого прибора, не являющегося осадкомером с самоопорожняющимся контейнером, следует измерить отклик на ступенчатое воздействие. Отклик на ступенчатое воздействие следует измерять посредством перехода от одного уровня постоянной интенсивности потока к другому и обратно, а именно от 0 мм·ч$^{-1}$ к контрольному уровню и обратно к 0 мм·ч$^{-1}$. Уровень постоянной интенсивности потока следует использовать до тех пор, пока выходной сигнал прибора не стабилизируется, т. е. когда дальнейшие изменения или колебания в созданном уровне интенсивности дождя можно не учитывать по отношению к установленной неопределенности измерений с помощью эталонной системы. Частота замеров должна быть не менее одного в минуту для приборов, которые позволяют такую частоту. Время до стабилизации принимается в качестве времени задержки прибора в измерении контрольного уровня интенсивности. Для обеспечения точных измерений интенсивности дождя время задержки должно составлять менее одной минуты. Время отклика всегда должно быть документально зафиксировано в свидетельстве о проведении калибровки.

4. **Расчет неопределенности**

Следует учесть и представить в количественной форме следующие источники неопределенности в измерениях:

a) механизм формирования потока воды: неопределенность в равномерности поступления воды, вызванная возможными изменениями в механизме формирования постоянной интенсивности потока воды, включая разницу в давлении внутри емкости для воды и в распределительных трубках;

b) приборы для измерения потока воды (как эталонный, так и тот, калибровка которого производится): неопределенность, связанная с весовым прибором, временем измерения, задержками в получении и обработке данных и изменениями в экспериментальных и внешних условиях, таких как температура и относительная влажность.

Два этих источника неопределенности не зависят друг от друга, следовательно, можно провести их независимый анализ, а затем объединить результаты.

ПРИЛОЖЕНИЕ 6.D. ПРЕДЛОЖЕННЫЕ ПРОЦЕДУРЫ КОРРЕКЦИИ ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЙ ОСАДКОВ

Нижеследующий текст относительно процедур коррекции, применяемых при измерении осадков, подготовлен с учетом заявлений, сделанных КПМН на ее одиннадцатой сессии, состоявшейся в 1994 г.

Методы коррекции основаны на упрощенных физических концепциях, представленных в публикации ВМО (1987 г.). Они зависят от типа применяемого датчика измерения осадков. Влияние ветра на осадкомер конкретного типа было оценено с использованием сравнительных измерений, проведенных с помощью эталонных осадкомеров ВМО – наземного осадкомера для дождя и DFIR для снега, описанных в публикации WMO (1984), и по результатам взаимных сравнений измерений твердых осадков, проводившихся по линии ВМО (WMO, 1998). Приведение скорости ветра к уровню приемного отверстия осадкомера следует осуществлять по следующей формуле:

$$u_{hp} = \left(\log hz_0^{-1}\right) \cdot \left(\log Hz_0^{-1}\right)^{-1} \cdot \left(1 - 0,024\alpha\right) u_H$$

где u_{hp} — скорость ветра на уровне приемного отверстия осадкомера; h — высота приемного устройства осадкомера над поверхностью земли; z_0 — параметр шероховатости (0,01 м для зимы и 0,03 м для лета); H — высота установки прибора для измерения скорости ветра над поверхностью земли; U_H — скорость ветра, измеренная на высоте H над поверхностью земли; α — средняя угловая высота препятствий вокруг осадкомера.

Последний параметр зависит от степени защищенности места расположения осадкомера и может быть получен либо по среднему значению прямых измерений угловой высоты препятствий (в градусах круга) в одном из восьми направлений розы ветров вокруг осадкомера, либо на основе классификации степени защищенности с использованием метаданных, которые хранятся в архивах НМГС. Имеются следующие классы:

Класс	*Угол*	*Описание*
Открытое место наблюдений	0–5	Несколько малых препятствий, таких как кусты, группы деревьев, отдельный дом
Полузащищенное место наблюдений	6–12	Небольшие группы деревьев или кустов, либо один-два дома
В основном защищенное место наблюдений	13–19	Парки, лесные опушки, центры деревень, фермы, группы домов, дворы
Защищенное место наблюдений	20–26	Молодой лес, небольшая лесная поляна, парк с большими деревьями, центры городов, глубокие закрытые долины, сильно пересеченная местность, подветренные склоны больших холмов

Потери на смачивание происходят при увлажнении внутренних стенок осадкомера. Они зависят от формы и материала осадкомера, а также от типа и частоты выпадения осадков. Например, для осадкомера Хеллмана они составляют в среднем 0,3 мм в сутки при дожде или 0,15 мм в сутки при выпадении снега; соответствующие значения для осадкомера Третьякова составляют 0,2 и 0,1 мм. Информацию по поводу потерь на смачивание для других типов осадкомеров можно найти в публикации WMO (1982).

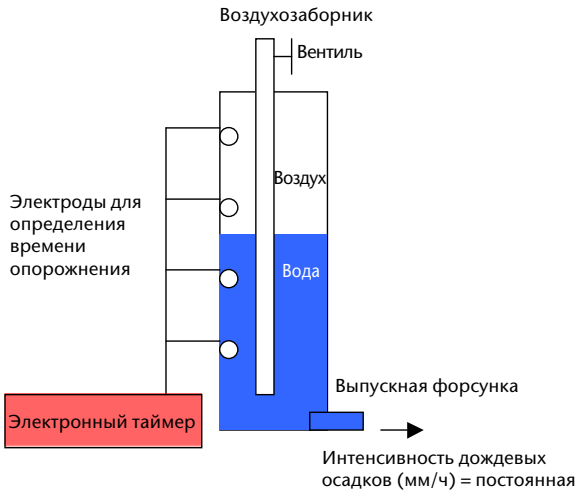
ПРИЛОЖЕНИЕ 6.E. ПРОЦЕДУРА ДЛЯ КАЛИБРОВКИ В ПОЛЕВЫХ УСЛОВИЯХ ПРИБОРОВ НАКОПИТЕЛЬНОГО ТИПА, ИЗМЕРЯЮЩИХ ИНТЕНСИВНОСТЬ ДОЖДЯ

Калибровка в полевых условиях является частью обычного обслуживания и проверки в полевых условиях, и она должна выполняться на регулярной основе. Ее главной целью является проверка рабочего состояния осадкомера: определить неисправности, отклонения в выходных данных, смещение характеристик прибора со временем или между лабораторными калибровками. Калибровка в полевых условиях предоставляет также полезные важные сведения для анализа данных и их интерпретации. Процедура основывается на тех же принципах, что и для лабораторной калибровки (приводится в приложении 6.C), с использованием генерирования постоянной интенсивности (неизменный эталонный поток) в пределах рабочего диапазона прибора.

Установка для калибровки в полевых условиях обычно состоит из цилиндрического резервуара достаточной емкости с водой; комбинации из воздухозаборника и выпускной форсунки для различной интенсивности дождевых осадков и электронной системы для расчета времени опорожнения (см. рисунок ниже). Подходящая комбинация воздухозаборника и выпускной форсунки должна подбираться на основе учета размера коллектора осадкомера и значения интенсивности, выбранного для калибровки. Путем открывания верхнего вентиля и форсунки на дне резервуара подается постоянный поток воды в сифон осадкомера, и, зная время опорожнения, с помощью таблицы соотношений (объем-время-интенсивность) можно высчитать эталонную интенсивность. Воздухозаборник обеспечивает компенсацию давления и таким образом поддерживается постоянный напор воды.

С точки зрения оперативной работы портативная полевая установка для калибровки позволяет быстро провести проверку благодаря очень простому принципу работы установки. Установка для калибровки не содержит каких-либо сложных компонентов и поэтому предоставляет самое экономичное решение для метрологической верификации интенсивности потока, измеряемого осадкомером.

Воспроизводимость результатов работы полевой установки для калибровки (и ее точность) следует неукоснительно подвергать проверке в лабораторных условиях перед тем, как использовать ее в работе. Неопределенность предпочтительно следует выражать как относительную расширенную неопределенность по отношению к статистическому интервалу охвата (95 % уровень доверительной вероятности, $k = 2$), и она должна быть менее 2 %.



Упрощенная схема работы портативной полевой установки для калибровки.

Статистический анализ относительных погрешностей применительно к полевому эталонному потоку установки для калибровки следует проводить для каждого осадкомера, откалиброванного в полевых условиях. Следует зарегистрировать минимум 25–30 измерительных точек (обычно 1 мин значение интенсивности в мм·ч$^{-1}$) для каждой эталонной интенсивности (выбранной полевым калибровочным инструментом). Это дает возможность допустить нормальное распределение данных вокруг осредненного значения, лучше оценить среднюю величину и повысить точность результатов (центральная предельная теорема). Все поверки должны выполняться в условиях окружающей среды без осадков или тумана и при слабом ветре (чтобы избежать возмущения потока в результате динамического напора на воздушную впускную форсунку). Эталонная интенсивность всегда должна быть в начале минуты, синхронизированной с часами прибора или регистратора времени (время-штемпель должностного лица/станции).

Минимальный набор статистических параметров и метаданных, регистрируемых после каждой калибровки в полевых условиях, приводится ниже:

a) дата и время;

b) эталонная интенсивность в мм·ч$^{-1}$ (I_{ref}): постоянная интенсивность, генерируемая полевой установкой для калибровки;

c) средние ($avgI$) значения интенсивности ($I_{1\text{min}}$) в мм·ч$^{-1}$ осадкомера во время проведения калибровки, рассчитанные по следующей формуле:

$$avgI = \frac{1}{N}\sum_{j=1}^{N}\left(I_{1\text{min}}^{j}\right) \tag{6.E.1}$$

d) экстремальные значения (а именно $I_{+\text{CL95 \%}}$, $I_{-\text{CL95 \%}}$) интервала [$avgI - \delta$ (95 %); $avgI + \delta$ (95 %)] = [$I_{+\text{CL95 \%}}$; $I_{-\text{CL95 \%}}$], соответствующие 95 % уровню доверительной вероятности. Амплитуда δ (95 %) равна половине центрального доверительного интервала, рассчитанного в соответствии с нормальным распределением вероятности или распределением вероятности Стьюдента t на основе выборки (она включает в себя расчет среднеквадратического отклонения);

e) относительная погрешность в процентах средней интенсивности, рассчитанная как указано ниже:

$$RE_{avgI} = 100 \cdot \left(\frac{avgI - I_{\text{ref}}}{I_{\text{ref}}}\right) \tag{6.E.2}$$

f) относительные погрешности в процентах $I_{+\text{CL95 \%}}$ и $I_{-\text{CL95 \%}}$, рассчитанные по формуле:

$$RE_{+CL95\,\%} = 100 \cdot \left(\frac{I_{+CL95\,\%} - I_{\text{ref}}}{I_{\text{ref}}}\right) \tag{6.E.3}$$

$$RE_{-CL95\,\%} = 100 \cdot \left(\frac{I_{-CL95\,\%} - I_{\text{ref}}}{I_{\text{ref}}}\right) \tag{6.E.4}$$

Последние три статистических параметра используются для расчета относительных погрешностей осадкомера в отношении интенсивности с интервалом неопределенности 95 % уровня доверительной вероятности для каждой эталонной интенсивности, используемой в течение калибровки. Регулярная повторяемость калибровки в полевых условиях и сравнение результатов позволяют оценить стабильность результатов калибровки и возможные аномалии.

СПРАВОЧНАЯ И ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ЛИТЕРАТУРА

Всемирная метеорологическая организация, 2008: *Руководство по гидрологической практике* (ВМО-№ 168), том I. Женева.

Chan, Y.W., C.L. Yu and K.H. Tam, 2015: Inter-comparison of raingauges on rainfall amount and intensity measurements in a tropical environment. *Journal of Geodesy and Geomatics Engineering*, 1:12–25.

Colli, M., L.G. Lanza and P.W. Chan, 2013*a*: Co-located tipping-bucket and optical drop counter RI measurements and a simulated correction algorithm. *Atmospheric Research*, 119:3–12.

Colli, M., L.G. Lanza and P. La Barbera, 2013*b*: Performance of a weighing rain gauge under laboratory simulated time-varying reference rainfall rates. *Atmospheric Research*, 131:3–12.

European Committee for Standardization (CEN), 2010: *Hydrometry – Specification for a Reference Raingauge Pit*, EN 13798:2010.

Fikke, S., G. Ronsten, A. Heimo, S. Kunz, M. Ostrozlik, P.E. Persson, J. Sabata, B. Wareing, B. Wichura, J. Chum, T. Laakso, K. Säntti and L. Makkonen, 2007: *COST-727: Atmospheric Icing on Structures; Measurements and data collection on icing: State of the Art*, MeteoSwiss, No. 75.

Goodison, B.E., J.R. Metcalfe, R.A. Wilson and K. Jones, 1988: The Canadian automatic snow depth sensor: A performance update. *Proceedings of the Fifty-sixth Annual Western Snow Conference*, Atmospheric Environment Service, Canada, pp. 178–181.

Goodison, B.E., B. Sevruk and S. Klemm, 1989: WMO solid precipitation measurement intercomparison: Objectives, methodology and analysis. In: International Association of Hydrological Sciences, 1989: *Atmospheric deposition. Proceedings*, Baltimore Symposium (May, 1989), IAHS Publication No. 179, Wallingford.

Grunow, J., 1960: The productiveness of fog precipitation in relation to the cloud droplet spectrum. In: American Geophysical Union, 1960, *Physics of precipitation*. Geophysical Monograph No. 5, *Proceedings of the Cloud Physics Conference* (3–5 June 1959, Woods Hole, Massachusetts), Publication No. 746, pp. 110–117.

———, 1963: *Weltweite Messungen des Nebelniederschlags nach der Hohenpeissenberger Methode*. In: International Union of Geodesy and Geophysics, General Assembly (Berkeley, California, 19–31 August 1963), International Association of Scientific Hydrology Publication No. 65, pp. 324–342.

Habib, E., W.F. Krajewski and A. Kruger, 2001: Sampling errors of tipping-bucket rain gauge measurements. *Journal of Hydrologic Engineering*, 6:159–166.

International Organization for Standardization, 2017: *Atmospheric Icing of Structures*, ISO 12494:2017. Geneva.

International Organization for Standardization/International Electrotechnical Commission, 2017: *General Requirements for the Competence of Testing and Calibration Laboratories*, ISO/IEC 17025:2017. Geneva.

Koschmieder, H., 1934: Methods and results of definite rain measurements; III. Danzig Report (1). *Monthly Weather Review*, 62:5–7.

Legates, D.R. and C.J. Willmott, 1990: Mean seasonal and spatial variability in gauge-corrected, global precipitation. *Int. J. Climatology*, 10:111–127.

Nespor, V. and B. Sevruk, 1999: Estimation of wind-induced error of rainfall gauge measurements using a numerical simulation. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 16(4):450–464.

Niemczynowicz, J., 1986: The dynamic calibration of tipping-bucket raingauges. *Nordic Hydrology*, 17:203–214.

Rinehart, R.E., 1983: Out-of-level instruments: Errors in hydrometeor spectra and precipitation measurements. *Journal of Climate and Applied Meteorology*, 22:1404–1410.

Schemenauer, R.S. and P. Cereceda, 1991: Fog water collection in arid coastal locations. *Ambio*, 20(7):303–308.

———, 1994*a*: Fog collection's role in water planning for developing countries. *Natural Resources Forum*, 18(2):91–100.

———, 1994*b*: A proposed standard fog collector for use in high-elevation regions. *Journal of Applied Meteorology*, 33(11):1313–1322.

Sevruk, B., 1974*a*: Correction for the wetting loss of a Hellman precipitation gauge. *Hydrological Sciences Bulletin*, 19(4):549–559.

———, 1974*b*: Evaporation losses from containers of Hellman precipitation gauges. *Hydrological Sciences Bulletin*, 19(2):231–236.

———, 1984: Comments on "Out-of-level instruments: Errors in hydrometeor spectra and precipitation measurements". *Journal of Climate and Applied Meteorology*, 23:988–989.

Sevruk, B. and V. Nespor, 1994: The effect of dimensions and shape of precipitation gauges on the wind-induced error. In: *Global Precipitation and Climate Change* (M. Desbois and F. Desalmand, eds.). NATO ASI Series, Springer Verlag, Berlin, I26:231–246.

Sevruk, B. and L. Zahlavova, 1994: Classification system of precipitation gauge site exposure: Evaluation and application. *International Journal of Climatology*, 14(6):681–689.

Sieck, L.C., S.J. Burges and M. Steiner, 2007: Challenges in obtaining reliable measurements of point rainfall. *Water Resources Research*, 43:1–23.

Slovak Hydrometeorological Institute and Swiss Federal Institute of Technology, 1993: Precipitation measurement and quality control. *Proceedings of the International Symposium on Precipitation and Evaporation* (B. Sevruk and M. Lapin, eds.) (Bratislava, 20–24 September 1993), Volume I, Bratislava and Zurich.

Smith, J.L., H.G. Halverson and R.A. Jones, 1972: *Central Sierra Profiling Snowgauge: A Guide to Fabrication and Operation*. USAEC Report TID-25986, National Technical Information Service, U.S. Department of Commerce, Washington DC.

Stadtmuller, T. and N. Agudelo, 1990: Amount and variability of cloud moisture input in a tropical cloud forest. In: *Proceedings of the Lausanne Symposia* (August/November), IAHS Publication No. 193, Wallingford.

Stagnaro, M., M. Colli, L.G. Lanza and P.W. Chan, 2016: Performance of post-processing algorithms for rainfall intensity using measurements from tipping-bucket rain gauges. *Atmospheric Measurement Techniques*, 9(12):5699-5706.

Vong, R.J., J.T. Sigmon and S.F. Mueller, 1991: Cloud water deposition to Appalachian forests. *Environmental Science and Technology*, 25(6):1014–1021.

World Meteorological Organization, 1972: Evaporation losses from storage gauges (B. Sevruk). In: *Distribution of Precipitation in Mountainous Areas*, Geilo Symposium (Norway, 31 July–5 August 1972), Volume II – technical papers (WMO-No. 326). Geneva.

———, 1982: *Methods of Correction for Systematic Error in Point Precipitation Measurement for Operational Use* (B. Sevruk). Operational Hydrology Report No. 21 (WMO-No. 589). Geneva.

———, 1984: *International Comparison of National Precipitation Gauges with a Reference Pit Gauge* (B. Sevruk and W.R. Hamon). Instruments and Observing Methods Report No. 17 (WMO/TD-No. 38). Geneva.

———, 1985: *International Organizing Committee for the WMO Solid Precipitation Measurement Intercomparison*. Final report of the first session (distributed to participants only). Geneva.

———, 1986: *Papers Presented at the Workshop on the Correction of Precipitation Measurements* (B. Sevruk, ed.) (Zurich, Switzerland, 1–3 April 1985). Instruments and Observing Methods Report No. 25 (WMO/TD-No. 104). Geneva.

———, 1987: *Instruments Development Inquiry* (E. Prokhorov). Instruments and Observing Methods Report No. 24 (WMO/TD-No. 231). Geneva.

———, 1989*a*: *Catalogue of National Standard Precipitation Gauges* (B. Sevruk and S. Klemm). Instruments and Observing Methods Report No. 39 (WMO/TD-No. 313). Geneva.

———, 1989*b*: *International Workshop on Precipitation Measurements* (B. Sevruk, ed.) (St Moritz, Switzerland, 3–7 December 1989). Instruments and Observing Methods Report No. 48 (WMO/TD-No. 328). Geneva.

———, 1992*a*: *Snow Cover Measurements and Areal Assessment of Precipitation and Soil Moisture* (B. Sevruk, ed.). Operational Hydrology Report No. 35 (WMO-No. 749). Geneva.

———, 1992*b*: *Report on the Measurement of Leaf Wetness* (R.R. Getz). Agricultural Meteorology Report No. 38 (WMO/TD-No. 478). Geneva.

———, 1998: *WMO Solid Precipitation Measurement Intercomparison: Final Report* (B.E. Goodison, P.Y.T. Louie and D. Yang). Instruments and Observing Methods Report No. 67 (WMO/TD-No. 872). Geneva.

———, 2006: *WMO Laboratory Intercomparison of Rainfall Intensity Gauges* (L.G. Lanza, M. Leroy, C. Alexandropoulos, L. Stagi and W. Wauben). Instruments and Observing Methods Report No. 84 (WMO/TD-No. 1304). Geneva.

———, 2009: *WMO Field Intercomparison of Rainfall Intensity Gauges* (E. Vuerich, C. Monesi, L.G. Lanza, L. Stagi, E. Lanzinger). Instruments and Observing Methods Report No. 99 (WMO/TD-No. 1504). Geneva.

Yang, D., J.R. Metcalfe, B.E. Goodison and E. Mekis, 1993: True Snowfall: An evaluation of the Double Fence Intercomparison Reference Gauge. *Proceedings of the Fiftieth Eastern Snow Conference*, Quebec City, 8–10 June 1993, Quebec, Canada, pp. 105–111.

Yang, D., B.E. Goodison, J.R. Metcalfe, V.S. Golubev, E. Elomaa, T. Gunther, R. Bates, T. Pangburn, C.L. Hanson, D. Emerson, V. Copaciu and J. Milkovic, 1995: Accuracy of Tretyakov precipitation gauge: results of WMO intercomparison. *Hydrological Processes*, 9:877–895.

ГЛАВА 7. ИЗМЕРЕНИЕ РАДИАЦИИ

7.1 ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

Потоки электромагнитного излучения, приходящие к поверхности Земли и уходящие от нее, являются наиболее важными переменными составляющими теплового баланса Земли в целом и каждого отдельного места на земной поверхности и в атмосфере. Измерения радиации имеют большое значение для следующих целей:

a) исследование преобразования энергии в пределах системы Земля — атмосфера и ее изменений в пространстве и времени;

b) анализ свойств и распределения в атмосфере таких составляющих, как аэрозоли, водяной пар, озон и др.;

c) исследование распределения и изменений приходящей, уходящей и остаточной радиации;

d) удовлетворение потребностей специалистов в области биологии, медицины, сельского хозяйства, архитектуры и промышленности в отношении данных о радиации;

e) проверка алгоритмов и спутниковых измерений радиации.

Такая программа применений требует получения на широкой сети актинометрических станций регулярных рядов данных наблюдений за различными видами коротковолновой и длинноволновой радиации, а также обеспечение репрезентативных оценок сумм радиации. Помимо публикации рядов данных отдельных актинометрических станций, необходимо получение (что является основной целью) исчерпывающих радиационных климатических данных, с помощью которых можно более точно определить суточные и сезонные вариации различных составляющих радиационного баланса и лучше понять соотношения между ними и другими метеорологическими величинами.

Весьма полезные сведения о структуре и работе сети актинометрических станций содержатся в публикации ВМО (WMO, 1986). В томе V настоящего Руководства описаны научные принципы измерений и даются рекомендации по обеспечению качества (ОК), что особо важно для измерений радиации. В *Baseline Surface Radiation Network (BSRN) Operations Manual* (WMO, 1998) (Руководство по эксплуатации Опорной сети для измерения приземной радиации (БСРН)) (WMO, 2005*a*) приводится обзор последних достижений в области измерений радиации.

Как принято в метеорологии, погрешности и неопределенности выражаются в этой главе в виде 66 % доверительного интервала разности с истинным значением величины, которая схожа со среднеквадратическим отклонением совокупности значений. В необходимых случаях указываются особые доверительные интервалы погрешностей, и оценка погрешностей приводится с использованием методов ИСО (ISO/IEC, 2008/JCGM, 2008). К примеру, 95 % неопределенность означает, что заявленная неопределенность относится к доверительному интервалу в 95 %.

7.1.1 Определения

В приложении 7.A приведена номенклатура радиометрических и фотометрических величин. Она основана на определениях, рекомендованных Международной комиссией по радиации Международной ассоциации метеорологии и атмосферных наук и Международной комиссией по освещенности (МКО). В приложении 7.B приводятся метеорологические радиационные показатели, символы и определения.

Параметры радиации. Они могут быть разделены на две группы, в зависимости от их происхождения, а именно: на солнечное и земное излучение. В контексте настоящей главы «радиация» может означать какой-либо процесс или соотноситься с многими параметрами. К примеру, «солнечная радиация» может означать солнечную энергию, солнечную экспозицию или энергетическую освещенность солнечного излучения (см. приложение 7.B).

Солнечная энергия. Это электромагнитная энергия, излучаемая солнцем. Солнечная радиация, приходящая на верхнюю границу земной атмосферы, называется внеземной солнечной радиацией; 97 % этой радиации находится в спектральном диапазоне 290–3 000 нм и носит название солнечной или коротковолновой радиации. Часть внеземного солнечного излучения, проходя через атмосферу, достигает поверхности Земли, а часть ее рассеивается и/или поглощается молекулами газов, аэрозольными частицами, облачными каплями и кристаллами в атмосфере.

Земное излучение. Это длинноволновая электромагнитная энергия, излучаемая земной поверхностью и атмосферными газами, аэрозолями и облаками; оно также частично поглощается в атмосфере. Наибольшая доля земного излучения находится в спектральном диапазоне за границей 3 000 нм. Так, при температуре 300 K на эту область приходится 99,99 % мощности излучения, а за границей 5 000 нм — около 99 %. При более низкой температуре спектр сдвигается в сторону более длинных волн.

Поскольку спектральные интервалы солнечной и земной радиации перекрываются на незначительном участке, в измерениях и расчетах часто они рассматриваются раздельно. Для суммы этих видов радиации в метеорологии принят термин «интегральная радиация».

Свет. Это электромагнитное излучение, видимое глазом человека. Спектральная область видимого излучения называется спектральной световой чувствительностью глаз стандартного наблюдателя. Нижняя граница видимого излучения находится между 360 и 400 нм, а верхняя — между 760 и 830 нм (CIE, 1987). Излучение с длиной волны менее 400 нм называется ультрафиолетовым (УФ), а с длиной волны более 800 нм — инфракрасным (ИК) излучением. УФ диапазон иногда делится на три поддиапазона (IEC, 1987):

УФ-A: 315–400 нм
УФ-B: 280–315 нм
УФ-C: 100–280 нм

7.1.2 Единицы и шкалы

7.1.2.1 *Единицы*

Для метеорологических радиационных переменных в целом предпочтительны единицы измерений, принятые в Международной системе единиц (СИ). Общий перечень единиц содержится в приложениях 7.A и 7.B.

7.1.2.2 *Стандартизация*

Ответственность за калибровку радиометрических приборов несут мировые, региональные и национальные радиационные центры, спецификации которых приведены в приложении 7.C. Кроме того, Мировой радиационный центр в Давосе (МРЦ) отвечает за содержание основного эталона — группы международных эталонов (ГМЭ), используемой для реализации Международного радиометрического эталона (МРЭ). При проведении международных сличений эталонов, организуемых каждые пять лет, стандарты региональных центров сравниваются с ГМЭ, и их калибровочные

параметры корректируются согласно МРЭ. Они, в свою очередь, периодически передаются в национальные центры, которые калибруют сетевые приборы по своим собственным стандартам.

Определение для Международного радиометрического эталона

В прошлом в метеорологии применялись несколько радиационных эталонов или шкал, а именно: эталон Ангстрема 1905 г., Смитсонианская шкала 1913 г. и международная пиргелиометрическая шкала 1956 г. (МПШ 1956). Выполненные впоследствии научно-исследовательские и проектно-конструкторские разработки в области абсолютной радиометрии позволили значительно снизить погрешность измерений солнечной радиации и создать на основе результатов многочисленных сравнений 15 абсолютных пиргелиометров 10 различных типов Международный радиометрический эталон (МРЭ). Для перевода прежних шкал в шкалу МРЭ предлагаются следующие коэффициенты:

$$\frac{\text{WRR}}{\text{Angstrom scale 1905}} = 1,026$$

$$\frac{\text{WRR}}{\text{Smithsonian scale 1913}} = 0,977$$

$$\frac{\text{WRR}}{\text{IPS 1956}} = 1,022$$

Шкала МРЭ выражается в физических единицах измерения интегральной энергетической освещенности с погрешностью в пределах 0,3 % от измеряемой величины (для 99 % измеренных значений).

Реализация Международного радиометрического эталона: группа международных эталонов

Чтобы гарантировать долгосрочную устойчивость нового эталона группа международных эталонов (ГМЭ) должна состоять не менее чем из четырех абсолютных пиргелиометров различной конструкции. При включении в эту группу приборов к ним прилагаются переводные коэффициенты для приведения их данных к МРЭ. Для включения в эту группу радиометр должен соответствовать следующим требованиям:

a) стабильность измерений должна быть менее 0,2 % измеренного значения во временных масштабах десятилетий;

b) погрешности измерений прибором с доверительной вероятностью 95 % должны лежать в пределах погрешности МРЭ;

c) по конструкции прибор должен отличаться от других приборов ГМЭ.

Для обеспечения критерия стабильности один раз в год обязательно осуществляется взаимное сравнение приборов этой группы. ГМЭ находится в МРЦ в Давосе.

Передача шкалы Международного радиометрического эталона

Для калибровки радиометрических приборов необходимо использовать показания прибора ГМЭ или другого, непосредственно сопоставимого с ГМЭ. В ходе международных пиргелиометрических сравнений (МПС) значение в шкале МРЭ вычисляют на основе среднего, полученного из показаний по меньшей мере трех приборов ГМЭ. Для получения значения МРЭ показания приборов ГМЭ всегда корректируются с учетом переводного коэффициента, определенного на момент их включения в ГМЭ. Расчет среднего значения величины, измеренной ГМЭ, служащего эталоном, может быть нарушен в результате неисправности одного или более радиометров. Для решения этой проблемы КПМН

приняла решение[1], что для каждого МПС следует создавать специальную группу, в состав которой входят докладчик по метеорологическим радиационным приборам (или назначаемое лицо) и по крайней мере пять членов, включая председателя. Эта группа оценивает стабильность приборов ГМЭ и осуществляет отбор приборов, которые будут использоваться при расчете МРЭ. Руководитель сравнений должен участвовать в совещаниях группы в качестве эксперта. Группа должна провести обсуждение предварительных результатов сравнений на основе критериев, определенных МРЦ, дать оценку эталона и рекомендации по обновлению коэффициентов калибровки.

7.1.3 Метеорологические требования

7.1.3.1 *Данные для составления отчетности*

Энергетическая освещенность и энергетическая экспозиция (суммы радиации) — это параметры, которые чаще всего регистрируются и архивируются со средними и итоговыми значениями за 1 ч. Имеется также много потребностей в данных за более короткие периоды — до 1 мин или даже десятков секунд (для некоторых энергетических применений). Часто используются данные о суточных суммах радиации, выраженные в виде средних значений суточной энергетической освещенности. Измерения для определения ослабления радиации в атмосфере должны проводиться в течение очень короткого интервала времени в целях уменьшения погрешностей, вызываемых изменениями в составе атмосферы на пути прохождения солнечных лучей.

Для измерений радиации особенно важно регистрировать и предоставлять информацию об условиях наблюдений. Сюда входят тип и метрологические характеристики прибора, сведения о его калибровке, месторасположении в пространстве и во времени, пространственной экспозиции и техническом обслуживании.

7.1.3.2 *Погрешность*

Для многих радиационных характеристик не существует официально согласованных установленных требований к погрешности, хотя погрешность, описываемая в настоящем разделе этой главы, затрагивает различные виды измерений и наилучшая практика расчета погрешностей относится к Опорной сети измерений приземной радиации Глобальной системы наблюдений за климатом (ГСНК) (см. WMO, 2005*a*). В целом можно отметить, что на практике добиться измерений хорошего качества довольно трудно. При регулярных измерениях их можно достичь только с помощью современного оборудования при большом числе измерений. Некоторые все еще используемые инструментальные системы не соответствуют современным требованиям, хотя их средние характеристики все еще остаются приемлемыми для решения многих прикладных задач. Однако потребность в данных наивысшего качества постоянно увеличивается.

Сведения о погрешности, относящейся к остаточной радиации и энергетической экспозиции, содержатся в настоящем томе, глава 1, приложение 1.A. Требования точности 95 % для энергетической экспозиции за сутки, определенные ВМО для международного обмена, составляют 0,4 МДж·м$^{-2}$ для величин ≤ 8 МДж·м$^{-2}$ и 5 % для величин > 8 МДж·м$^{-2}$.

7.1.3.3 *Частота проведения наблюдений и регистрация данных*

Выполнение требований к точности может обеспечиваться путем проведения наблюдений с частотой меньше постоянной времени 1/e прибора даже в тех случаях, когда данные, подлежащие окончательной регистрации, представляют собой интегральные значения за периоды до 1 ч и более. Элементами данных могут стать интегральные значения или осредненные значения, рассчитанные на основании отдельных измерений. В основном

[1] Рекомендация КПМН, принятая на ее одиннадцатой сессии (1994 г.).

предпочтение отдается цифровым системам данных. Диаграммные самописцы и другие типы интеграторов менее удобны, и результирующие показатели с трудом обеспечивают приемлемые уровни погрешностей.

7.1.3.4 ***Время наблюдений***

Важно, чтобы данные глобальной сети актинометрических измерений были однородными не только с точки зрения калибровки, но и по времени наблюдений. Поэтому все актинометрические измерения должны быть отнесены к тому времени, которое в некоторых странах известно как местное истинное время, а в других — как истинное солнечное время. Однако для автоматических систем более подходит стандартное или всемирное время (ВВ), поскольку им легче пользоваться, но оно применимо только в том случае, если приведение данных к истинному солнечному времени не повлечет за собой значительной потери информации (т. е. если частота проведения наблюдений и скорость регистрации достаточно высоки, как указано выше в 7.1.3.3). Перевод из стандартного в солнечное время описывается в приложении 7.D.

7.1.4 **Методы измерений**

Актинометрические приборы классифицированы по следующим критериям: по типу переменной, подлежащей измерению; по углу зрения; по спектральной чувствительности; по основному виду применения и др. Основные типы классификации приведены в таблице 7.1. Перечень основных метрологических характеристик актинометрических приборов приведен ниже (см. пункты (a)–(h)). Приборы и принципы их действия изложены ниже в 7.2–7.4. Более подробное описание приборов и принципов их действия изложено в публикации ВМО (WMO, 1986).

Абсолютные радиометры — это приборы с самокалибровкой, т. е. измеряемая энергетическая освещенность заменяется электрической мощностью, которую можно измерить. Однако эта замена, как правило, не бывает идеальной; отклонение от идеального случая определяет погрешность актинометрического измерения.

Многие датчики радиации не являются абсолютными, и их следует калибровать по абсолютному прибору. Тогда погрешность измеренного значения зависит от следующих факторов, которые должны быть известны для прибора с хорошими показателями:

a) разрешающей способности, т. е. наименьшего изменения значения радиации, которое может быть зафиксировано прибором;

b) дрейфа чувствительности (отношения электрического выходного сигнала к измеряемому значению энергетической освещенности) с течением времени;

c) изменений чувствительности, обусловленных изменениями переменных окружающей среды, таких как температура, влажность, давление и ветер;

d) нелинейности чувствительности, т. е. от изменений чувствительности, связанных с изменениями энергетической освещенности;

e) отклонения спектральной чувствительности от постулированной, т. е. от непрозрачности принимающей поверхности, эффекта апертурного окна и т. д.;

f) отклонения направленной чувствительности от постулированной, т. е. от косинусной и азимутальной характеристик;

g) постоянной времени прибора или системы измерения;

h) погрешностей вспомогательного оборудования.

Таблица 7.1. Актинометрические приборы

Классификация приборов	*Измеряемый параметр*	*Основное использование*	*Угол зрения (ср) (см. рисунок 7.1)*
Абсолютный пиргелиометр	Прямая солнечная радиация	Первичный эталон	5×10^{-3} (половина угла около 2,5˚)
Пиргелиометр	Прямая солнечная радиация	a) Вторичный эталон для поверок b) Измерения на сети	5×10^{-3} до $2,5 \times 10^{-2}$
Спектральный пиргелиометр	Прямая солнечная радиация в широких спектральных полосах (т. е. со светофильтрами типов OG 530, RG 630 и др.)	Измерения на сети	5×10^{-3} до $2,5 \times 10^{-2}$
Солнечный фотометр	Прямая солнечная радиация в узких спектральных участках (т. е. при 500 ± 2,5 нм, 368 ± 2,5 нм)	a) Эталон b) Измерения на сети	1×10^{-3} до 1×10^{-2} (полный угол около 2,3˚)
Пиранометр	a) Суммарная (солнечная) радиация b) Рассеянная солнечная радиация c) Отраженная солнечная радиация	a) Рабочий эталон b) Измерения на сети	2π
Спектральный пиранометр	Суммарная (солнечная) радиация в широких спектральных полосах (т. е. со светофильтрами типов OG 530, RG 630 и др.)	Измерения на сети	2π
Коротковолновый балансомер (альбедометр)	Остаточная суммарная (солнечная) радиация	a) Рабочий эталон b) Измерения на сети	4π
Пиргеометр	a) Уходящая длинноволновая радиация (при обращении вниз) b) Приходящая длинноволновая радиация (при обращении вверх)	Измерения на сети	2π
Пиррадиометр	Интегральная по спектру радиация	Рабочий эталон	2π
Балансомер	Остаточная радиация, интегральная по спектру (радиационный баланс)	Измерения на сети	4π

Приборы должны выбираться в зависимости от их конечного использования и требуемой погрешности получаемого значения. Некоторые приборы работают лучше в конкретных условиях климата, определенных значений радиации и положения Солнца.

7.2 ИЗМЕРЕНИЯ ПРЯМОЙ СОЛНЕЧНОЙ РАДИАЦИИ

Прямая солнечная радиация измеряется с помощью пиргелиометров, приемные поверхности которых устанавливаются перпендикулярно солнечным лучам. С использованием диафрагм измеряется только радиация от Солнца и узкого кольца неба; последний компонент радиации иногда называют как околосолнечная радиация или светлое сияние. Апертура современных приборов соответствует углу полураствора, равному 2,5°, согласно некоторым моделям, и до около 5° от центра Солнца (что равно $6 \cdot 10^{-3}$ и $2{,}4 \cdot 10^{-2}$ ср соответственно). Монтаж пиргелиометра должен позволять быструю и точную установку по азимуту и высоте. Обычно добавляется нацеливающее приспособление, в котором маленькое светлое пятно или солнечное отображение падает на отметку в центре мишени, когда приемная поверхность точно перпендикулярна прямому солнечному лучу. Для непрерывной регистрации рекомендуется использовать оборудование автоматического слежения за Солнцем (солнечное следящее устройство).

Для всех новых конструкций приборов, измеряющих прямую солнечную радиацию, рекомендуется, чтобы половина центрального угла приемника излучения составляла 2,5° ($6 \cdot 10^{-3}$ ср), а угол скоса диафрагмы приемника был равен 1°. Для определения этих углов см. рисунок 7.1.

Во время сравнения приборов с различными схемами ограничения поля зрения при больших углах наклона и апертурах радиация ореола оказывает влияние на показания прибора. Различие между двумя апертурами, упомянутыми выше, для массы атмосферы 1,0 может составлять до 2 %. Для климатологического сравнения данных измерений прямой солнечной радиации в различное время года желательно привести все данные к среднему расстоянию от Солнца до Земли:

$$E_{\mathrm{N}} = E / R^2 \tag{7.1}$$

где E_{N} — солнечная радиация, приведенная к среднему расстоянию от Солнца до Земли, которое принято за одну астрономическую единицу (а. е.) (см. приложение 7.D); E — измеренная прямая солнечная радиация; R — расстояние от Солнца до Земли в а. е.

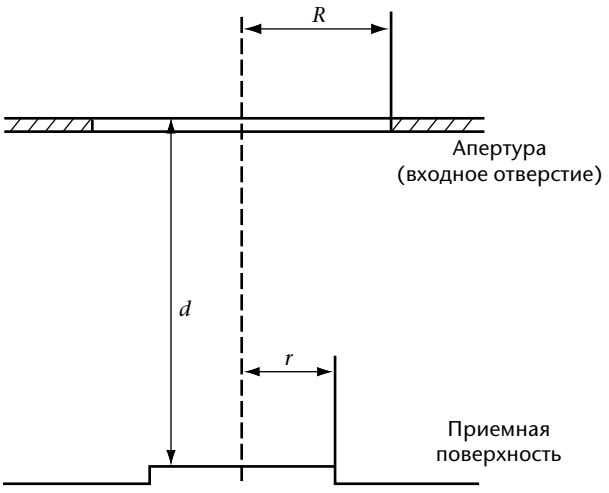


Рисунок 7.1. Схема ограничения поля зрения: половина центрального угла приемника излучения равна арктангенсу R/d; угол скоса равен арктангенсу $(R–r)/d$.

7.2.1 Прямая солнечная радиация

Некоторые характеристики используемых пиргелиометров (помимо основных эталонов) приведены в таблице 7.2 (взято из ISO, 1990*a*) с указанием оценки погрешностей измерений, проводимых с их помощью, если они используются соответственно подготовленным персоналом при обеспечении контроля качества (КК). Имеются и более дешевые пиргелиометры (см. ISO, 1990*a*), но они не нашли широкого применения; однако без дополнительных мер по улучшению их характеристик присущие им погрешности снижают качество данных. Если при этом учесть, что для непрерывных измерений требуется следящее устройство, то в большинстве случаев дополнительные затраты на качественный пиргелиометр не будут слишком большими по сравнению со стоимостью следящего устройства. Оценка погрешностей измерений основана на следующих допущениях:

a) приборы правильно установлены в месте наблюдений, откалиброваны, эксплуатационный уход за ними обеспечивается согласно рекомендациям, приложенным к прибору;

Таблица 7.2. Характеристики рабочих пиргелиометров

Характеристика		*Высокий класс*[a]	*Хороший класс*[b]
Время установления выходного сигнала (с точностью 95 %)		< 15 с	< 30 с
Смещение нуля (при изменении окружающей температуры со скоростью 5 К·ч$^{-1}$)		2 Вт·м$^{-2}$	4 Вт·м$^{-2}$
Порог чувствительности (наименьшее фиксируемое изменение, Вт·м$^{-2}$)		0,51	1
Стабильность (изменение в год в процентах от полной шкалы)		0,1	0,5
Температурная зависимость (процент максимальной погрешности, обусловленной изменением окружающей температуры на 50 К)		1	2
Нелинейность (процент отклонения от сигнала при 500 Вт·м$^{-2}$, обусловленного изменением радиации в диапазоне от 100 до 1 100 Вт·м$^{-2}$)		0,2	0,5
Спектральная чувствительность (процент отношения спектрального поглощения к спектральному пропусканию приемной поверхности в спектральном диапазоне 300–3 000 нм)		0,5	1,0
Влияние наклона прибора (процент отклонения показания при угле 0° (горизонтальное положение) от показания при наклоне на 90° от горизонтального при радиации 1 000 Вт·м$^{-2}$)		0,2	0,5
Достижимость достоверности показания с точностью 95 % от истинного (см. выше)			
суммы за 1 мин	%	0,9	1,8
	кДж·м$^{-2}$	0,56	1
суммы за 1 ч	%	0,7	1,5
	кДж·м$^{-2}$	21	54
суммы за 1 сутки	%	0,5	1,0
	кДж·м$^{-2}$	200	400

Примечания:
a Близкие значения для типа; подходит для использования в качестве рабочего эталона; используются только на станциях со специальным оборудованием и персоналом.
b Пригодны для сетевых измерений.

b) показатели ежеминутных и ежечасных наблюдений соответствуют прямой радиации безоблачного неба в солнечный полдень;

c) дневные значения экспозиции соответствуют безоблачным дням в средних широтах.

7.2.1.1 *Основные эталонные пиргелиометры*

Абсолютный пиргелиометр может определять измеряемые значения прямой солнечной радиации без обращения к эталонным источникам или излучателям. Пределы погрешностей измерений прибора должны быть известны; качество таких сведений определяет надежность абсолютного пиргелиометра. Эксплуатировать и содержать основные эталоны могут только лаборатории со штатом квалифицированных специалистов. Подробная информация о конструкции и работе таких эталонов представлена в публикации ВМО (WMO, 1986*a*). Вместе с тем, для полноты изложения ниже приводятся краткие сведения.

Все абсолютные пиргелиометры современной конструкции используют в качестве приемников резонаторы и в качестве датчиков электрически калиброванные дифференциальные измерители теплового потока. В настоящее время такое сочетание дает минимально возможные погрешности при измерениях значений солнечной радиации до 1,5 кВт·м$^{-2}$.

Обычно электрическая калибровка осуществляется путем замены мощности излучения на электрическую мощность, которая рассеивается в обмотке нагревателя вблизи того места, где происходит поглощение солнечной радиации.

Погрешность измерений такого прибора определяется тщательной проверкой его физических свойств, проведением лабораторных измерений и/или модельных расчетов, с тем чтобы выявить отклонения от оптимального режима, т. е. установить, насколько адекватно происходит электрическая замена. Такая процедура называется определением характеристик прибора.

Для того чтобы абсолютный пиргелиометр (отдельный прибор, а не тип прибора) использовался в качестве основного эталона, он должен удовлетворять следующим условиям:

a) по крайней мере один прибор из серии промышленных радиометров должен быть снабжен исчерпывающей информацией о его характеристиках. 95 % значений погрешности определения характеристик прибора должны быть меньше 2 Вт·м$^{-2}$ в условиях ясного неба, при которых проводятся калибровки (см. ISO, 1990*a*). 95 % значений суммарной погрешности какой-либо серии измерений не должны превышать 4 Вт·м$^{-2}$ для любого измеряемого значения;

b) каждый отдельный серийный прибор необходимо сравнивать с прибором, снабженным исчерпывающей информацией о его характеристиках; показания сравниваемого прибора не должны показывать отклонения выше указанных в пункте (a);

c) подробное описание результатов таких сравнений и характеристики этого прибора должны предоставляться по запросу;

d) для доказательства того, что конструкция прибора отвечает современным требованиям, необходима проверка соответствия со шкалой МРЭ путем сравнения с ГМЭ или с другим признанным эталоном, соответствующим требованиям, предъявляемым к ГМЭ. Последнее возможно, если погрешность серии измерений при сопоставлении с МРЭ менее 1 Вт·м$^{-2}$ с доверительной вероятностью 95 %.

7.2.1.2 ***Вторичные эталонные пиргелиометры***

Абсолютный пиргелиометр, который не удовлетворяет техническим характеристикам первичного эталона или технические характеристики которого не были определены в полном объеме, может использоваться в качестве вторичного эталона, если он откалиброван путем сравнений с ГМЭ при погрешности серии измерений менее 1 Вт·м$^{-2}$ с доверительной вероятностью 95 %.

Другие типы приборов с погрешностями измерений, близкими к первичным эталонам, могут использоваться в качестве вторичных эталонов.

Компенсационный пиргелиометр Ангстрема использовался и используется как удобный вторичный эталонный прибор для калибровки пиранометров и других пиргелиометров. Он был создан К. Ангстремом в качестве абсолютного прибора, на нем основана и шкала Ангстрема 1905 г.; в настоящее время он используется в качестве вторичного эталона, и его необходимо калибровать по эталонному прибору.

Приемник состоит из пары покрытых платиновой чернью манганиновых полосок длиной 18 мм, шириной 2 мм и толщиной 0,02 мм каждая. Они зачернены сажей или оптически матовой черной краской. К тыловой стороне каждой полоски прикреплены электрически изолированные спаи термоэлемента медь-константан. Разность температур между полосками определяется чувствительным гальванометром или электрическим микровольтметром. Размеры полосок и передняя диафрагма соответствуют половине центрального угла и угла скоса диафрагм, указанных в таблице 7.3.

Таблица 7.3. Схема ограничения углов зрения пиргелиометров Ангстрема.

Угол	*Вертикальный*	*Горизонтальный*
Половина центрального угла приемника излучения	5°–8°	~2°
Угол скоса диафрагм приемника излучения	0,7°–1,0°	1,2°–1,6°

Процесс измерения состоит из трех или более циклов, в ходе которых левая или правая полоска поочередно затеняется или облучается прямыми солнечными лучами. Затененная полоска нагревается электрическим током. Регулируя силу тока, протекающего через нее, добиваются равенства э.д.с, вырабатываемых термопарами. До и после измерения нуль проверяется путем затенения или путем облучения одновременно обеих полосок. В зависимости от используемого метода и данных инструкции по эксплуатации прибора завода-изготовителя, результаты расчета энергетической освещенности могут несколько отличаться. В методе, принятом для международных сравнений пиргелиометров, используется формула:

$$E = K \cdot i_{\mathrm{L}} \cdot i_{\mathrm{R}} \tag{7.2}$$

где E — энергетическая освещенность в Вт·м$^{-2}$; K — калибровочная постоянная, определенная сравнением с основным эталоном (Вт·м$^{-2}$·А$^{-2}$); и i_{L} i_{R} — ток в амперах, измеряемый в левой или правой полоске, экспонируемой прямому солнечному лучу соответственно.

До и после каждой серии измерений нуль системы регулируется электрически любым из вышеупомянутых методов, и в зависимости от обстоятельств этот нуль называется «горячим» (облученным) или «холодным» (затемненным) соответственно. Обычно первое показание (скажем, i_{R}) исключается, и только последующие пары значений i_{L}-i_{R} используются для расчета энергетической освещенности. При сравнениях такого

пиргелиометра с другими приборами энергетическая освещенность, получаемая на основе э.д.с., соответствует геометрическому среднему солнечной энергетической освещенности во время снятия показаний i_L и i_R.

Вспомогательное оборудование состоит из источника питания, регулятора тока, нуль-индикатора, переключателя и измерителя тока.

Чувствительность нуль-индикатора должна составлять $0{,}05 \cdot 10^{-6}$ А на деление шкалы для небольшого входного сопротивления (менее 10 Ом) или около 0,5 мкВ при большом входном сопротивлении (более 10 кОм). При таких условиях разность температур 0,05 K между спаями термопары медь-константан вызывает отклонение на одно деление шкалы, из чего следует, что одна из полосок получает избыток тепла, составляющий около 0,3 %.

Погрешность полученной энергетической освещенности при прямом солнечном облучении в большой степени зависит от качества устройств для измерения тока — миллиамперметра электромагнитного типа или цифрового мультиметра, который измеряет напряжение по стандартному сопротивлению, а также зависит от профессионализма оператора. Погрешность измеряемого значения энергетической освещенности в два раза больше погрешности измерения электрического тока. Ток нагрева направляется к любой полоске с помощью переключателя и контролируется отдельными реостатами в каждой цепи. Переключатель может также отключать ток для определения места нуля. Разрешающая способность реостатов должна быть достаточной для регулировки показания нуль-индикатора в пределах половины деления шкалы.

7.2.1.3 ***Полевые и сетевые пиргелиометры***

Как правило, у этих пиргелиометров в качестве чувствительного элемента используется термобатарея. Они имеют ограниченные углы зрения, так же как и стандартные пиргелиометры. Более старые модели, как правило, имеют более широкие центральные углы и углы скоса диафрагм. Такие особенности конструкции предназначались, главным образом, для снижения необходимости точного нацеливания на солнечный диск. Однако, чем больше угол скоса диафрагм (и центральный угол приемника), тем больше доля излучения солнечного ореола воспринимается приемником, величина которой может достигать нескольких процентов в условиях низкой прозрачности атмосферы. В новых конструкциях необходимость в больших центральных углах и углах скоса диафрагм отпадает благодаря использованию компьютерных систем слежения за солнцем как в пассивном, так и в активном режимах. Вместе с тем, угол скоса в 1° все еще требуется для обеспечения равномерного распределения солнечной радиации на приемной поверхности приемника и нацеливания следящей системы на солнце с погрешностью порядка 0,1°.

Целевое использование пиргелиометра может диктовать выбор конкретного типа прибора. Некоторые модели, ориентированные вручную, используются главным образом для точечных измерений, в то время как другие, установленные на устройстве слежения за солнцем, специально предназначены для долговременного мониторинга прямой солнечной радиации. Перед установкой прибора пользователь должен учитывать значительные различия между штатными пиргелиометрами, а именно:

a) угол поля зрения прибора;

b) спектральную характеристику, в том числе материал защитного окна (стекло или кварц), которым закрыто входное отверстие прибора;

c) методы температурной компенсации или коррекции;

d) порог чувствительности и вариацию нулевого сигнала;

e) можно ли установить прибор на автоматической следящей системе для долговременного мониторинга;

f) если данный прибор предназначен для калибровки других оперативных пиргелиометров, то следует учитывать факторы (a)–(c), указанные выше, при этом данный пиргелиометр должен обладать качеством, необходимым для калибровки сетевых приборов.

7.2.1.4 ***Калибровка пиргелиометров***

Все пиргелиометры, кроме абсолютных, должны быть откалиброваны путем сличения с другим пиргелиометром, привязанным к ГМЭ, с погрешностью не ниже погрешности, характерной для приборов калибруемого типа.

Поскольку все данные солнечной радиации должны быть получены в шкале МРЭ, абсолютные пиргелиометры должны иметь коэффициент не только свой собственный, но и полученный в результате сравнений с ГМЭ. После таких сравнений (например, во время периодически проводимых международных сравнений пиргелиометров (МСП)) такой пиргелиометр может быть использован в качестве эталона для калибровки вторичных эталонов и рабочих пиргелиометров. Вторичные эталоны также могут быть использованы для калибровки приборов, однако с более высокой погрешностью.

Качество калибровки по солнцу может зависеть от влияния околосолнечного ореола, если сравнивать приборы с различными геометрическими размерами. Если постоянные времени и нулевые сигналы пиргелиометров существенно различаются, качество результатов будет зависеть от стабильности прямой солнечной радиации при сравнениях. На результаты могут влиять также другие условия: температура воздуха, атмосферное давление, доля приходящей длинноволновой радиации. В том случае, когда требуется высокое качество калибровки, сравнения нужно проводить в дни с устойчивой радиацией при высокой прозрачности атмосферы.

Процедуры калибровки полевых пиргелиометров изложены в стандарте ИСО (ISO, 1990*b*).

В ходе недавно проведенных МСП было установлено, что калибровку основных и вторичных эталонов на соответствие ГМЭ достаточно проводить один раз в 5 лет. Рабочие пиргелиометры должны калиброваться ежегодно или раз в 2 года; чем дольше они используются и чем суровее условия их эксплуатации, тем чаще должна проводиться калибровка.

7.2.2 **Экспонирование**

Для обеспечения непрерывной регистрации данных и снижения погрешностей весьма важно наличие точного следящего за Солнцем устройства, обеспечивающего погрешность слежения 0,2° и не подверженного влиянию условий окружающей среды. Состояние приборов необходимо проверять, по крайней мере, один раз в сутки и даже чаще, если этого требуют погодные условия (с защитой от неблагоприятных факторов).

Основное требование экспонирования для мониторинга прямой солнечной радиации — отсутствие экранирования солнечных лучей в процессе измерений в любой момент любого времени года. Кроме того, место должно быть выбрано так, чтобы характеристики мутности атмосферы (туман, дым и загрязнение воздуха) были, по возможности, типичными для окружающей среды данного района.

Для обеспечения непрерывности наблюдений, как правило, используется оптическое окно для защиты чувствительных элементов датчика и элементов оптики от дождя, снега и пр. Необходимо следить за тем, чтобы оно сохранялось чистым и на его внутренней стороне не появлялся конденсат.

7.3 ИЗМЕРЕНИЕ СУММАРНОЙ И РАССЕЯННОЙ РАДИАЦИИ

Солнечная радиация, создаваемая потоками излучения, приходящими из верхней полусферы в пределах телесного угла 2π ср на горизонтальную поверхность, называется суммарной солнечной радиацией. Она включает радиацию, создаваемую излучением солнечного диска и рассеянным небом (компонентами атмосферы, включая облака).

Прибором, используемым для измерения солнечной радиации, приходящей из телесного угла 2π ср на плоскую поверхность в спектральном диапазоне от 300 до 3 000 нм, является пиранометр. Пиранометр иногда используется для измерения солнечной радиации на наклонных поверхностях, а в перевернутом положении — для измерения отраженной суммарной радиации. При измерении рассеянной радиации неба пиранометр должен быть экранирован от прямых солнечных лучей затеняющим устройством (см. 7.3.3.3).

В пиранометрах в качестве чувствительного элемента обычно используются термоэлектрические, фотоэлектрические, пироэлектрические или биметаллические элементы. Поскольку пиранометры экспонируются непрерывно при любых погодных условиях, они должны быть стойкими по конструкции и устойчивыми против коррозийного действия влажного воздуха (особенно вблизи моря). Приемник радиации должен быть герметично запаян внутри корпуса, или же корпус должен быть легкосъемным, с тем чтобы можно было устранить конденсационное увлажнение. В случае если приемник не запаян, в основании прибора, как правило, размещается осушитель. Характеристики пиранометров, которые обычно принимаются во внимание при оценке погрешности и качества радиационных измерений, следующие: чувствительность, стабильность, время срабатывания, косинусная характеристика, азимутная характеристика, линейность, температурная характеристика, термический сдвиг, нулевой сигнал энергетической освещенности и спектральная характеристика. Дополнительные сведения об использовании пиранометров даются в публикациях ISO (1990*c*) и WMO (2005*a*).

В таблице 7.4 (основана на данных из ISO, 1990*a*) приведены характеристики пиранометров различных уровней качества с погрешностями, которые могут обеспечиваться при наличии отвечающего требованиям оборудования, хорошо обученного персонала и надлежащего контроля качества при соответствующих условиях состояния неба, кратко изложенных в 7.2.1.

7.3.1 Калибровка пиранометров

Калибровка пиранометров заключается в определении одной или более метрологических характеристик, в том числе связанных с условиями эксплуатации:

a) угловое распределение энергетической освещенности;

b) методы калибровки;

c) азимутальная направленность прибора;

d) угол наклона прибора к горизонту;

e) уровень энергетической освещенности;

f) длинноволновая энергетическая освещенность (в случае необходимости коррекции термического сдвига);

g) спектральное распределение энергетической освещенности;

h) температура прибора и/или окружающей среды;

i) изменение характеристик во времени.

Таблица 7.4. Характеристики рабочих пиранометров

Характеристика	*Высокий класс*[a]	*Хороший класс*[b]	*Средний класс*[c]
Время установления выходного сигнала (с точностью 95 %)	< 15 с	< 30 с	< 60 с
Смещение нуля:			
a) реакция на остатки тепловой радиации до 200 Вт · м$^{-2}$	7 Вт·м$^{-2}$	15 Вт·м$^{-2}$	30 Вт·м$^{-2}$
b) реакция на изменение окружающей температуры 5 K · ч$^{-1}$	2 Вт·м$^{-2}$	4 Вт·м$^{-2}$	8 Вт·м$^{-2}$
Порог чувствительности (наименьшее фиксируемое изменение)	1 Вт·м$^{-2}$	5 Вт·м$^{-2}$	10 Вт·м$^{-2}$
Стабильность (изменение в год в процентах от полной шкалы)	0,8	1,5	3,0
Реакция на направленное облучение (предел погрешности, обусловленной отклонением от нормального облучения при значении радиации 1 000 Вт·м$^{-2}$)	10 Вт·м$^{-2}$	20 Вт·м$^{-2}$	30 Вт·м$^{-2}$
Температурная зависимость (процент максимальной погрешности, обусловленной изменением окружающей температуры на 50 K)	2	4	8
Нелинейность (процент отклонения от сигнала при 500 Вт·м$^{-2}$, обусловленного изменением радиации в диапазоне от 100 до 1 000 Вт·м$^{-2}$)	0,5	1	3
Спектральная чувствительность (процент отношения спектрального поглощения к спектральному пропусканию приемной поверхности в спектральном диапазоне от 300 до 3 000 нм)	2	5	10
Влияние наклона прибора (процент отклонения показания при угле 0° (горизонтальное положение) от показания при наклоне на 90° от горизонтального при радиации 1 000 Вт·м$^{-2}$)	0,5	2	5
Достижимость достоверности показания (с точностью 95 % от истинного):			
часовой суммы	3%	8%	20%
суточной суммы	2%	5%	10%

Примечания:
a Близкие к современному передовому уровню; подходят для использования в качестве рабочего эталона; используются только на станциях со специальным оборудованием и персоналом.
b Пригодны для производства сетевых измерений.
c Пригодны для использования на низкозатратной сети с измерениями средней точности.

При использовании пиранометров необходимо иметь ввиду, что погрешность наблюдений будет увеличиваться в тех случаях, когда условия экспозиции датчика отличаются от условий, в которых была проведена калибровка пиранометра.

Обычно необходимо определить условия среды испытаний, которые могут быть различными в разных случаях применения. Метод и условия должны быть также детально описаны в калибровочном сертификате.

Существует множество методов калибровки пиранометров, выполняемых по солнцу или в лабораторных условиях с использованием искусственных источников света, а именно:

a) путем сравнения с эталонным пиргелиометром, измеряющим прямую солнечную радиацию и с затененным эталонным пиранометром, измеряющим рассеянную радиацию;

b) путем сравнения с эталонным пиргелиометром по солнцу с использованием съемного затеняющего экрана для пиранометра;

c) путем сравнения по солнцу с эталонным пиргелиометром и двух поочередно калибруемых пиранометров, измеряющих суммарную и рассеянную радиацию;

d) путем сравнения с эталонным пиранометром в естественных условиях при прямой солнечной радиации, статистически не отличающейся от нуля (например, при равномерной облачности);

e) в лабораторных условиях на оптической скамье с искусственным источником излучения, падающего на приемную поверхность пиранометра перпендикулярно или наклонно, путем сравнения с эталонным пиранометром такого же типа, предварительно откалиброванным вне лаборатории;

f) в лабораторных условиях с помощью интегрирующей камеры, имитирующей рассеянную радиацию неба, путем сравнения с эталонным пиранометром такого же типа, предварительно откалиброванным вне лаборатории.

Существуют и другие методы, но чаще всего используются методы, указанные в (a), (b), (c) и (d). Вместе с тем, весьма важно, что, за исключением метода (b), для всех приборов используются либо нулевые сигналы энергетической освещенности, либо пары идентичных стандартных пиранометров в идентичных конфигурациях. Игнорирование этих сдвигов и различий может существенно исказить результаты.

Считается, что метод (c) дает весьма хорошие результаты без использования откалиброванного пиранометра.

Трудно рекомендовать какое-то конкретное число измерений, на которых основываются расчеты калибровочного коэффициента пиранометра. Однако может быть рассчитано стандартное отклонение, которое должно быть меньше определяемого в соответствии с необходимой точностью при снятии достаточного числа показаний при желаемых условиях. Основные вариации (за исключением колебаний, происходящих из-за нестабильности атмосферных условий и ограниченных возможностей наблюдений) обусловлены:

a) отклонениями от закона Ламберта для диффузного свечения, в частности если угол высоты солнца составляет менее 10° (в этом случае работы по калибровке прибора следует отложить до момента, когда угол высоты солнца превысит 30°);

b) температурой окружающей среды;

c) недостаточной горизонтальностью приемной поверхности пиранометра;

d) нелинейностью характеристик чувствительности прибора;

e) результирующей плотностью потока длинноволновой радиации, поступающей из атмосферы к измерительному прибору.

Предпочтение следует отдавать калибровке пиранометра в обычном рабочем положении.

При калибровке по солнцу высота солнца должна определяться или рассчитываться до ближайшего значения с шагом 0,01° за этот период от истинного солнечного времени (см. приложение 7.D). Необходимо также отмечать среднюю температуру прибора или окружающей среды.

7.3.1.1 *Поверка по эталонному пиргелиометру и затеняемому эталонному пиранометру*

При этом методе, изложенном в ISO (1993), реакция пиранометра на суммарную радиацию калибруется по отношению к сумме отдельных измерений прямой и рассеянной составляющих. Следует выбирать периоды измерений при безоблачном небе и устойчивой солнечной радиации (устойчивость определяется по показаниям приборов). Прямая солнечная радиация определяется по показаниям пиргелиометра, а рассеянная небом радиация измеряется с помощью постоянно затеняемого эталонного пиранометра. При этом у пиранометра должен быть полностью затенен защитный стеклянный колпак. Соотношение диаметра затеняющего диска и его расстояние до приемной поверхности пиранометра должно соответствовать угловой апертуре пиргелиометра. При расчетах угла скоса должны использоваться диаметр затеняющего диска и внешний радиус защитного колпака, а не радиус чувствительного элемента пиранометра. Такая система затенения исключает радиацию от солнечного диска и околосолнечного ореола аналогично пиргелиометру.

Так как в ясный день рассеянная солнечная радиация составляет менее 15 % суммарной, не обязательно точно знать калибровочный коэффициент эталонного пиранометра. Однако необходимо учитывать нулевые сигналы обоих пиранометров, поскольку у некоторых пиранометров в условиях ясного неба нулевой сигнал может достигать 15 % от величины рассеянной радиации.

В этом случае калибровочный коэффициент рассчитывается по формуле:

$$E \cdot \sin h + V_s k_s = V \cdot k \tag{7.3}$$

или

$$k = (E \sin h + V_s k_s) / V \tag{7.4}$$

где E — прямая солнечная радиация, измеренная с помощью пиргелиометра (Вт·м$^{-2}$); V — сигнал на выходе калибруемого пиранометра под воздействием суммарной радиации (мкВ); V_s — сигнал на выходе затененного пиранометра, измеряющего рассеянную радиацию, (мкВ); h — высота солнца в момент измерения; k — калибровочный коэффициент калибруемого пиранометра, (Вт·м$^{-2}$·мкВ$^{-1}$); k_s — калибровочный коэффициент затененного эталонного пиранометра (Вт·м$^{-2}$·мкВ$^{-1}$). Измерения по обоим приборам должны выполняться синхронно.

Если в процессе измерений значения прямой и рассеянной радиации меняются в ходе сравнений, то для обеспечения репрезентативности данных рекомендуется произвести соответствующие выборки и осреднения.

7.3.1.2 *Поверка по эталонному пиргелиометру*

Этот способ, изложенный в ISO (1993), подобен методу, описанному в предыдущем разделе, с той лишь разницей, что суммарная радиация и рассеянная радиация измеряются одним и тем же калибруемым пиранометром. При обработке составляющая прямой солнечной радиации временно исключается из пиранометра путем затемнения всего его наружного стеклянного колпака, как это описано в 7.3.1.1. Время затенения зависит от устойчивости солнечной радиации и временной характеристики пиранометра, включая временной интервал, необходимый для уравновешивания теплового и длинноволнового излучения стеклянного колпака; в основном достаточно примерно 10 x 1/e постоянной времени термопары.

Разность между репрезентативными выходными сигналами затененного и незатененного пиранометра обусловлена вертикальной составляющей прямой солнечной радиации E, измеренной пиргелиометром. Таким образом:

$$E \cdot \sin h = (V_{\text{un}} - V_{\text{s}}) \cdot k \tag{7.5}$$

или

$$k = (E \cdot \sin h) / (V_{\text{un}} - V_{\text{s}}) \tag{7.6}$$

где E — прямая солнечная радиация, измеренная пиргелиометром (Вт·м$^{-2}$); V_{un} — сигнал на выходе пиранометра без затенения, мкВ; V_{s} — сигнал на выходе пиранометра при затенении (мкВ); h — высота солнца в момент измерений; k — калибровочный коэффициент калибруемого пиранометра (Вт·м$^{-2}$·мкВ$^{-1}$), представляющий собой величину, обратную чувствительности (мкВ·Вт$^{-1}$·м$^{-2}$).

Если в процессе измерений значения прямой и рассеянной радиации меняются в ходе сравнений, то для обеспечения репрезентативности данных рекомендуется произвести соответствующие выборки и осреднения, что особенно важно при поочередных измерениях незатененным и затененным одним и тем же пиранометром. Для снижения погрешностей, обусловленных недостаточной репрезентативностью измеренных сигналов, рекомендуется выполнять учащенные серии. При обработке используют интерполированные значения показаний пиранометра. Поскольку при измерениях суммарной и рассеянной радиации, выполняемых одним и тем же пиранометром, нулевые показания различаются несущественно, в уравнении 7.6 учитывать их нет необходимости.

7.3.1.3 ***Поочередная калибровка двух пиранометров с использованием пиргелиометра***

Этот способ использует те же самые приборы, что описаны в 7.3.1.1, но только используется пиргелиометр для обеспечения откалиброванных данных о радиации (E) и два пиранометра, которые требуется калибровать (Forgan, 1996). По этому способу два калибруемых пиранометра поочередно затеняются и освещаются солнцем аналогично уравнению 7.3. В ходе проведения серии снимаются несколько групп отсчетов, каждая из которых выполняется в следующем порядке: в первой группе один пиранометр (пиранометр А) не затенен и измеряет сигналы суммарной радиации (V_{gA}), а другой пиранометр (пиранометр В) затенен и измеряет сигналы рассеянной радиации (V_{dB}). Эти сигналы измеряются синхронно с измерением прямой солнечной радиации пиргелиометром. Затем аналогичным образом проводятся измерения во второй группе, при которых пиранометры меняются ролями: пиранометр А затенен и теперь измеряет сигналы рассеянной радиации (V_{dA}), а пиранометр В не затенен и измеряет сигналы суммарной радиации (V_{gB}). При обработке делается допущение, что для каждого пиранометра калибровочные коэффициенты рассеянной радиации (k_{d}) и суммарной радиации (k_{g}) являются одинаковыми и коэффициент калибровки пиранометра А выражается формулой:

$$k_{\text{A}} = k_{\text{gA}} = k_{\text{dA}} \tag{7.7}$$

при аналогичном допущении для коэффициентов пиранометра В. Тогда для времени t_0 в первоначальный период измененный вариант уравнения 7.3 является следующим:

$$E(t_0)\sin(h(t_0)) = k_{\text{A}} V_{\text{gA}}(t_0) - k_{\text{B}} V_{\text{dB}}(t_0) \tag{7.8}$$

Для времени t_1 во втором периоде, когда пиранометры меняются местами:

$$E(t_1)\sin(h(t_1)) = k_{\text{B}} V_{\text{gB}}(t_1) - k_{\text{A}} V_{\text{dA}}(t_1) \tag{7.9}$$

Поскольку единственными неизвестными в уравнениях 7.8 и 7.9 являются k_{A} и k_{B}, их можно получить для показателей времени (t_0, t_1). Два показателя, охватывающие некоторый диапазон высоты солнца, обеспечивают характеристики направленной чувствительности приборов. Итоговая информация калибровки для обоих пиранометров является репрезентативной в отношении суммарных коэффициентов калибровки и дает практически ту же информацию для метода 7.3.1.1, но при этом отсутствует необходимость в откалиброванном пиранометре.

Как и в методе 7.3.1.1, для получения коэффициентов с минимальной погрешностью этот метод поочередности требует, чтобы сигналы пиранометров были скорректированы для уменьшения влияния изменений радиации, произошедших при измерениях. Для снижения погрешностей в результате изменения характеристик, связанных с ориентацией, рекомендуется использовать два пиранометра той же самой модели и два наблюдения при $\sin h\,(t_0) \sim \sin h\,(t_1)$.

Этот метод идеально подходит к проведению автоматического полевого мониторинга путем непрерывных синхронных измерений прямой солнечной, рассеянной и суммарной радиации. Согласно имеющемуся опыту, сбор данных, необходимых для применения этого метода, может проводиться в течение одного дня при замене приборов в период нахождения солнца в верхней кульминации (в истинный полдень). Вместе с тем, на полевой станции можно использовать длительные периоды и дни с любой конфигурацией приборов для отбора данных при условии, что у пиргелиометра калибровка не просрочена.

7.3.1.4 *Сравнения с эталонным пиранометром*

Как указано в ISO (1992), этот метод заключается в одновременной работе в естественных условиях двух пиранометров (эталонного и подлежащего калибровке), установленных горизонтально рядом друг с другом, в течение достаточно продолжительного времени для получения репрезентативных результатов. Если приборы однотипны при одинаковой конфигурации для мониторинга, для сравнений достаточно одного-двух дней. Чем больше разница в типах приборов, тем больший период требуется для сравнений. Однако продолжительный период может быть заменен несколькими более короткими, включающими типичные природные условия (ясное небо, переменная облачность, сплошная облачность, дождь, снегопад и т. д.). Отклонение калибровочного коэффициента испытываемого пиранометра определяется непосредственно, однако в случае пиранометров различающихся типов результирующая погрешность скорее всего отражает различие в особенностях типов, а не стабильность проверяемого прибора. Отбор данных следует производить, когда солнечная радиация достаточно велика при небольших колебаниях. Каждое среднее значение соотношения R чувствительности испытываемого прибора к чувствительности эталонного прибора может быть использовано для расчета $k = R \cdot k_r$, где k_r — калибровочный коэффициент эталона и k — определяемый калибровочный коэффициент. Сбор данных может производиться в периоды флуктуаций солнечной радиации при условии, что время между изменениями меньше, чем постоянная времени $1/e$ пиранометров.

Средняя температура приборов или температура окружающей среды регистрируется в течение всех калибровочных работ в естественных условиях, с тем чтобы учитывать температурное влияние.

7.3.1.5 *Сравнения в лабораторных условиях*

Существуют два метода, в которых в качестве источника света используется искусственное освещение в лаборатории, обеспечивающее либо прямую, либо рассеянную радиацию. В обоих случаях проверяемый и эталонный пиранометры устанавливаются в одинаковых условиях экспозиции.

По одному из методов, освещение производится стабилизированной вольфрамовой лампой накаливания, установленной на конце оптической скамьи. Подходящим источником является галогенная лампа мощностью 0,5–1,0 кВт, вмонтированная в держатель с водяным охлаждением и принудительной вентиляцией. Ее излучение ограничивается солнечным спектром с помощью кварцевого окна. Такая лампа может использоваться, если эталон и калибруемый приборы характеризуются одинаковой спектральной чувствительностью. В общем случае может быть использована ксеноновая лампа высокого давления со светофильтрами, обеспечивающими спектральный состав ее излучения, близким к солнечному. В процессе калибровки устраняются потоки,

отраженные окружающими объектами, с помощью черных экранов. Обычно при этом радиацию, создаваемую лампой, поочередно измеряют эталонным и калибруемым пиранометрами, которые устанавливают точно в одном и том же месте. Повторяемость рядов данных при таком способе обеспечивается с высокой точностью (с погрешностью порядка 0,5 %).

При втором методе используется интегрирующая камера в форме сферы или полусферы, внутренняя поверхность которой покрыта диффузной белой краской с высокой отражательной способностью. Внутри камера освещается лампами (например, вольфрамовыми), и в ней располагают калибруемый и эталонный пиранометры. Поскольку сфера или полусфера имитируют небо с примерно равномерным зональным распределением яркости, при измерениях преобладают погрешности прибора, относящиеся к углам падения радиационных потоков менее 45°. Так как косинусная погрешность при таких углах, как правило, низкая, повторяемость результатов измерений с помощью интегрирующей сферы получается при отклонениях от среднего в пределах ±0,5 %. К источникам, используемым для освещения сферы, предъявляются такие же требования, как и в первом методе.

7.3.1.6 *Регулярный контроль калибровочных коэффициентов*

Существует несколько способов проверки постоянства метрологических характеристик пиранометров, зависящих от соответствующего оборудования на станции. Необходимо пользоваться любой возможностью проверки пиранометров в полевых условиях.

На тех полевых станциях, где имеются надежные эталоны (пиргелиометры или пиранометры), могут быть использованы методы калибровки, рассмотренные выше. При отсутствии эталонов могут использоваться другие методы. Если на станции одновременно производится регистрация также и прямой солнечной радиации, то анализируются две записи, как изложено в 7.3.1.2. Такую простую проверку следует проводить часто.

При одновременной регистрации суммарной и рассеянной радиации часто анализируются две записи определения согласованности. В условиях сплошной облачности суммарная и рассеянная радиация должны быть одинаковыми, и эти периоды можно использовать, когда для мониторинга рассеянной радиации используется постоянно затеняемый пиранометр. При использовании затеняющих колец рекомендуется убирать кольцо, чтобы пиранометр, измеряющий рассеянную радиацию, измерял суммарную радиацию без экранирования участка неба, и его данные можно было бы сопоставлять с одновременно получаемыми данными незатеняемого пиранометра, измеряющего суммарную радиацию.

Запись выверяется с помощью передвижного рабочего эталона, полученного с центральной сетевой станции или с ближайшей станции. И наконец, если калибровка производится не на станции, пиранометр можно просто заменить другим прибором, полученным с калибровочной станции. Любой из последних двух методов следует использовать, по крайней мере, раз в год. Пиранометры, измеряющие отраженную солнечную радиацию, обращаются приемной поверхностью вверх и проверяются рассмотренными методами.

7.3.2 **Характеристики пиранометров**

Для достижения желаемых норм точности необходимо соблюдать особую тщательность и уделять внимание деталям. Следует проводить оценку метрологических характеристик пиранометров и систем измерения, чтобы можно было оценить погрешность окончательных результатов. Например, было отмечено, что при непрерывной регистрации суммарной радиации без изменений рассеянной радиации и прямой солнечной радиации, дневные суммы, полученные с погрешностью менее 5 %, говорят о нормальной

и точной работе пиранометра. Подобным же образом, при использовании протокола, схожего с протоколом, предложенным WMO (2005*a*), погрешности дневных сумм могут составлять порядка 2 %.

7.3.2.1 *Установка датчика в горизонтальном положении*

Для проведения точных измерений суммарной радиации с помощью пиранометра важен контроль горизонтальности расположения приемной поверхности, например, с помощью уровня. Правильность уровня можно проверить в лаборатории на оптическом столе с использованием коллимированного пучка света лампы под углом 20°. Установочные винты пиранометра регулируются до тех пор, пока приемная поверхность пиранометра не примет такое положение, при котором при вращении его по азимуту положение остается горизонтальным. Затем, в случае необходимости, уровень перенастраивается для показания горизонтальности. Это называется радиометрической установкой в горизонтальное положение, и она подобна физической установке в горизонтальное положение приемной поверхности. Однако она будет неточной, если состояние поверхности термобатареи неоднородно.

7.3.2.2 *Изменение чувствительности, обусловленное колебаниями температуры окружающей среды*

В приборах на термобатареях отмечаются изменения чувствительности, связанные с колебаниями температуры прибора. Некоторые приборы снабжены схемами температурной компенсации для поддержания постоянной чувствительности в широком температурном диапазоне. Температурный коэффициент чувствительности может быть измерен в термокамере. Температура в камере изменяется ступенчато с шагом 10 °C в исследуемом диапазоне и удерживается постоянной на каждой ступени до стабилизации чувствительности прибора. По измеренным данным строится кривая зависимости показаний от температуры. Если максимальная процентная разница, обусловленная зависимостью чувствительности от температуры внешней среды, составляет 2 % или более, коррекция проводится на основе аппроксимации данных.

В случае отсутствия температурной камеры может быть применен метод стандартизации с помощью пиргелиометров (см. 7.3.1.1, 7.3.1.2 или 7.3.1.3) при различной температуре окружающей среды. Необходимо отметить также тот факт, что не только температура, но и, например, косинусная характеристика (а именно влияние высоты солнца) и нелинейность, проявляющаяся при изменениях величины измеряемой радиации, могут влиять на чувствительность.

7.3.2.3 *Изменение чувствительности в зависимости от ориентации*

Калибровочный коэффициент пиранометра может быть совершенно другим, если прибор используется при ориентации по азимуту, отличной от той, в которой он был калиброван. Исследование влияния ориентации на показания пиранометров может проводиться в лаборатории или с помощью метода стандартизации (см. 7.3.1.1 или 7.3.1.2). Рекомендуется откалибровать пиранометр при той ориентации, при которой он будет использоваться. Не рекомендуется коррекция, если характеристики чувствительности прибора не были определены при разнообразных условиях.

7.3.2.4 *Изменение чувствительности в зависимости от угла падения солнечных лучей*

Зависимость чувствительности пиранометра от высоты солнца и азимута известны как косинусная характеристика и азимутальная характеристика соответственно. В идеальном случае чувствительность приемника к солнечной радиации должна быть пропорциональна косинусу зенитного угла солнечного луча и постоянна для всех

азимутальных углов. Для пиранометров рекомендуется, чтобы косинусная погрешность (или процентная разница от идеальной косинусной чувствительности) была определена по крайней мере для двух углов высоты солнца, предпочтительно для 30° и 10°. В таблице 7.4 приведен рекомендуемый способ задания направленной чувствительности и указаны допустимые погрешности.

Для определения изменения чувствительности в зависимости от угла падения солнечных лучей могут быть использованы искусственные источники света, поскольку спектральное распределение солнечной радиации изменяется в зависимости от высоты солнца. Таким образом, при использовании солнца в качестве источника могут наблюдаться значительные изменения чувствительности в зависимости от высоты солнца, что в действительности является изменением, обусловленным неоднородностью спектральной чувствительности.

7.3.2.5 ***Погрешности определения часовых и суточных сумм***

Поскольку большинство пиранометров в сети используются для определения часовых или суточных сумм радиации (или средних значений за эти интервалы времени), ясно, что погрешности этих значений играют важную роль.

В таблице 7.4 приведены максимальные отклонения от истинного значения, за исключением калибровочных погрешностей. Из таблицы видно, что пиранометры в третьей графе (т. е. пиранометры посредственного качества) не могут быть использованы для определения часовых и суточных сумм, хотя их можно использовать для определения месячных и годовых сумм.

7.3.3 **Установка и техническое обслуживание пиранометров**

Место, выбранное для экспонирования пиранометра, не должно экранироваться окружающими объектами в любой момент каждого времени года. В то же время должен быть обеспечен доступ к прибору. В частности, пиранометр нельзя устанавливать вблизи построек, оград и пр., отражающих на прибор солнечные и рассеянные лучи и/или затеняющих горизонт.

В большинстве случаев плоская крыша является хорошим местом для размещения пиранометра. Если это невозможно, то пиранометр устанавливают на определенном расстоянии от мешающих объектов, с тем чтобы для пиранометра закрытость горизонта, особенно в азимутальных направлениях восхода и захода солнца, не превышала 5°. Сумма телесных углов экранирования пиранометра из других направлений не должна превышать 0,5 ср. В случае, если это невозможно, в нормативно-технической документации станции на графике закрытости горизонта должны быть нанесены все мешающие объекты, а также указаны их угловые и линейные размеры.

В случае необходимости изменения места расположения пиранометра и/или существенных изменений расположения мешающих объектов необходимо провести обследование места наблюдения перед новой установкой пиранометра. Для этого успешно используется обзорная камера, которая показывает линии азимутальных направлений и угловой высоты на негативе изображения. Серии экспонирования проводятся с целью их идентификации относительно плоскости приемной поверхности пиранометра в диапазоне азимутальных направлений 360°. В случае отсутствия обзорной камеры угловой контур препятствий (заграждающих объектов) может быть отображен с помощью теодолита или системы комбинации компаса и клинометра.

В нормативно-технической документации станции должны указываться высота пиранометра над уровнем моря (как сумма высоты станции и высоты пиранометра над землей), географические долгота и широта. Весьма полезно также иметь план местоположения станции в масштабе с указанием расположения самописца, пиранометра и всех соединительных кабелей.

При выборе места одним из важных критериев является возможность проведения частого контроля приборов. Весьма желательно, чтобы пиранометры и самописцы проверялись, по крайней мере, ежедневно, а по возможности и чаще.

Вышеизложенные рекомендации относятся в равной степени к установке пиранометров на судах, вышках и буях. Установка пиранометров на этих платформах затруднена и не всегда безопасна. В редких случаях прибор можно установить так, чтобы он не подвергался влиянию хотя бы одного препятствия (например, вышки). Вследствие колебаний такого типа площадок пиранометры подвержены волновому движению и вибрации. Необходимо принимать меры предосторожности, чтобы сохранять плоскость датчика в горизонтальном положении и демпфировать сильные колебания. Для этого требуется устанавливать пиранометр на специальном универсальном шарнире.

7.3.3.1 *Поправки на закрытость горизонта*

Если на пути прямого солнечного луча (легко обнаруживаемого в безоблачный день) имеется препятствие, запись должна корректироваться при любой возможности в целях снижения погрешности измерений.

Коррекция на экранирование рассеянной составляющей записи может осуществляться только в случае наличия раздельных записей суммарной и рассеянной радиации. Методика предусматривает, чтобы первой корректировалась рассеянная радиация, а затем – суммарная. Оценивается не часть затененного неба, а исходящая от этой части неба часть радиации. Поскольку рассеянная радиация от части неба ниже 5° составляет менее 1 % от рассеянной радиации, ею обычно можно пренебречь. Особое внимание уделяется экранирующим предметам с угловыми размерами 10° и более, а также и тем, которые могут преграждать путь солнечному лучу. Кроме того, нельзя забывать о том, что светлоокрашенные предметы могут отражать солнечную радиацию на приемник.

Строго говоря, при определении поправок на потери рассеянной радиации неба, обусловленные экранированием, необходимо учитывать колебания радиации неба от всей небесной полусферы. Однако практика показывает, что радиация одинакова во всех участках неба. Для определения уменьшения рассеянной радиации из-за экранирования объектами конечного размера может быть использована следующая формула:

$$\Delta E_{\text{sky}} = \pi^{-1} \int_{\phi} \int_{\Theta} \sin\theta \cos\theta d\,\theta d\,\varphi \qquad (7.10)$$

где θ — угол падения потока; ϕ — азимутальный угол; Θ — угловой размер объекта по вертикали (по высоте); φ — угловой размер объекта по азимуту.

Эта формула подходит только для препятствий с обращенной к пиранометру черной поверхностью. Для других объектов поправка должна быть умножена на редукционный множитель, зависящий от отражательной способности объекта. Яркий блеск снега под лучами низкого солнца может привести даже к противоположному знаку поправки.

7.3.3.2 *Установка пиранометров для измерения суммарной радиации*

Пиранометр надежно крепится к соответствующему монтажному столу через отверстия, предусмотренные в треногах или опорной плите. Следует принять необходимые меры предосторожности, чтобы во время установки не подвергать прибор механическим ударам или вибрации. Установка осуществляется следующим образом. Первоначально пиранометр устанавливается так, чтобы выходные клеммы или соединитель были направлены к северу от приемной поверхности. Это уменьшает нагрев электрических соединений солнцем. Приборы с термобатареями Моля-Горчинского устанавливаются таким образом, чтобы линия спая термопар (длинная сторона прямоугольной термобатареи) проходила с востока на запад. Такая ориентация прибора несколько противоречит первой, в зависимости от типа прибора, но имеет свое преимущество,

поскольку при необходимости соединительные линии могут быть затенены. Если поблизости находятся вышки, прибор можно установить как можно дальше от вышки в направлении к экватору.

Радиация, отраженная от земли или основания, не должна облучать корпус прибора снизу. Можно использовать цилиндрическое затеняющее устройство, но необходимо поддерживать условия естественной вентиляции, чтобы корпус прибора находился при температуре окружающей среды.

Затем пиранометр необходимо слегка закрепить крепежными винтами или болтами и установить в горизонтальном положении с помощью установочных винтов и уровня. После этого крепежные винты следует затянуть, не нарушая при этом горизонтальности, контролируемой по уровню.

Монтажный стол или платформа должны быть достаточно прочны и устойчивы с целью защиты прибора от сильных ударов и удержания приемной поверхности в горизонтальном положении, особенно во время сильных ветров и мощных потоков солнечной энергии.

Кабель, соединяющий пиранометр с самописцем, должен иметь две жилы и быть водонепроницаемым. Кабель должен быть прочно прикреплен к монтажному столу во избежание нарушения контакта в ветреную погоду. По возможности, кабель должен быть надежно заземлен и проложен под землей, если самописец располагается на расстоянии. Рекомендуется использовать экранированный кабель. Пиранометр, кабель и самописец должны иметь общую «землю» через проводник низкого сопротивления. Как в любом термоэлектрическом устройстве, перед пайкой необходимо проверить, чтобы во всех местах пайки было соединение меди с медью. Все открытые соединения должны быть водонепроницаемыми и защищены от физических повреждений. После проверки полярности цепи другой конец кабеля может быть соединен с системой сбора данных согласно существующей инструкции.

7.3.3.3 *Установка пиранометров для измерения рассеянной радиации*

Для измерения или регистрации только рассеянной радиации чувствительный элемент должен быть защищен от прямой солнечной радиации затеняющим устройством. При непрерывной регистрации пиранометр обычно затеняется либо небольшим металлическим диском, удерживаемым на пути солнечного луча с помощью следящего устройства за солнцем, либо затеняющим кольцом, укрепленным на полярной оси.

Первый метод связан с поворотом тонкого стержня с закрепленным на его конце затеняющим экраном синхронно с движением солнца. Если слежение за солнцем обеспечивается мотором синхронно с движением солнца или по таблицам движения солнца, то для обеспечения надежной работы и корректировки необходим частый контроль его работы, поскольку без этого трудно выявить бракованные записи. Системы слежения за солнцем с солнечным ориентиром сводят к минимуму вероятность появления таких проблем. Второй метод в целях снижения погрешностей результатов измерений рассеянной радиации требует личного внимания персонала станции и внесения соответствующих поправок с учетом эффекта экранирования зоны неба затеняющим кольцом. При этом должны учитываться зональное распределение рассеянной радиации по небу и размеры затеняющего кольца. Погрешность, вносимая затеняющим кольцом без корректировки и при корректировке, оценивается по сравнению с результатами измерений, выполняемых на следящей системе с затенением пиранометра диском. Детали конструкции затеняющего кольца и необходимые поправки приводятся в приложении 7.E.

Одним из существенных источников погрешностей в данных рассеянной радиации является нулевой сигнал пиранометра. В условиях безоблачного неба нулевой сигнал у некоторых моделей приборов эквивалентен 5–10 Вт·м$^{-2}$ и может достигать 15 % от значения рассеянной радиации. В Руководстве по эксплуатации опорной сети для измерения приземной радиации (WMO, 2005*a*) приводятся методы сведения к минимуму влияния нулевого сигнала.

Установка пиранометра для измерения рассеянной радиации подобна установке пиранометра для измерения суммарной солнечной радиации. Однако имеются определенные сложности монтажа экваториального устройства или затеняющего кольца. Расстояние от него до пиранометра, измеряющего суммарную радиацию, должно быть таким, чтобы затеняющее кольцо или диск не могли затенять этот пиранометр. Это особенно важно в высоких широтах, где высота солнца невелика.

Так как рассеянная радиация безоблачного неба может составлять менее 1/10 суммарной радиации, особое внимание необходимо уделять порогу срабатывания регистрирующей системы.

7.3.3.4 *Установка пиранометров для измерения отраженной радиации*

Высота установки пиранометра над поверхностью земли должна составлять 1–2 м. В летнее время травяной покров должен регулярно подстригаться. Для районов, в которых бывает снежный покров, зимой необходимо предусмотреть механизм регулировки высоты пиранометра над поверхностью снега с целью сохранения постоянного расстояния от нее до пиранометра. Монтажное устройство не должно ограничивать поле зрения прибора, но должно быть сконструировано таким образом, чтобы погрешность измерений составляла менее 2 %. При подходе к пиранометру (для контроля его горизонтальности и эксплуатационного ухода) не должно нарушаться естественное состояние подстилающей поверхности под пиранометром, особенно при наличии снежного покрова.

7.3.3.5 *Техническое обслуживание пиранометров*

Состояние пиранометров, установленных для непрерывных измерений, должно проверяться не реже одного раза в сутки, а при выпадении гидрометеоров — чаще. Во время обследования стеклянный колпак прибора вытирают чисто и досуха (необходимо проявлять осторожность и не нарушать ход процесса измерений в дневное время). При наличии на нем смерзшегося снега, льда, инея или изморози эти отложения необходимо удалять очень осторожно с использованием специальной жидкости (антифриза) до полной очистки стеклянной поверхности. Ежесуточные проверки должны обеспечивать также поддержание прибора в горизонтальном положении, отсутствие конденсации на внутренней поверхности стеклянного колпака и ненарушенность состояния черного покрытия приемной поверхности.

На отдельных станциях стеклянный колпак пиранометра постоянно вентилируется, что предотвращает или уменьшает количество осаждений в холодную погоду и снижает разницу в температуре между колпаком и корпусом. Разность температур между вентилирующим воздухом и воздухом окружающей среды не должна превышать 1 K. Если на колпаке появляются загрязненные участки или пыль, процесс протирки должен быть очень осторожным, желательно после предварительного сдува или легкого смачивания во избежание царапин на поверхности, которые могут значительно изменить прозрачность материала колпака. Сушилки должны быть наполнены активным веществом (обычно силикагелем, имеющим характерную окраску).

7.3.3.6 *Установка и техническое обслуживание пиранометров на специальных платформах*

Особенно тщательно следует устанавливать оборудование на различных платформах, таких как суда, буи, вышки и летательные аппараты. Датчики солнечной радиации, установленные на судах, должны быть снабжены карданными подвесами по причине быстрого перемещения платформы.

Если вышка предназначена исключительно для актинометрического оборудования, на ней должна быть смонтирована прочная платформа, на которой могут быть установлены

датчики. Детали вышки, закрывающие горизонт, должны находиться с северной стороны платформы, а стрелы, на которых установлены альбедометры, должны быть направлены на юг.

Актинометрические датчики устанавливают как можно выше над поверхностью воды на судах, буях и вышках для защиты их от брызг.

В течение ряда лет успешно проводятся актинометрические измерения с летательных аппаратов. В этом случае необходимо особенно тщательно выбирать пиранометр и условия установки.

Особое внимание следует уделять установке пиранометров тех систем, которые затруднительно обслуживать, в целях обеспечения надежности результатов наблюдений. Поэтому желательно предусмотреть своеобразную страховку в виде установки дублирующих систем измерений в определенных критически важных местах.

7.4 ИЗМЕРЕНИЕ ИНТЕГРАЛЬНОЙ И ДЛИННОВОЛНОВОЙ РАДИАЦИИ

Измерение интегральной по спектру радиации включает измерение одновременно коротковолновой солнечной радиации (300–3 000 нм) и длинноволновой радиации земной поверхности и атмосферы (3 000–100 000 нм). Для таких измерений используются пиррадиометры. Они могут использоваться для измерения как приходящей, так и уходящей радиации, а с помощью пары пиррадиометров можно измерить разность их, т. е. радиационный баланс. Для измерения радиационного баланса также используется один пиррадиометр, имеющий два приемника, один из которых обращен вверх, а другой — вниз. Такой датчик должен быть неселективным во всем спектральном диапазоне от 300 до 100 000 нм.

Измерения длинноволновой радиации могут осуществляться либо непосредственно с помощью пиргеометров, либо косвенно, путем вычитания коротковолновой радиации из суммарной. Большинство пиргеометров исключают коротковолновую радиацию с помощью фильтров, имеющих близкую прозрачность в длинноволновой области спектра и непрозрачных в области 300–3 000 нм. Некоторые пиргеометры, не имеющие фильтров или с фильтрами, не исключающими радиацию в области менее 3 000 нм, могут использоваться только в ночное время.

Поток длинноволновой радиации L^{-}, измеряемый пиргеометром или пиррадиометром, имеет два компонента: значение радиации, определяемое по непосредственным показаниям прибора без учета собственного излучения; радиация, создаваемая зависящим от температуры излучением абсолютно черного тела, которое предполагается у приемной поверхности пиргеометра:

$$L^{-} = L^{*} + \sigma T_s^4 \qquad (7.11)$$

где σ — постоянная Стефана-Больцмана (5,6704 · 10^{-8} Вт·м$^{-2}$·К$^{-1}$); T_s — температура приемной поверхности пиргеометра (К); L^{-} — энергетическая освещенность, либо измеряемая с помощью эталонного пиргеометра, либо вычисляемая по температуре черной полости над верхним приемником (Вт·м$^{-2}$); L^{*} — радиация, измеренная приемником (Вт·м$^{-2}$). Измерение коротковолновой составляющей пиррадиометром проводится в соответствии с описанием в 7.3.

7.4.1 Приборы для измерения длинноволновой радиации

За последнее десятилетие достигнут значительный прогресс в измерениях земной радиации с помощью пиргеометров, в особенности с появлением пиргеометров с кремниевым колпаком, которые обеспечивают измерения земной радиации с

относительно высокой точностью. Тем не менее, измерение земной радиации продолжает оставаться наиболее трудным и менее изученным, чем измерение солнечной радиации. Анализ источников погрешностей приводится в таблице 7.5.

Разработаны пиргеометры двух типов: в первом типе приборов приемная поверхность термобатареи покрывается полусферическим колпаком, внутри которого размещается интерференционный фильтр; во втором типе термобатарея покрывается плоской пластиной, на которой размещается интерференционный фильтр. В обоих случаях поверхность, на которой размещается интерференционный фильтр, сделана из кремния. Первый тип прибора обеспечивает поле зрения в полной полусфере, тогда как второй имеет поле зрения 150°, при этом полусферический поток моделируется согласно рекомендациям завода-изготовителя. Аргументом в пользу применения последнего метода является то, что размещение фильтров на внутренней поверхности полусферы приводит к более высокой погрешности, чем моделирование потока при углах падения менее 30°. Оба типа приборов действуют на том принципе, что величина, измеренная непосредственно прибором, представляет собой разность между энергетической освещенностью, создаваемой источником, и радиационной температурой черного тела прибора. В целом пиргеометр, измеряющий земную радиацию, действует по принципу, дополняющему уравнение 7.11:

$$L^{-} = L^{*} + k_2 \sigma T_s^4 + k_3 \sigma \left(T_d^4 - T_s^4 \right) \tag{7.12}$$

где k_2 учитывает характеристики излучения термопары и неопределенности в измерении температуры холодной поверхности термопары; k_3 — чувствительность купола приемника к длинноволновой радиации (мкВ/(Вт·м$^{-2}$)); и T_d — температура купола приемника (K).

Суммарный радиационный поток, измеренный приемником L^*, определяется формулой:

$$L^{*} = U/C \left(1 + k_1 \sigma T_s^4 \right) \tag{7.13}$$

где C — чувствительность приемника (мкВ/(Вт·м$^{-2}$)), k_1 — остаточный температурный коэффициент приемника. Хотя последние современные пиргеометры имеют компоновку электрической схемы с учетом температурной поправки, реализованную в их приемниках для того, чтобы k_1 был близок к нулю (как описано в 7.3.2.2), все ещё рекомендуется задавать k_1 определением характеристик в лабораторных условиях, как это описывается в 7.4.3.

В сравнениях, проведенных за последнее время, участвовали приборы аналогичной конструкции в разнообразных сочетаниях измерений. Такие исследования показали, что при соблюдении тщательной поверки потоки радиации, измеряемые ночью, согласуются с погрешностью в пределах ±1 Вт·м$^{-2}$. Однако при наличии значительной солнечной радиации различия между приборами могут быть существенными. Причиной такого большого несоответствия является то, что кремниевый колпак с интерференционным фильтром может пропускать солнечную радиацию и не являться идеальным рефлектором солнечной энергии, в результате чего солнечная составляющая может доходить до приемника и происходит солнечный нагрев. Обусловленные этим погрешности могут быть уменьшены до ±2 Вт·м$^{-2}$ посредством затенения прибора, подобно тому, как это делается при измерении рассеянной солнечной радиации, вентиляции прибора, согласно рекомендациям ИСО (ISO, 1990*a*), учета температуры колпака и корпуса прибора. На основе этих и других сравнений могут быть сформулированы следующие рекомендации для измерения длинноволновой радиации:

a) при использовании пиргеометров, имеющих контур со встроенной электрической батареей для учета излучения абсолютно черного тела на прибор, следует принимать всевозможные меры для обеспечения правильной эксплуатации этой батареи. Даже небольшое изменение в напряжении батареи значительно скажется на точности измерений. При любой возможности батарею следует извлекать из прибора и измерять температуру корпуса прибора непосредственно в соответствии с инструкцией завода-изготовителя;

Таблица 7.5. Источники погрешностей при измерениях пиррадиометрами

Источник погрешности	*Характер влияния на пиррадиометры*		*Влияние на результат измерения*	*Способ определения характеристик*
	С входным окном	*Без входного окна*		
Влияние защиты	Спектральные характеристики пропускания	Нет	a) Изменение спектральной характеристики калибровки b) Уменьшение радиации на приемнике, обусловленное коротковолновым рассеянием в защитном окне (зависит от его толщины) c) Старение и другие изменения приемника	a) Определение спектрального ослабления защиты b) Определение влияния рассеянной радиации или эффекта при изменениях угла падения радиации c) Спектральный анализ: сравнение с новой защитой; определение ослабления защитой
Влияние конвекции	Изменения, обусловленные не радиационным обменом: в окружении приемник-защита (термическое сопротивление)	Изменения, обусловленные не радиационным обменом: приемник-воздух (вариации в изменениях коэффициента)	Неконтролируемые изменения, обусловленные ветром, являются критическими при расчетах дивергенции радиационных потоков в нижних слоях атмосферы	Исследования динамических характеристик прибора в функции температуры и скорости ветра
Влияние гидрометеоров (дождь, снег, изморозь и др.) и дымки	Вариации спектрального пропускания плюс нерадиационный нагрев теплопроводностью	Вариации спектральной характеристики приемника и теплопотери на испарение	Изменения, обусловленные вариациями спектральной характеристики приемника и нерадиационным переносом энергии	Исследование влияния скорости обдува при вентиляции
Свойства приемной поверхности (излучательной способности)	Зависит от спектрального поглощения черного покрытия приемной поверхности		Изменение калибровочного коэффициента a) Как функция спектральной чувствительности b) Как функция величины и азимута приходящей радиации c) Как функция влияния температуры	a) Спектрофотометрический анализ калибровки поглощающей поверхности b) Исследования чувствительности приемника в зависимости от угла падения радиации

Источник погрешности	*Характер влияния на пиррадиометры*		*Влияние на результат измерения*	*Способ определения характеристик*
	С входным окном	*Без входного окна*		
Влияние температуры	Нелинейность температурной зависимости приемника		Требуется знание температурного коэффициента	Исследование влияния скорости вентиляции на этот эффект
Эффект асимметрии	a) Различия теплопоглощения и отражения между приемниками, обращенными вверх и вниз b) Различия вентиляции приемников, обращенных вверх и вниз c) Контроль и регулировка расположения поверхностей		a) Влияние на постоянную времени прибора b) Погрешность определения калибровочного коэффициента обоих приемников	a) Контроль теплоемкости приемных поверхностей обоих приемников b) Контроль постоянной времени а узких интервалах температуры

На основе этих и других сравнений могут быть сформулированы следующие рекомендации для измерения длинноволновой радиации:

a) при использовании пиргеометров, имеющих контур со встроенной электрической батареей для учета излучения абсолютно черного тела на прибор, следует принимать всевозможные меры для обеспечения правильной эксплуатации этой батареи. Даже небольшое изменение в напряжении батареи значительно скажется на точности измерений. При любой возможности батарею следует извлекать из прибора и измерять температуру корпуса прибора непосредственно в соответствии с инструкцией завода-изготовителя;

b) по мере возможности следует измерять температуру корпуса и колпака прибора и использовать ее при обработке результатов измерений;

c) прибор должен вентилироваться;

d) для получения наилучших результатов прибор должен быть экранирован от прямых солнечных лучей с помощью следящего за солнцем диска, как и при измерении рассеянной радиации.

Эти приборы должны проходить калибровку в национальных или региональных калибровочных центрах с использованием эталонных пиргеометров, полученных от Всемирной группы по инфракрасным стандартам (ВИСГ) пиргеометров МРЦ Давос, которая регулируется структурой управления, описанной в Приложении F.

7.4.2 Приборы для измерения суммарной радиации

Одной из проблем приборов для измерения суммарной радиации является отсутствие абсорберов, неселективных в большом диапазоне длин волн. Также трудно найти приемлемые фильтры с постоянными характеристиками пропускания излучения в диапазоне 300–100 000 нм. Поэтому рекомендованным методом для измерения суммарной радиации является выполнение одновременных раздельных измерений коротко- и длинноволновой радиации с использованием пиранометра и пиргеометра соответственно.

Использование термически чувствительных датчиков требует точного знания теплового баланса датчика. В ином случае необходимо снижать потери конвективного тепла датчика почти до нуля методом защиты датчика от прямого воздействия ветра. Технические трудности, связанные с такими потерями тепла, в значительной степени обусловлены тем, что остаточные радиационные потоки определяются менее точно, чем суммарные радиационные потоки. На практике, различные лаборатории разработали собственные пиррадиометры на технической базе, которую они считают наиболее эффективной в отношении снижения переноса конвективного тепла в датчике. За последние несколько десятилетий были созданы хотя и несовершенные, но основанные на надежных принципах измерения пиррадиометры. Существует целый ряд пиррадиометров, использующих различные методы устранения влияния ветра:

a) без защиты, в этом случае используются эмпирические формулы для коррекции влияния ветра;

b) определение влияния ветра с использованием электрического нагрева;

c) стабилизация влияния ветра с помощью искусственной вентиляции;

d) устранение влияния ветра путем защиты датчика от ветра.

Длинноволновый компонент пиррадиометров описывается уравнением 7.11.

В таблице 7.5 приводятся источники погрешностей, возникающих в ходе пиррадиометрических измерений, и предлагаются способы их определения.

Трудно определить точность, достижимую на практике. Сравнения пиррадиометров различных конструкций, установленных в разных местах, дают результаты, показывающие различия в данных от 5 % до 10 % в благоприятных условиях. Для улучшения таких результатов необходимо проводить тщательные лабораторные исследования, кроме сравнений в местах установки, для того чтобы по отдельности оценить различные эффекты.

Наибольшая точность значений суммарной радиации достигается путем раздельных измерений коротковолновой и длинноволновой составляющих радиации, и этот метод рекомендуется для проведения измерений пиррадиометрами. Коротковолновую радиацию можно измерять с использованием методик, указанных в 7.2 и 7.3, а длинноволновую радиацию можно измерять пиргеометрами.

В таблице 7.6 приведены характеристики пиррадиометров различных уровней точности, а также погрешности, которые можно ожидать при проведении измерений с их помощью.

7.4.3 Калибровка пиргеометров

Пиррадиометры и балансомеры для измерения коротковолновой радиации можно поверять тем же способом, что и пиранометры (см. 7.3.1) с использованием в качестве источника радиации солнца и неба. В случае балансомера с одним приемником его поверхность, направленная вниз, облучается постоянным источником, например, камерой-излучателем с известной и постоянной температурой.

Поверку эталонных радиометров для измерения длинноволновой радиации лучше всего проводить в лабораторных условиях с помощью черных тел в виде полостей, однако для сетевых измерений предпочтительны сравнения в ночное время с

Таблица 7.6. Характеристики находящихся в эксплуатации пиррадиометров

Характеристика	*Высокий класс качества*[a]	*Хороший класс качества*[b]	*Средний класс качества*[c]
Порог чувствительности ($Вт \cdot м^{-2}$)	1	5	10
Стабильность (изменение в год в % от полной шкалы)	2 %	5 %	10 %
Косинусная погрешность при высоте солнца 10°	3 %	7 %	15 %
Азимутальная погрешность при высоте солнца 10° (отклонение от среднего, дополнительно к косинусной)	3 %	5 %	10 %
Температурная зависимость (в диапазоне от –20 °C до 40 °C) (отклонение от среднего)	1 %	2 %	5 %
Нелинейность (отклонение от среднего)	0,5 %	2 %	5 %
Различия в спектральной чувствительности, полученной интегрально для области длиннее 200 нм для диапазона от 300 до 75 000 нм	2 %	5 %	10 %

Примечания:

[a] Близкие к современному передовому уровню; используются только на станциях со специализированным оборудованием и квалифицированным персоналом.

[b] Пригодны для сетевых измерений.

[c] Пригодны для использования на недорогой сети с измерениями средней точности.

эталонными приборами. В случае поверки чувствительного элемента приходящая радиация L^{-} измеряется отдельно с помощью пиргеометра или же с помощью камеры-излучателя с характеристиками абсолютно черного тела. В этом случае сигнал V от суммарного радиационного потока на выходе прибора (на основании уравнения 7.11) определяется по формуле:

$$V = L^{*} \cdot K \text{ or } K = V / L^{*} \tag{7.14}$$

где V — сигнал на выходе прибора (мкВ); K — чувствительность (мкВ/(Вт·м$^{-2}$)).

Рекомендуется периодически проверять чувствительность прибора в месте установки путем тщательного выбора состояния окружающей среды при медленно изменяющихся потоках. Пиргеометры должны также периодически проходить контроль на предмет изменения пропускания коротковолновой радиации.

Симметрия балансомеров требует регулярной проверки. Она осуществляется путем переворачивания прибора или пары приборов на месте их установки и выявления каких-либо различий на выходе. Разность более 2 % от полной шкалы между двумя положениями балансомера требуют новой поверки прибора, поскольку либо скорости вентиляции, либо коэффициенты абсорбции значительно отличаются для двух приемных поверхностей. Такие же испытания необходимо проводить во время поверки балансомеров или их установки.

7.4.4 Установка пиррадиометров и пиргеометров

Пиррадиометры и пиргеометры обычно устанавливают на открытых местах или в местах, закрытость горизонта в которых не превышает 5° в любом из азимутальных направлений, во избежание экранирования солнечных лучей в любое время года, даже при низкой высоте солнца.

Состояние прибора следует проверять ежедневно, чтобы убедиться в следующем:

a) прибор располагается горизонтально;

b) все приемники и средства их защиты содержатся в чистоте, на них нет росы, инея, снега или дождевой воды;

c) колпак не запотел изнутри (всю влагу, образующуюся за счет внутренней конденсации, следует вытирать);

d) черные поверхности приемников не имеют повреждений (благодаря чему их излучательная способность близка к 1).

В большинстве случаев невозможно измерить напрямую отраженную солнечную радиацию и уходящую длинноволновую радиацию на уровне земной поверхности, поэтому для получения восходящих компонентов пиррадиометры или пиранометры и пиргеометры обычно устанавливают на определенной высоте от поверхности земли. Таким способом можно измерить всю радиацию, приходящую от поверхности под датчиком. Для этих приборов, имеющих угол обзора 2π ср и установленных на высоте 2 м над поверхностью земли, 90 % всей измеренной радиации приходит от поверхности диаметром 12 м (это число составляет 95 % — для поверхности диаметром 17,5 м и 99 % — для поверхности диаметром 39,8 м) при условии, что зависимость чувствительности приемника согласуется с законом Ламберта.

Интегрирование всей энергии, поступающей со сравнительно обширной круглой поверхности, целесообразно в тех случаях, когда для района наблюдений характерны большие местные вариации относительной излучающей способности, для чего балансомер устанавливается достаточно высоко над поверхностью. Это позволяет получить угол обзора, репрезентативный для данной местности. Выходной сигнал датчика, расположенного слишком близко к поверхности, будет подвергаться большому

влиянию своей собственной тени, и кроме того, он будет наблюдать нерепрезентативную часть местности. С другой стороны, показания балансомера, расположенного слишком далеко от поверхности, могут быть нетипичными для длинноволнового излучения вблизи этой поверхности из-за нерегистрируемой дивергенции радиационного потока. Над невысокой однородной растительностью пиррадиометры устанавливают на высоте 2 м. Если растительность высокая, например лес, то высота установки пиррадиометров должна быть достаточной для устранения влияния неоднородности поверхности.

7.4.5 Регистрация и преобразование данных

Все, что сказано в 7.1.3, применяется к пиррадиометрам и пиргеометрам. Кроме того, на показания этих радиометров могут оказывать влияние следующие факторы, которые должны регистрироваться:

a) воздействие гидрометеоров (дождя, снега, росы, инея) на незащищенные и невентилируемые приборы;

b) воздействие ветра и температуры воздуха;

c) дрейф нуля измерительной системы. Это более важно для пиррадиометров, которые могут давать отрицательные значения, чем для пиранометров, у которых нулевой сигнал интенсивности излучения является характеристикой результирующей интенсивности излучения на поверхности чувствительного элемента.

Особое внимание следует обратить на расположение приборов, когда определяемая длинноволновая радиация получается путем вычитания показаний пиранометра из показаний пиррадиометра. Оба прибора должны располагаться на расстоянии 5 м друг от друга таким образом, чтобы они находились в одинаковых условиях окружающей среды.

7.5 ИЗМЕРЕНИЕ СПЕЦИАЛЬНЫХ РАДИАЦИОННЫХ ПАРАМЕТРОВ

7.5.1 Измерение дневной освещенности

Освещенность создается на поверхности потоком лучистой энергии в спектральном диапазоне, заключенном между 380 и 780 нм, оцениваемым посредством реакции человеческого глаза на энергию в этом диапазоне длин волн. МКО определила, что максимум реакции человеческого глаза приходится на длину волны 555 нм. Относительная спектральная чувствительность стандартного человеческого глаза показана на рисунке 7.2 и приведена в таблице 7.7. Световая эффективность определяется соотношением между плотностью излучения (Вт·м$^{-2}$) и излучательностью (лм). Она является функцией спектральной световой чувствительности человеческого глаза $V(\lambda)$ и константы K_m (683), показывающей количество люменов, приходящихся на 1 Вт электромагнитного излучения (ЭМИ) монохроматического источника с длиной волны 555,19 нм (точка замерзания платины):

$$\Phi_v = K_m \int_{380}^{780} \Phi(\lambda) V(\lambda) d\lambda \qquad (7.15)$$

где Φ_v — освещенность (лм·м$^{-2}$ или лк); $\Phi(\lambda)$ — спектральный лучевой поток (Вт·м$^{-2}$·нм$^{-1}$); $V(\lambda)$ — чувствительность человеческого глаза; K_m — константа, соотносящая световые параметры с радиационными. Таким образом, 99 % видимой радиации лежит в диапазоне 400–730 нм.

Параметры и единицы световых переменных приводятся в приложении 7.A.

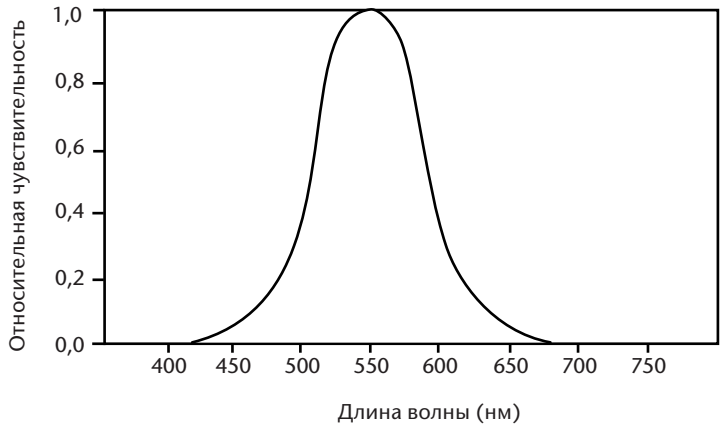


Рисунок 7.2. Относительная спектральная чувствительность $V(\lambda)$ человеческого глаза для дневного зрения.

Таблица 7.7. Значения относительной спектральной световой чувствительности человеческого глаза (единица при длине волны максимальной чувствительности)

Длина волны (нм)	*Относительная чувствительность $V(\lambda)$*	*Длина волны (нм)*	*Относительная чувствительность $V(\lambda)$*
380	0,00004	590	0,757
390	0,00012	600	0,631
400	0,0004	610	0,503
410	0,0012	620	0,381
420	0,0040	630	0,265
430	0,0116	640	0,175
440	0,023	650	0,107
450	0,038	660	0,061
460	0,060	670	0,032
470	0,091	680	0,017
480	0,139	690	0,008 2
490	0,208	700	0,004 1
500	0,323	710	0,002 1
510	0,503	720	0,001 05
520	0,710	730	0,000 52
530	0,862	740	0,000 25
540	0,954	750	0,000 12
550	0,995	760	0,000 06
560	0,995	770	0,000 03
570	0,952	780	0,000 015
580	0,870		

7.5.1.1 *Приборы*

Приборы для измерения освещенности (иллюминометры или люксметры) включают в себя фотогальванический детектор, один или несколько фильтров, позволяющих получить чувствительность, соответствующую кривой $V(\lambda)$, а также часто цепь регулирования температуры для обеспечения устойчивости сигнала. МКО разработала подробное руководство по измерению дневной освещенности (CIE, 1994), в котором описаны рекомендованная практика установки оборудования, характеристики приборов, процедуры сбора данных и контроль качества на первом начальном уровне.

Измерение суммарной освещенности ведется параллельно с измерением суммарной солнечной радиации. Стандартный люксметр должен предусматривать регулирование температуры или коррекцию на температуру в диапазоне, по крайней мере, от –10 °C до 40 °C. Кроме того, он должен вентилироваться для предотвращения конденсации и/или нарастания льда на внешней поверхности приемника. Как правило, люксметр должен быть способен измерять освещенность в диапазоне 1–20 000 лк. В этом диапазоне погрешности должны оставаться в пределах, указанных в таблице 7.8. Эти значения основаны на рекомендациях МКО (CIE, 1987) в отношении погрешностей высококачественных люксметров, специально предназначенных для измерения дневной освещенности на открытом воздухе.

Рассеянная освещенность неба может измеряться способом, аналогичным при измерении рассеянной солнечной радиации. Измерения прямой солнечной освещенности должны проводиться с помощью приборов, имеющих поле зрения с половиной центрального угла приемника излучения не более 2,85° и углом скоса диафрагм приемника излучения менее 1,76°.

7.5.1.2 *Поверка*

Поверка люксметров должна проводиться по стандартному люксметру типа A согласно процедурам, рекомендованным МКО (ICE, 1987). Такое оборудование, как правило, имеется только в национальных лабораториях эталонов. Поверка люксметра и проверка других его характеристик должны проводиться ежегодно. Сюда должны входить также проверки старения, дрейфа нуля, механической и климатической устойчивости. Рекомендуется также, чтобы в промежутках между лабораторными поверками использовались полевые стандарты (рабочие эталоны) для поверки на каждой измерительной станции.

Таблица 7.8. Характеристики люксметров

Параметр	*Погрешность, %*
$V(\lambda)$, не более	2,5
Чувствительность к УФ-излучению	0,2
Чувствительность к инфракрасному излучению	0,2
Косинусная характеристика	1,5
Усталость при 10 клк	0,1
Температурный коэффициент	0,1 K^{-1}
Нелинейность	0,2
Время срабатывания	0,1 с

7.5.1.3 ***Регистрация и преобразование данных***

МКО рекомендовала в процессе измерений освещенности регистрировать следующие характеристики:

a) суммарную и рассеянную дневную освещенность горизонтальных и вертикальных поверхностей;

b) прямую солнечную освещенность;

c) яркость неба в телесных углах в границах 0,08 ср (примерно 10° · 10°) небосвода;

d) альбедо в видимой области спектра таких характерных поверхностей, как трава, земля, снег и т. д.

Зачастую требуются часовые и суточные суммы освещенности. Для представления данных о яркости весьма полезны стереографические карты с изолиниями равной яркости.

7.6 ИЗМЕРЕНИЕ УЛЬТРАФИОЛЕТОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

Измерения солнечного ультрафиолетового (УФ) излучения требуются в связи с его влиянием на окружающую среду и здоровье человека, а также ввиду увеличения УФ-излучения у поверхности Земли в результате разрушения озонового слоя (Kerr and McElroy, 1993) и изменения других параметров, таких как облачность и аэрозоли. Спектр ультрафиолетового излучения условно разделен на три части:

a) УФ-A — это излучение в полосе длин волн 315–400 нм, т. е. непосредственно за пределами видимого спектра. Обычно[1] оно менее биологически активно, и его интенсивность у поверхности Земли не изменяется значительно в зависимости от содержания озона в атмосфере;

b) УФ-B — это излучение в полосе 280–315 нм. Оно биологически активно, и его интенсивность у поверхности Земли зависит от содержания озона в атмосфере, а также от длины волны. Частым проявлением его биологической активности является эритемный эффект, т. е. в какой степени это излучение вызывает покраснение кожи человека;

c) УФ-C — это излучение с длинами волн 100–280 нм. Оно полностью поглощается в атмосфере и в естественных условиях не достигает поверхности Земли.

Наибольший интерес к измерениям УФ-излучения сосредоточен на полосе УФ-B. Часто применяемым, но нестандартным определением границы между УФ-A и УФ-B является длина волны 320 нм вместо 315 нм.

Измерение ультрафиолетового излучения затруднено в связи с небольшим количеством энергии, достигающей поверхности Земли; изменчивостью содержания озона в стратосфере и быстрым увеличением потоков с длиной волны. На рисунке 7.3 показаны изменения в спектральном составе ультрафиолетовой энергетической освещенности ($Вт \cdot м^{-2} \cdot нм^{-1}$) в диапазоне между 290 и 325 нм на верхней границе атмосферы и у поверхности. На суммарную ультрафиолетовую энергетическую освещенность оказывают влияние облака и, в меньшей степени, атмосферные аэрозоли.

Большое влияние оказывает также подстилающая поверхность вследствие многократного рассеяния падающего на нее излучения, особенно в районах, покрытых снегом.

---

[1] Спектр воздействия фотосинтеза на фитопланктон, к примеру, представляет собой важный компонент в УФ-A.

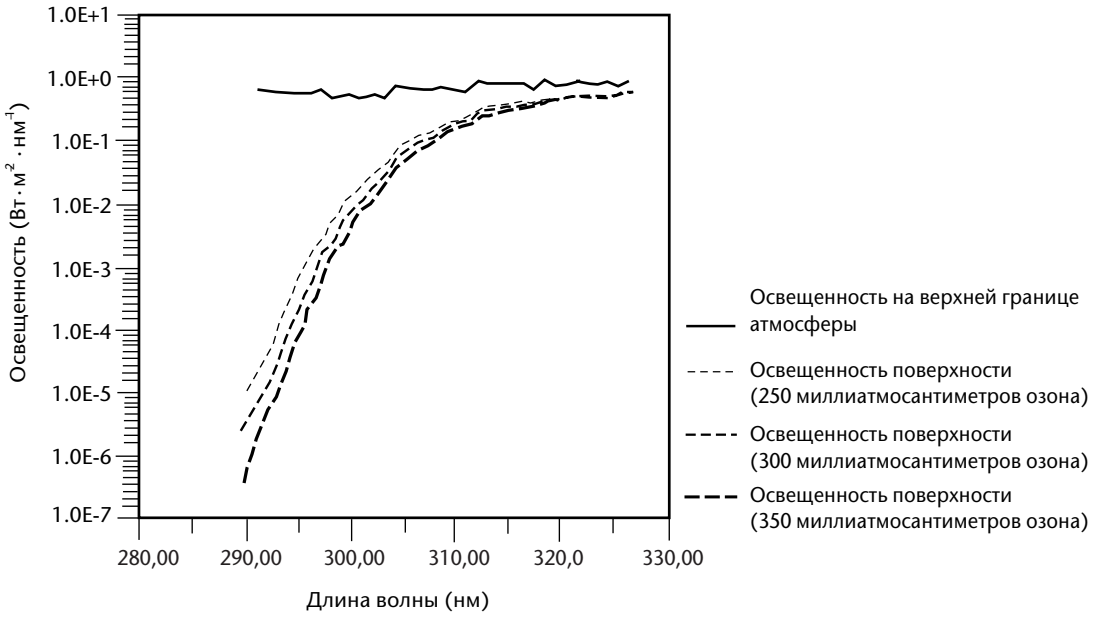


Рисунок 7.3. Результаты моделирования, иллюстрирующие воздействие повышения уровней содержания озона на прохождение УФ-излучения сквозь атмосферу.

Трудности в стандартизации измерений УФ-излучения обусловлены разнообразием областей, в которых они используются (WMO, 2003, 2011). В отличие от большинства метеорологических измерений, здесь еще не достигнуты стандарты, основанные на глобальных потребностях. Во многих странах измерения УФ-излучения проводятся не метеорологическими службами, а органами здравоохранения или охраны окружающей среды. Это приводит к дополнительным трудностям в стандартизации приборов и методов наблюдений. Стандарты нужны для сопоставления данных наблюдений, обеспечения их качества и контроля качества измерений, для архивации данных, а также для соединения измерений с сообществами пользователей (WMO, 2003).

Были разработаны руководства и стандартные процедуры по методам определения характеристик и калибровке широкополосных приборов, спектрорадиометров УФ-излучения и радиометров с фильтром УФ-излучения, используемых для измерения УФ-диапазона солнечного излучения (см. WMO 1996, 1999*a*, 1999*b*, 2001, 2008, 2010*a*). Были также разработаны руководства и стандартные процедуры для размещенных на сети спектрорадиометров (WMO, 2010*b*), хотя пока они не доступны на коммерческой основе в больших количествах. Применение рекомендуемых процедур для обеспечения качества данных на станциях размещения приборов измерения солнечной радиации в УФ-диапазоне обеспечит создание ценной базы данных различных диапазонов УФ-излучения. Это необходимо для проведения исследований климатологических аспектов УФ-излучения в пространстве и времени в контексте структуры изменения климата Земли. В этих документах также приводятся рекомендации для измерительных станций и технические характеристики приборов. Требования в отношении измерений в области УФ-В приводились в Программе Глобальной службы атмосферы (ГСА) ВМО (WMO, 1993, 2001, 2003, 2010*a*, 2010*b*, 2011, 2014). Для суммарного спектрального излучения УФ-В диапазона требования зависят от цели. Спецификации для менее требовательных целей изложены в таблице 7.9 (WMO, 2001).

Ниже для общей информации приведено описание типов приборов, которое поможет выбрать необходимые измерительные приборы.

Таблица 7.9. Требования Программы ГСА к измерениям суммарной спектральной энергетической освещенности в диапазоне УФ-В

Характеристика	*Требования*
Косинусная ошибка[a]	a) < ±10 % для углов падения луча < 60° b) < ±10 % для интегрированного изотропного излучения
Минимальный спектральный диапазон	290–325 нм[b]
Ширина полосы пропускания (ПШПМ — полная ширина на половине максимума)	< 1 нм
Прецизионность длины волны	< ±0,05 нм
Точность настройки длины волны	< ±0,1 нм
Аппаратная функция	< 10^{-3} максимального удаления в 2,5 ПШПМ от центра
Интервал длин волн дискредитации	< ПШПМ
Максимальная энергетическая освещенность	> 1 Вт·м$^{-2}$·нм$^{-1}$ на 325 нм и, в случае необходимости, = 2 Вт·м$^{-2}$·нм$^{-1}$ на 400 нм (полуденный максимум)
Порог обнаружения	< 5 · 10^{-5} Вт·м$^{-2}$·нм$^{-1}$ (для соотношения сигнал-шум) (ССШ) = 1 при 1 нм ПШПМ)
Диффузный свет	< 5 · 10^{-4} Вт·м$^{-2}$·нм$^{-1}$, когда прибор обращен к Солнцу при минимальном солнечном зенитном расстоянии
Температура прибора	Наблюдается и остается достаточно стабильной для обеспечения общей стабильности работы прибора
Время отклика	< 10 мин для каждого спектра, например для облегчения сопоставления с моделями
Общая погрешность калибровки[c]	< ±10% (если не ограничено порогом обнаружения)
Дата и время сканирования	Зарегистрированное с каждым спектром таким образом, что синхронизация по времени известна в пределах 10 с на каждой длине волны
Необходимые вспомогательные измерения	Прямая средняя спектральная освещенность или рассеянная спектральная освещенность Общее содержание озона в столбе атмосферы, например полученное по измерениям прямой средней спектральной освещенности Эритемно взвешенная освещенность, измеренная широкополосным радиометром Атмосферное давление Количество облачности Освещенность, измеренная люксометром Прямая освещенность при измерении нормально падающего луча пиргелиометром Видимость

Характеристика	*Требования*
Периодичность получения данных	По крайней мере одно сканирование в час и дополнительное сканирование в астрономический полдень для данной местности

Примечания:

a Меньшие по величине косинусные ошибки были бы крайне желательны, но это нереально для большинства используемых сейчас приборов.

b Общая неопределенность калибровки выражается уровнем доверия 95 % и включает в себя все неопределенности, связанные с калибровкой освещенности (например неопределенность для стандартных ламп, перенос неопределенностей, совмещенные неопределенности во время калибровки, дрейф нуля прибора между калибровками). Более подробно эти вопросы рассмотрены в работах Bernhard and Seckmeyer (1999), Cordero et. al. (2008) и Cordero et. al. (2013).

c Желательно распространение на диапазон с большей длиной волны для становления УФ-климатологии в отношении биологических применений (см. WMO, 2001, 2010*b*).

7.6.1 Приборы

Для измерения энергетической освещенности (радиации), создаваемой потоками ультрафиолетового излучения, выпускается три общих типа приборов. Первый класс приборов использует широкополосные фильтры. Эти приборы измеряют в спектральных участках УФ-В, УФ-А, либо по всему широкополосному ультрафиолетовому спектру, влияющему на здоровье человека. Второй класс приборов использует один или несколько интерференционных фильтров для интегрирования в дискретных участках спектра УФ-А и/или УФ-В. Третий класс приборов представляет собой спектрорадиометры, которыми последовательно или одновременно измеряют радиацию в предварительно определенных спектральных полосах.

7.6.1.1 *Широкополосные датчики*

Большая часть широкополосных датчиков, но не все, предназначена в основном для измерения во взвешенном ультрафиолетовом спектре с использованием эритемной функции, предложенной McKinlay и Diffey (1987) (рисунок 7.4). Еще одним рабочим спектром, используемым в некоторых других приборах, является спектр Parrish et al. (1982). Два метода (и их вариации) используются для выполнения этого приборного взвешивания.

Наиболее распространенное средство получения эритемного взвешивания состоит, во-первых, в отфильтровывании почти всех волн видимого спектра с использованием светофильтров, пропускающих УФ-излучение. Пропущенное излучение направляется на чувствительный к ультрафиолетовому свету фосфор. Зеленый свет, излучаемый фосфором, в свою очередь вновь фильтруется с использованием светофильтров из цветного оптического стекла для удаления любого не зеленого видимого света перед облучением им мышьяково-галлиевого или мышьяково-галлиевого-фосфорного фотодиода. Качество прибора зависит от таких параметров, как качество наружного защитного кварцевого колпака, косинусная характеристика прибора, температурная зависимость и обеспеченность изготовителем соответствия зритемной кривой путем сочетания спектральных характеристик светофильтров и диода. Исключительно важна термостабилизация не только электронной, но и оптической частей прибора, поскольку реакция фосфора на УФ-радиацию зависит от температуры. Эффективность излучения фосфора уменьшается приблизительно на 0,5 % K^{-1}, а его кривая спектральной чувствительности смещается в сторону более длинных волн приблизительно на 1 нм на каждые 10 K. Этот эффект особенно важен в связи с крутизной кривой излучения в этом спектральном интервале.

В последнее время разработаны приборы для измерения эритемной взвешенной УФ-энергетической освещенности с использованием технологии тонкопленочных металлических интерференционных фильтров и специально разработанных кремниевых

фотодиодов. Это позволило преодолеть многие трудности, связанные с фосфорной технологией, но возникла новая проблема, обусловленная очень низкими уровнями сигнала фотодиода.

Другие широкополосные приборы используют ту или иную технологию для измерений в полном ультрафиолетовом спектре с использованием сочетаний стеклянных, либо интерференционных светофильтров. Ширина полосы пропускания не превышает 20–80 нм ПШПМ для приборов, измеряющих сочетание УФ-А и УФ-В радиации. Некоторые заводы-изготовители снабжают приборы простыми алгоритмами для аппроксимации эритемной дозы на основе невзвешенных измерений.

В основном техническое обслуживание таких приборов заключается в обеспечении чистоты наружных колпаков, горизонтальности прибора, поддержании надлежащего функционирования осушителя (если предусматривается) и системы термостабилизации. Контроль качества и обеспечение качества, а также тщательное обслуживание должны выполняться хорошо подготовленным персоналом.

7.6.1.2 ***Узкополосные датчики***

Понятие об узости полосы для этой классификации приборов довольно расплывчато. Самая широкая полоса для приборов этой категории составляет 10 нм ПШПМ. Самая узкая полоса для приборов, выпускаемых в настоящее время, составляет порядка 2 нм ПШПМ (WMO, 2010*a*).

У этих датчиков для получения информации об участке УФ-диапазонов спектра используются один или несколько интерференционных фильтров. Самые простые приборы обычно состоят из одного фильтра, пропускающего длину волны, которая может быть измерена высококачественным фотодиодом, чувствительным к УФ-излучению, хотя желательно иметь больше, чем один фильтр. Спецификации, необходимые для этого типа прибора (WMO, 2010*a*) приведены в таблице 7.10. Типичными для таких приборов являются длины волн вблизи 305 нм. Непрозрачность таких фильтров должна быть равной или больше 10^{-6} по всей чувствительной зоне детектора. Лучшие приборы этого типа имеют термоэлектрическое охлаждение на основе эффекта Пельтье, обеспечивающее

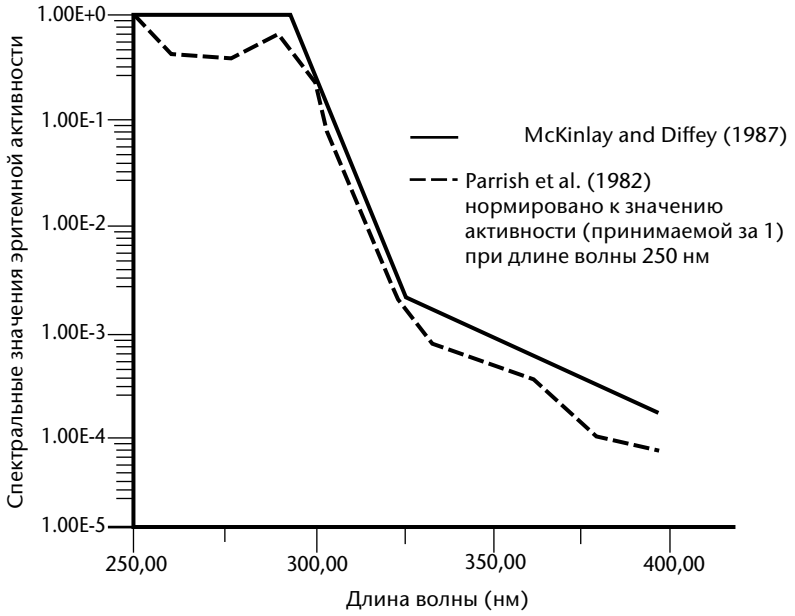


Рисунок 7.4. Эритемные кривые.

Источник: Parrish et al. (1982) and McKinlay and Diffey (1987)

Таблица 7.10. Требования к измерениям суммарной узкополосной освещенности в УФ-B диапазоне

Характеристика	*Требования*
Диффузный свет, включая чувствительность к видимому и инфракрасному диапазонам радиации	< 1 % вклад в сигнал с длиной волны за пределами 2,5 ПШПМ для солнечного зенитного расстояния менее 70°
Стабильность в пределах диапазона времени по шкале времени до одного года	Изменение сигнала: Используется в настоящее время: лучше 5 % Желательно: 2 %
Минимальное количество каналов	По крайней мере один канал с центральной длиной волны < 310 нм и минимум один с центральной длиной волны > 330 нм
Максимальная энергетическая освещенность	Сигнал прибора не должен поглощаться при уровнях радиации, присутствующих в естественных условиях на поверхности Земли
Порог обнаружения	ССШ (соотношение сигнал-шум) = 3 для энергетической освещенности при солнечном зенитном расстоянии 80° и общем содержании озона в столбе атмосферного воздуха, равном 300 ед. по шкале Добсона
Температура прибора	Наблюдается и остается достаточно стабильной для обеспечения общей стабильности работы прибора
Время отклика	< 1 с
Время мультиплексирования	< 1 с
Точность определения времени	Лучше чем ±10 с
Периодичность регистрации данных	≤ 1 мин
Выравнивание прибора	< 0,2°
Неопределенность калибровки	< 10 % (если не ограничено порогом обнаружения)

поддержание постоянной температуры около 20 °C, либо нагреватели для повышения температуры фильтра и диода выше нормальной, обычно до 40 °C. Однако в таких условиях существенно уменьшается срок службы интерференционных светофильтров. В другой модификации прибора этого типа вместо фотодиода используется электронный фотоумножитель, имеющий существенно более высокую чувствительность, что позволяет производить точные измерения низких уровней энергетической освещенности, особенно в области более коротких волн.

Изготовители приборов с количеством светофильтров более одного часто рекомендуют методы восстановления полного УФ-спектра и определения биологически эффективных доз для различных рабочих спектров, количества озона в столбе атмосферного воздуха и затухания в облаках с помощью моделируемых соотношений, определяемых в пределах измеренных длин волн (WMO, 2010*a*). Приборы, работающие на одной длине волны, используются также как вспомогательные для обеспечения временно́го и пространственного обобщения данных более сложных спектрометров или для долговременного точного мониторинга данных в конкретных спектральных полосах с целью обнаружения тенденций их изменений.

Конструкция прибора должна быть такой, чтобы излучение проходило через светофильтры практически перпендикулярно во избежание сдвига длин волн в более коротковолновую область. Например, отклонение угла падения света на 10° от перпендикулярного может вызвать сдвиг длины волны на 1,5 нм в зависимости

от коэффициента преломления фильтра. Влияние температуры может оказаться также значительным и выражаться в сдвиге центральной длины волны примерно на 0,012 нм K^{-1} для очень узкополосных фильтров (менее 1 нм).

Обслуживание простых приборов с одним фильтром аналогично обслуживанию широкополосных приборов. Обслуживание приборов, имеющих несколько фильтров, смонтированных на движущейся опоре, должно включать определение правильного положения ее в пространстве. Рекомендуются также регулярные проверки высоковольтного электропитания фотоумножителя, а также проверки состояния светофильтров.

7.6.1.3 ***Спектрорадиометры***

Наиболее сложными из выпускаемых промышленностью приборов являются имеющие штриховую, либо голографическую дифракционную решетку для разложения падающего солнечного потока на спектр. При этом из участков УФ-излучения с низкой энергией требуется тщательно исключить помехи более длинноволновых участков, имеющих энергию, сравнимую с видимой областью спектра. Это достигается путем использования двойного монохроматора. В случае однократного монохроматора используются комбинации светофильтров, обеспечивающие пропускание только УФ-области. Для измерения сигнала на выходной щели монохроматора (WMO, 2001) чаще всего используется фотоэлектронный умножитель. В некоторых, менее дорогих приборах используется фотодиод или цепи приборов с зарядовой связью (WMO, 2010*b*), позволяющие одновременно измерять весь спектральный диапазон, представляющий интерес. Такие приборы не способны измерять энергию на самых коротких длинах волн УФ-В излучения и в целом имеют больше проблем, связанных со светом, рассеянным внутри прибора.

В настоящее время имеются приборы для мониторинга, оснащенные некоторыми средствами самопроверки. Электронная проверка включает проверку работы фотоэлектронного умножителя и преобразователя аналогового сигнала в цифровой. Проверка на правильность функционирования оптики прибора включает проверку с использованием встроенных ртутных ламп и эталонных кварцевых галогенных ламп. Они не дают абсолютных данных для калибровки, но, тем не менее, обеспечивают получение оперативной информации о стабильности прибора в отношении как спектральной настройки, так и интенсивности.

Выпускаемые в настоящее время приборы имеют конструкции, обеспечивающие возможность измерения в спектральной области примерно от 290 нм до середины видимой области, в зависимости от конструкции и конфигурации прибора. Ширина измеряемой полосы обычно от 0,5 до 2,0 нм. Время, необходимое для завершения полного сканирования по всей решетке, зависит как от разрешения по длине волны, так и от общей ширины измеряемого спектра. Время выполнения спектрального сканирования по диапазону УФ-спектра и части видимой (290–450 нм) с малым шагом составляет от 1 мин для сканирования современными высокоскоростными спектрорадиометрами до 10 мин для некоторых типов высококачественных спектрорадиометров.

Для регулярного мониторинга УФ-излучения рекомендуется, чтобы прибор был либо защищен от воздействия окружающей среды, либо сконструирован таким образом, чтобы энергия, падающая на приемник, передавалась спектрометру, находящемуся в контролируемых условиях. В обоих случаях при разработке оптической части следует принять меры по обеспечению однородной чувствительности до низких углов высоты Солнца.

Как правило, обслуживание спектрорадиометров, предназначенных для мониторинга УФ-В излучения, требует участия штатных операторов высокой квалификации, ответственных за обслуживание приборов. Ввиду сложности прибора необходимо строго соблюдать инструкции по эксплуатации, прилагаемые к прибору заводом-изготовителем.

7.6.2 **Калибровка**

Калибровка всех датчиков УФ-В — дело сложное и важное. Руководства по калибровке УФ-спектрорадиометров и радиометров с УФ-фильтрами имеются в ВМО (WMO, 1996, 1999*a*, 1999*b*, 2001, 2008, 2010*a*, 2010*b*) и опубликованы в соответствующей научной литературе. Спектрорадиометры должны поверяться по стандартным лампам, которые были поверены в лабораториях национальных стандартов. Многие страны не располагают лабораториями для определения характеристик ламп УФ-излучения. В этих странах лампы обычно сравниваются с лампами Национального института стандартов и технологий (НИСТ) в США либо Физико-технической национальной лаборатории в Германии.

Согласно оценкам, в настоящее время наименьшая погрешность, которая может быть обеспечена только при самом строгом соблюдении условий, составляет 5 % при одинарных измерениях на длине волны 300 нм. Погрешность измерений суточных интегральных значений приблизительно такая же, как и получаемая при применении наилучших методов. Для получения репрезентативных значений суточных итоговых показателей спектрального УФ-излучения в условиях быстрой смены облачности и/или оптической ее оптической плотности требуется проведение быстрого сканирования по спектру и малый шаг времени выборки в последовательности спектрального сканирования. Погрешность измерений эритемной радиации, как правило, лежит в диапазоне от 5 % до 20 % в зависимости от ряда факторов, включая качество методик и оборудования. Погрешности измерений обусловлены следующими факторами:

a) погрешности, связанные с эталонными лампами;

b) стабильность прибора, включая стабильность спектрального фильтра; в более старых приборах — стабильность температурных коэффициентов;

c) влияние косинусной погрешности;

d) вариации результатов калибровки прибора, зависящих от длины волны, обусловленные следующим:

    i) различиями измеряемого и спектрального состава света эталонной лампы;

    ii) значительными изменениями спектрального состава измеряемого УФ-В излучения с изменениями зенитного угла солнца.

Использование эталонных ламп для калибровки приводит к большим погрешностям при самых коротких длинах волн, даже если калибровка проведена идеально. Например, при длине волны 350 нм погрешность, связанная с эталонной лампой, составляет примерно 1,3 %; погрешность калибровки эталонной лампы составляет 0,7 %. Погрешности уменьшаются с увеличением длины волны. Необходимо также учесть правильность установки и обслуживания эталонных ламп. Так, отклонение силы тока, протекающего через эталонную лампу, на 1 % приводит к изменению потока УФ-излучения на 10 %, а на самых коротких длинах волн — даже к большему. Неточное измерение расстояния между лампой и калибруемым прибором может также привести к погрешности порядка 1 %, поскольку величина потока обратно пропорциональна квадрату расстояние между источником и приемником. Webb et al. (1994) описывают различные аспекты возникновения погрешности, связанные с использованием эталонных ламп при калибровке УФ-спектрорадиометров.

Проблемы, связанные с широкополосными приборами, возникают ввиду: a) сложного набора светофильтров, используемых для выделения эритемной радиации из приходящей солнечной; b) изменения спектрального пропускания атмосферы с изменением массы атмосферы и количества озона. Даже если благодаря использованию калиброванного лампового источника характеристики прибора являются идеальными, различия в спектральном распределении солнечного излучения и лампы будут влиять на погрешность результатов измерений. Использование дейтериевой лампы высокой светоотдачи, двойного монохроматора и тщательный подбор светофильтров помогут получить

приемлемые характеристики для этих приборов. Однако число лабораторий, способных провести калибровку таких приборов, чрезвычайно ограничено. Различные методы калибровки широкополосных приборов описаны в публикации WMO (2008).

Детекторы-ловушки могли бы успешно использоваться в узкополосных датчиках, но до настоящего времени они применялись лишь в исследовательских проектах. При повторной калибровке, будь то прибор с одним или несколькими фильтрами, необходимо обратить особое внимание на обеспечение того, чтобы спектральные характеристики фильтров оставались стабильными. Различные методы калибровки узкополосных датчиков, а также их преимущества и недостатки описаны в публикации WMO (2010*a*).

Спектрорадиометры должны калиброваться в том же положении, в котором они будут находиться при проведении измерений, поскольку многие спектрорадиометры подвергаются неблагоприятному воздействию изменений положения в пространстве. Калибровка спектрорадиометра должна также включать в себя проверку точности выборки выделения участков длины волны монохроматором, проверку на любые изменения в юстировке внутренней оптики и ее чистоты, а также проверку электронного оборудования. Необходимо дать описание выделенной полосы, например, путем сканирования с помощью гелий-кадмиевого лазера (λ = 325 нм), причем только один раз, поскольку её характеристики обычно не меняются со временем.

Большинство заводов-изготовителей приборов с фильтрами рекомендует проводить калибровку один раз в год. Спектрорадиометры должны калиброваться, по крайней мере, два раза в год и чаще, если в них не предусмотрена возможность выполнения самопроверок выходного сигнала электронного фотоумножителя или выделяемой длины волны. Во всех случаях абсолютные калибровки должны проводиться лишь силами квалифицированных техников-специалистов на станциях согласно установленному графику. Источники излучения, используемые для калибровки, должны гарантировать соответствие калибровки абсолютным стандартам радиации, находящимся в национальных метрологических институтах (НМИ). Если результаты штатной процедуры обеспечения качества, проводимой на местах, говорят о существенном изменении характеристик прибора и изменении уровня его калибровки с течением времени, может потребоваться дополнительная калибровка между двумя плановыми. Все калибровки должны гарантироваться квалификацией и опытом работы сотрудников и имеющейся на станции документацией, содержащей указания и процедуры, подобные опубликованным ВМО (WMO, 1996, 1999*a*, 1999*b*, 2001, 2008, 2010*a*, 2010*b*). В дополнение к абсолютным калибровкам приборов весьма целесообразно проводить сличения источников, используемых для калибровки, а именно калибровочных ламп и измерительных приборов, в целях выявления и устранения несоответствий или систематических расхождений между приборами станции на различных стадиях измерений.

ПРИЛОЖЕНИЕ 7.А. НОМЕНКЛАТУРА АКТИНОМЕТРИЧЕСКИХ И ФОТОМЕТРИЧЕСКИХ ВЕЛИЧИН

Более подробно см. https://cie.co.at/e-ilv.

1) Актинометрические величины

Наименование	*Символ*	*Единица измерения*	*Соотношение*	*Примечания*
Энергия электромагнитного излучения	*Q, (W)*	Дж = Вт·с	–	–
Поток излучения	*Φ, (P)*	Вт	$\Phi = \frac{dQ}{dt}$	Мощность
Плотность приходящего радиационного потока	*(M), (E)*	Вт·м$^{-2}$	$\frac{d\Phi}{dA} = \frac{d^2Q}{dA \cdot dt}$	Поток излучения, идущий от некоторого источника, на элемент поверхности
Плотность уходящего радиационного потока	*M*	Вт·м$^{-2}$	$M = \frac{d\Phi}{dA}$	Поток, излучаемый единицей поверхности источника
Энергетическая освещенность	*E*	Вт·м$^{-2}$	$E = \frac{d\Phi}{dA}$	Поток, приходящий на единицу поверхности
Сила потока излучения поверхностью	*L*	Вт·м$^{-2}$·ср$^{-1}$	$L = \frac{d^2\Phi}{d\Omega \cdot dA \cdot \cos\theta}$	Поток, формируемый оптической системой
Энергетическая экспозиция	*H*	Дж·м$^{-2}$	$H = \frac{dQ}{dA} = \int_{t_1}^{t_2} E dt$	Может использоваться как сумма суммарной радиации за суточный интервал времени
Сила излучения	*I*	Вт·ср$^{-1}$	$I = \frac{d\Phi}{d\Omega}$	Может использоваться для потока излучения «точечного источника»

2) Фотометрические величины

Наименование	*Символ*	*Единица измерения*
Световая энергия	Q_v	лм·с
Световой поток	Φ_v	лм
Светность	M_v	лм·м$^{-2}$
Освещенность	E_v	лм·м$^{-2}$ = лк
Световая экспозиция	H_v	лм·м$^{-2}$·с = лк·с
Сила света	I_v	лм·ср$^{-1}$ = кд
Яркость	L_v	лм·м$^{-2}$·ср$^{-1}$ = кд м$^{-2}$
Плотность светового потока	(M_v; E_v)	лм·м$^{-2}$

3) Оптические характеристики

Наименование	*Символ*	*Определение*	*Примечания*
Излучение	ε	$\varepsilon = \frac{M_\varepsilon}{M_{\varepsilon=1}}$	$\varepsilon = 1$ для черного тела
Поглощение	α	$\alpha = \frac{\Phi_a}{\Phi_i}$	Φ_a и Φ_i — поглощенный и падающий потоки соответственно
Отражение	ρ	$\rho = \frac{\Phi_r}{\Phi_i}$	Φ_r — отраженный световой поток
Пропускание	τ	$\tau = \frac{\Phi_t}{\Phi_i}$	Φ_t — световой поток, прошедший через среду или поверхность
Оптическая плотность	δ	$\tau = e^{-\delta}$	В атмосфере δ определяется в вертикальном столбе. Оптическая толщина равна $\delta/\cos\theta$, где θ — зенитный угол

ПРИЛОЖЕНИЕ 7.B. МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИЕ РАДИАЦИОННЫЕ ВЕЛИЧИНЫ, СИМВОЛЫ И ОПРЕДЕЛЕНИЯ

Параметр	*Символ*	*Уравнение*	*Определения и замечания*	*Единицы измерения*
Нисходящая радиация	$\Phi\downarrow$[a]	$\Phi\downarrow = \Phi_g\downarrow + \Phi_l\downarrow$	Нисходящий поток излучения	Вт
	$Q\downarrow$	$Q\downarrow = Q_g\downarrow + Q_l\downarrow$	Нисходящая энергия излучения	Дж·(Вт·с)
	$M\downarrow$	$M\downarrow = M_g\downarrow + M_l\downarrow$	Нисходящая энергетическая светимость[b]	Вт·м$^{-2}$
	$E\downarrow$	$E\downarrow = E_g\downarrow + E_l\downarrow$	Нисходящая энергетическая освещенность	Вт·м$^{-2}$
	$L\downarrow$	$L\downarrow = L_g\downarrow + L_l\downarrow$	Нисходящая энергетическая яркость	Вт·м$^{-2}$·ср$^{-1}$
	$H\downarrow$	$H\downarrow = H_g\downarrow + H_l\downarrow$ (g = суммарная) (l = длинноволновая)	Нисходящая энергетическая экспозиция для заданного интервала времени	Дж·м$^{-2}$ на интервал времени
Восходящая радиация	$\Phi\uparrow$[a]	$\Phi\uparrow = \Phi_r\uparrow + \Phi_l\uparrow$	Восходящий поток излучения	Вт
	$Q\uparrow$	$Q\uparrow = Q_r\uparrow + Q_l\uparrow$	Восходящая энергия излучения	Дж·(Вт·с)
	$M\uparrow$	$M\uparrow = M_r\uparrow + M_l\uparrow$	Восходящая энергетическая светимость	Вт·м$^{-2}$
	$E\uparrow$	$E\uparrow = E_r\uparrow + E_l\uparrow$	Восходящая энергетическая освещенность	Вт·м$^{-2}$
	$L\uparrow$	$L\uparrow = L_r\uparrow + L_l\uparrow$	Восходящая энергетическая яркость	Вт·м$^{-2}$·ср$^{-1}$
	$H\uparrow$	$H\uparrow = H_r\uparrow + H_l\uparrow$	Восходящая энергетическая экспозиция для заданного интервала времени	Дж·м$^{-2}$ на интервал времени
Суммарная солнечная радиация	$E_g\downarrow$	$E_g\downarrow = E\cos\theta_\odot + E_d\downarrow$	Относительная энергетическая освещенность, приходящая из небесной полусферы на горизонтальную поверхность ($\theta_\odot$ =зенитный угол солнца)[c]	Вт·м$^{-2}$
Рассеянная солнечная радиация (нисходящая рассеянная солнечная радиация)	$\Phi_d\downarrow$ $Q_d\downarrow$ $M_d\downarrow$ $E_d\downarrow$ $L_d\downarrow$ $H_d\downarrow$		Индекс d = рассеянная	Как для нисходящей радиации

Параметр	*Символ*	*Уравнение*	*Определения и замечания*	*Единицы измерения*
Восходящая/ нисходящая длинноволновая радиация	$\Phi_l\uparrow$, $\Phi_l\downarrow$ $Q_l\uparrow$, $Q_l\downarrow$ $M_l\uparrow$, $M_l\downarrow$ $E_l\uparrow$, $E_l\downarrow$ $H_l\uparrow$, $H_l\downarrow$		Индекс l = длинноволновая. Если рассматривается только атмосферная радиация, то можно к индексу добавить индекс a, например, $\Phi_{l,a}\uparrow\sigma\sigma$	Как для нисходящей радиации
Отраженная солнечная радиация	$\Phi_r\uparrow$ $Q_r\uparrow$ $M_r\uparrow$ $E_r\uparrow$ $L_r\uparrow$ $H_r\uparrow$		Индекс r = отраженная (можно использовать индексы s (зеркальная) и d (рассеянная), если необходимо, подчеркнуть различие между этими двумя компонентами)	Как для нисходящей радиации
Результирующая радиация (радиационный баланс)	Φ^* Q^* M^* E^* L^* H^*	$\Phi^* = \Phi\downarrow - \Phi\uparrow$ $Q^* = Q\downarrow - Q\uparrow$ $M^* = M\downarrow - M\uparrow$ $E^* = E\downarrow - E\uparrow$ $L^* = L\downarrow - L\uparrow$ $H^* = H\downarrow - H\uparrow$	Для каждого индекса, если рассматривается только коротковолновая или длинноволновая остаточная радиация	Как для нисходящей радиации
Прямая солнечная радиация	E	$E = E_0\tau$ $\tau = e^{-\delta/\cos\theta_\odot}$	τ = прозрачность атмосферы δ = оптическая плотность (вертикальная)	Вт·м$^{-2}$
Солнечная постоянная	E_0		Интенсивность падающего солнечного излучения за пределами атмосферы, нормализованная по среднему расстоянию между Солнцем и Землей	Вт·м$^{-2}$

Примечания:

a Вместо символов ↓ или ↑ можно использовать «–» и «+» (например, $\Phi^+ = \Phi\uparrow$).

b Энергетическая светимость — поток излучения, входящий с единичной площади; интенсивность падающего излучения — поток излучения, получаемый единичной площадью. Для плотности потока в общем можно использовать как символ M, так и символ E. Может быть введен также символ $F = \Phi$/площадь, хотя он не очень рекомендуется.

c В случае наклонных поверхностей $\theta_\odot$ — угол между нормалью к поверхности и направлением на солнце.

ПРИЛОЖЕНИЕ 7.C. УСТАНОВЛЕННЫЕ ТРЕБОВАНИЯ ДЛЯ МИРОВЫХ, РЕГИОНАЛЬНЫХ И НАЦИОНАЛЬНЫХ РАДИАЦИОННЫХ ЦЕНТРОВ

Мировые радиационные центры

Мировые радиационные центры были назначены на 30-й сессии Исполнительного комитета в 1978 г. резолюцией 11 (ИК-XXX) как центры, где осуществляется международная калибровка метеорологических радиационных стандартов для глобальной сети станций и в этих целях содержатся эталонные приборы.

Мировой радиационный центр должен выполнять нижеследующие функции:

a) хранить и поддерживать в рабочем состоянии группу приборов, состоящую по крайней мере из трех стабильных абсолютных пиргелиометров, 95 % погрешности которых составляют менее 1 Вт·м$^{-2}$ при сопоставлении с Мировым радиометрическим эталоном (МРЭ) при стабильных, безоблачных погодных условиях и прямой энергетической освещенности выше 700 Вт·м$^{-2}$; при этом предполагается, что 95 % любого отдельного измерения прямой солнечной энергетической освещенности будет находиться в пределах 4 Вт·м$^{-2}$энергетической освещенности. Мировому радиационному центру в Давосе поручается поддерживать в рабочем состоянии группу международных эталонов для реализации МРЭ;

b) обеспечивать профессиональную подготовку специалистов в области радиации;

c) персонал центра должен сохранять преемственность и включать квалифицированных специалистов с большим опытом исследований в области радиации;

d) принимать все необходимые меры для обеспечения на постоянной основе, по возможности, наиболее высокого качества своих стандартов и поверочного оборудования;

e) выступать в качестве центра передачи МРЭ региональным центрам;

f) создавать необходимые лабораторные и внешние средства для одновременного сопоставления большого числа приборов и для обработки данных;

g) внимательно следить или инициировать разработки, способствующие улучшению стандартов и/или методов работы в области метеорологической радиометрии;

h) каждые пять лет проходить оценку, проводимую международным агентством или экспертами КПМН, для проведения поверки измерений прямой солнечной радиации;

или:

a) создать и вести архив данных солнечной радиации, поступающих от всех государств — членов ВМО;

b) состав сотрудников должен сохранять преемственность и включать высококвалифицированных специалистов с большим опытом исследований в области радиации;

c) принимать все необходимые меры для постоянного обеспечения, по возможности, самого высокого качества его базы данных и доступа к ней;

d) каждые пять лет проходить оценку, проводимую международным агентством или экспертами КПМН.

Региональные радиационные центры

Региональный радиационный центр создается региональной ассоциацией как центр внутрирегионального сравнения радиационных приборов в рамках Региона и поддержания эталонного прибора, необходимого для этой цели.

Региональный радиационный центр должен удовлетворять следующим условиям до того, как он будет называться таковым, и выполнять эти условия после утверждения его в этом качестве:

a) хранить и поддерживать в рабочем состоянии эталонную группу приборов, состоящую, по крайней мере, из трех стабильных пиргелиометров с 95 % погрешностью, составляющей менее 1 Вт·м$^{-2}$ в сопоставлении с группой международных эталонов (ГМЭ) при стабильных безоблачных погодных условиях и прямой энергетической освещенности выше 700 Вт·м$^{-2}$; при этом предполагается, что 95 % любого отдельного измерения прямой солнечной энергетической освещенности будет находиться в пределах 6 Вт·м$^{-2}$ энергетической освещенности;

b) не реже одного раза в пять лет один из радиометров должен сравниваться согласно санкции КПМН/ВМО или проходить калибровку с приборами ГМЭ;

c) по крайней мере, один раз в год эталонные радиометры должны сравниваться между собой для проверки их стабильности. Если среднее соотношение, основанное на, по меньшей мере, 100 измерениях при 95 % погрешности в размере менее 0,1 %, изменяется более чем на 0,2 %, и если нельзя выявить неисправный прибор, прежде чем использовать приборы в качестве эталонов, следует провести их повторную калибровку в одном из МРЦ;

d) должен иметь необходимое оборудование и лабораторные приборы или доступ к ним для поверки и поддержания точности вспомогательного измерительного оборудования;

e) представлять необходимое полевое оборудование для одновременного сравнения национальных эталонных радиометров со всего Региона;

f) обеспечивать преемственность состава сотрудников, который должен быть укомплектован высококвалифицированными специалистами с большим опытом исследований в области радиации;

g) оценка его работы должна проводиться национальным или международным агентством либо экспертами КПМН, по крайней мере, каждые пять лет для проверки соответствия измерений прямой солнечной радиации.

Национальные радиационные центры

Национальный радиационный центр — это центр, создаваемый в стране для калибровки, стандартизации и поверки приборов, применяемых в национальной сети радиационных станций, и для поддержания в рабочем состоянии национальных эталонных приборов, необходимых для этих целей.

Национальный радиационный центр должен удовлетворять следующим требованиям:

a) хранить, по крайней мере, два пиргелиометра для использования в качестве национального эталона для калибровки радиационных приборов, используемых в национальной сети радиационных станций с 95 % погрешностью менее 4 Вт·м$^{-2}$ и сопоставимой с региональной реализацией МРЭ при стабильных, безоблачных погодных условиях и прямой энергетической освещенности выше 700 Вт·м$^{-2}$;

при этом предполагается, что 95 % любого отдельного измерения прямой солнечной энергетической освещенности будет находиться в пределах 20 Вт·м$^{-2}$ энергетической освещенности;

b) один из национальных эталонных радиометров следует сравнивать с региональным эталоном не реже одного раза в пять лет;

c) по крайней мере, один раз в год национальные эталонные радиометры должны сравниваться между собой для проверки стабильности функционирования отдельных приборов. Если среднее соотношение, основанное, по меньшей мере, на 100 измерениях при 95 % погрешности в размере менее 0,2 %, изменилось больше, чем на 0,6 %, и если нельзя выявить неисправный прибор, то прежде, чем использовать приборы в качестве эталонов, следует провести их повторную калибровку в одном из региональных радиационных центров;

d) иметь необходимое оборудование и аппаратуру или доступ к ним для поверки характеристик приборов, используемых на национальной сети станций;

e) состав сотрудников центра должен сохранять преемственность и включать высококвалифицированных специалистов с большим опытом исследований в области радиации.

Список мировых и региональных радиационных центров

Мировые радиационные центры

Давос	(Швейцария)
Санкт-Петербург (см. Примечание)	(Российская Федерация)

Региональные радиационные центры

Регион I (Африка):

Каир	(Египет)
Хартум	(Судан)
Киншаса	(Демократическая Республика Конго)
Лагос	(Нигерия)
Таманрассет	(Алжир)
Тунис	(Тунис)

Регион II (Азия):

Пуна	(Индия)
Токио	(Япония)

Регион III (Южная Америка):

Буэнос-Айрес	(Аргентина)
Сантьяго	(Чили)
Уаяо	(Перу)

Регион IV (Северная Америка, Центральная Америка и Карибский бассейн):

Торонто	(Канада)
Боулдер	(Соединенные Штаты Америки)
Мехико/Колима	(Мексика)

Регион V (юго-западная часть Тихого океана):

Мельбурн	(Австралия)

Регион VI (Европа):

Будапешт	(Венгрия)
Давос	(Швейцария)
Санкт-Петербург	(Российская Федерация)
Норчёпинг	(Швеция)
Тулуза/Карпантра	(Франция)
Уккле	(Бельгия)
Линденберг	(Германия)

Примечание: Центр в Санкт-Петербурге действует, главным образом, как Мировой центр радиационных данных.

Национальные радиационные центры должны отвечать за подготовку и хранение всей новейшей технической информации, необходимой для работы национальной сети радиационных станций.

Следует организовать сбор результатов всех радиационных измерений, осуществляемых национальной сетью радиационных станций, и тщательную проверку точности и достоверности этих результатов. Если эта работа осуществляется другим органом, национальный радиационный центр должен поддерживать с ним тесную связь.

ПРИЛОЖЕНИЕ 7.D. ИСПОЛЬЗУЕМЫЕ ФОРМУЛЫ

Общие сведения

Все астрономические данные могут быть получены из таблиц в морских астрономических ежегодниках или из таблиц эфемерид. Однако для практических нужд используются приближенные формулы. Michalsky (1988*a*, 1988*b*) сравнил несколько комплектов приближенных формул и обнаружил, что наилучшими являются приближенные уравнения, представленные в *Astronomical Almanac* (United State Naval Observatory, 1993). Они приводятся ниже для удобства пользования.

Положение солнца

Для определения фактического положения солнца требуются следующие исходные величины:

a) год;

b) порядковый номер дня года (например, 1 февраля — это 32-й день);

c) дробный час во всемирном времени (ВВ) (например, часы + минуты/60 + число часов по Гринвичу);

d) широта в градусах (северная положительная);

e) долгота в градусах (восточная положительная).

Для определения юлианской даты (JD) *Astronomical Almanac* устанавливает текущий юлианский день от первого юлианского дня, назначенного на полдень 1 января 2000 г. по всемирному времени (ВВ). Этот юлианский день равен 2 451 545,0. Юлианскую дату (JD) можно определить по формуле:

$$\mathrm{JD} = 2\,432\,917{,}5 + \mathrm{delta} \cdot 365 + \mathrm{leap} + \mathrm{day} + \mathrm{hour}/24$$

где:

delta = год – 1949;
leap = високосность = целая часть от (delta/4)

Константа 2 432 917,5 — это юлианский день на полночь 1 января 1949 г. и используется просто для удобства.

Используя вышеуказанное время, можно подсчитать эклиптические координаты в соответствии с приведенными ниже этапами (*L*, *g* и *l* представлены в градусах):

a) n = JD – 2 451 545;

b) L (средняя долгота) = 280,460 + 0,985 647 4 $\cdot$ n ($0 \le L < 360°$);

c) g (средняя аномалия) = 357,528 + 0,985 600 3 $\cdot$ n ($0 \le g < 360°$);

d) l (эклиптическая долгота) = L + 1,915 $\cdot$ sin (g) + 0,020 $\cdot$ sin (2g) ($0 \le l < 360°$);

e) ep (отклонение от эклиптики) = 23,439 – 0,000 000 4 $\cdot$ n (градусы).

Следует отметить, что в спецификациях указано, что все числа, кратные 360°, следует добавлять или вычитать до тех пор, пока окончательная величина не попадет в пределы конкретного диапазона.

Из вышеприведенных уравнений можно рассчитать небесные координаты — правое восхождение (*ra*) и наклонение (*dec*) с помощью выражений:

$$\tan(ra) = \cos(ep)\cdot\sin(l)/\cos(l)$$

$$\sin(dec) = \sin(ep)\cdot\sin(l)$$

Для перехода от небесных координат к местным координатам, т. е. от правого восхождения и наклонения к азимуту (*A*) и высоте (*a*), удобно использовать местный часовой угол (*h*). Это рассчитывается посредством определения вначале гринвичского среднего звездного времени (GMST в часах) и местного среднего звездного времени (LMST в часах):

$$\mathrm{GMST} = 6,697\,375 + 0,065\,709\,824\,2\cdot n + \mathrm{hour(UT)}$$

где: 0 ≤ GMST < 24 h

$$\mathrm{LMST} = \mathrm{GMST} + (\text{east longitude})/(15^\circ\,\mathrm{h}^{-1})$$

На основании LMST рассчитывается часовой угол (*ha*) (*ha* и *ra* — в градусах):

$$ha = 15\cdot\mathrm{LMST} - ra \qquad (-12 \le ha < 12\mathrm{h})$$

До того как солнце достигнет меридиана, часовой угол является отрицательным. Следует быть осторожным при использовании этого термина, поскольку он противоположен термину, используемому исследователями солнца.

Расчеты угла высоты солнца (*el*) и солнечного азимута (*az*) (*az* и *el* — в градусах) ведутся по формулам:

$$\sin(el) = \sin(dec)\cdot\sin(\mathrm{lat}) + \cos(dec)\cdot\cos(\mathrm{lat})\cdot\cos(ha)$$

и

$$\sin(az) = -\cos(dec)\cdot\sin(ha)/\cos(el)$$

$$\cos(az) = (\sin(dec) - \sin(el)\cdot\sin(\mathrm{lat}))/(\cos(el)\cdot\cos(\mathrm{lat}))$$

где азимут меряется от 0° севера и является положительным по всему восточному полушарию.

Для учета рефракции атмосферы и получения видимой высоты солнца (*h*) или видимого зенитного угла солнца *Astronomical Almanac* предлагает следующие уравнения:

a) простое уравнение рефракции *r* для зенитных углов < 75°:

$$r = 0^\circ,004\,52\,P\tan z/(273+T)$$

где *z* — дистанция зенита в градусах; *P* — давление в гектопаскалях и *T* — температура в °C.

b) для зенитных углов больше 75° и высоты меньше 15°рекомендуется следующая аппроксимация:

$$r = \frac{P(0,159\,4 + 0,019\,6a + 0,000\,02a^2)}{(273+T)(1 + 0,505a + 0,084\,5a^2)}$$

где *a* — высота (90° – *z*), *h* = *el* + *r* и видимый зенитный угол солнца $z_0 = z + r$.

Расстояние от Солнца до Земли

Современный эксцентриситет орбиты Земли вокруг Солнца невелик, однако он значителен в том смысле, что квадрат расстояния R от Солнца до Земли, а, следовательно, и интенсивность падающего на Землю солнечного излучения изменяются в пределах ±3,3 % от среднего. В а. е. с погрешностью 10^{-4}:

$$R = 1,000\,14 - 0,016\,71 \cdot \cos\left(g\right) - 0,000\,14 \cdot \cos\left(2g\right)$$

где g — средняя аномалия, определенная выше. Солнечный эксцентриситет определяется как квадрат отношения среднего расстояния от Солнца до Земли (1 а. е., R_0) фактическому расстоянию от Солнца до Земли по формуле:

$$E_0 = \left(R_0 / R\right)^2$$

Масса атмосферы

Для вычисления экстинкции должна быть известна длина пути через атмосферу, которая называется абсолютной оптической массой атмосферы. Относительная масса атмосферы для произвольного компонента атмосферы (m) является отношением массы атмосферы вдоль наклонного пути к массе атмосферы по вертикали; таким образом, относительная масса атмосферы является нормирующим множителем. В плоскопараллельной структуре непреломляющей атмосферы m равняется 1/sin h_0 или 1/cos z_0.

Местное истинное время

Среднее солнечное время, на котором основано наше гражданское (поясное) время, определяется по движению воображаемого тела, называемого средним солнцем. Считается, что среднее солнце движется по небесному экватору с одинаковой скоростью, равной средней скорости движения истинного Солнца. Разность между этим постоянным временным эталоном и изменяющимся местным истинным временем называется уравнением времени (Eq), которое может быть положительным или отрицательным в зависимости от относительного положения истинного среднего солнца. Таким образом:

$$LAT = LMT + Eq = CT + LC + Eq$$

где LAT — местное истинное время (также известное как ИСВ — истинное солнечное время); LMT — местное среднее время; CT — гражданское время (соотнесенное с центральным меридианом часового пояса, поэтому также называемое поясным временем); LC — поправка на долготу (4 мин на каждый градус). Поправка LC положительна, если местный меридиан расположен к востоку от центрального меридиана часового пояса, и наоборот.

Для вычисления Eq в минутах можно использовать следующую приближенную формулу:

$$Eq = 0,017\,2 + 0,428\,1 \cos \Theta_0 - 7,351\,5 \sin \Theta_0 - 3,349\,5 \cos 2\Theta_0 - 9,361\,9 \sin 2\Theta_0$$

где $\Theta_0 = 2\,\pi d_n/365$ в радианах, или $\Theta_0 = 360\,d_n/365$ в градусах, где d_n — порядковый номер дня в году, изменяющийся от 0 на 1 января до 364 на 31 декабря для обычного года и до 365 для високосного года. Максимальная погрешность такой аппроксимации равна 35 с (которая чрезмерна для таких некоторых целей, как определение массы атмосферы).

ПРИЛОЖЕНИЕ 7.E. РАССЕЯННАЯ РАДИАЦИЯ — ПОПРАВКА НА ЗАТЕНЯЮЩЕЕ КОЛЬЦО

Затеняющее кольцо устанавливается на двух перекладинах, расположенных параллельно земной оси, таким образом, чтобы центр кольца совпадал с приемной поверхностью пиранометра во время равноденствий. Диаметр кольца может изменяться от 0,5 до 1,5 м и отношение ширины к радиусу b/r — от 0,09 до 0,35. Подгонка кольца к склонению солнца осуществляется путем перемещения его вдоль перекладин. Длина затеняющей полосы и высота установки перекладин по отношению к пиранометру определяются по положению Солнца во время летнего солнцестояния — чем больше широта, тем длиннее будет затеняющая полоса и тем ниже перекладины.

Некоторые авторы, например, Drummond (1956), Dehne (1980) and Le Baron et al. (1980), предложили формулы для расчета рабочей поправки к результатам измерений рассеянной радиации путем вычисления части радиации, не измеряемой из-за затеняющей полосы. Для кольца с $b/r < 0{,}2$ часть радиации D_v, теряемая в течение суток, может быть выражена следующим образом:

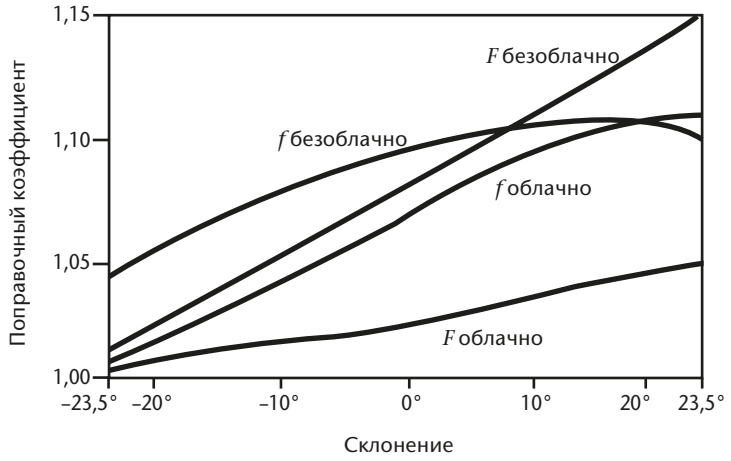
$$D_v \approx \frac{b}{r}\cos^3\delta \int_{t_{rise}}^{t_{set}} L(t)\cdot \sin h_\odot(t)\,dt$$

где δ — склонение солнца; t — часовой угол солнца; t_{rise} и t_{set} — часовой угол соответственно на восходе и закате солнца для математического горизонта, (Φ — географическая широта, $t_{rise} = -t_{set}$ и $\cos t_{rise} = -\tan\Phi \cdot \tan\delta$); $L(t)$ — светимость атмосферы в течение дня; $h_\odot$ — высота солнца.

С помощью этого уравнения и при определенных допущениях относительно светимости атмосферы можно определить поправочный коэффициент f:

$$f = \frac{1}{1-\frac{D_v}{D}}$$

где D — рассеянная радиация незатененного неба. На рисунке ниже представлен поправочный коэффициент для ясного неба и неба со сплошной облачностью в сравнении с соответствующими эмпирическими кривыми.



Сравнение рассчитанных и определенных эмпирически поправочных коэффициентов для затеняющего кольца, причем b/r = 0,169; f — вычисленная кривая и F — эмпирическая кривая.

Источник: Dehne (1980)

Очевидно, что отклонения от теоретических кривых зависят от климатологических факторов конкретной станции и должны определяться экспериментально — путем сравнения прибора с затеняющим кольцом с прибором, затеняемым непрерывно смещаемым диском. Если для станции нет экспериментальных данных, следует использовать данные, вычисленные для неба со сплошной облачностью с соответствующим b/r. Таким образом:

$$\frac{D_{\mathrm{v}}}{D_{\mathrm{overcast}}} = \frac{b}{r}\cos^3\delta\left(t_{\mathrm{set}} - t_{\mathrm{rise}}\right)\cdot\sin\Phi\cdot\sin\delta + \cos\Phi\cdot\cos\delta\cdot\left(\sin t_{\mathrm{set}} - \sin t_{\mathrm{rise}}\right)$$

где δ — склонение солнца; Φ — географическая широта; t_{rise} и t_{set} — часовой угол соответственно на восходе и закате солнца (подробнее см. выше).

ПРИЛОЖЕНИЕ 7.F. УПРАВЛЕНИЕ И ПРОСЛЕЖИВАЕМОСТЬ АТМОСФЕРНОГО ДЛИННОВОЛНОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

Содержащее дополнение к резолюции 1 (КПМН-17)

В соответствии со своим кругом ведения, отвечая на запрос о стандартизации измерений длинноволнового атмосферного излучения, КПМН постановляет создать структуру управления для Всемирной группы по инфракрасным стандартам (ВИСГ).

Структура управления включает в себя консультативную группу в составе не менее пяти экспертов в области измерений длинноволнового атмосферного излучения, назначаемых президентом КПМН для каждого международного сравнения пиргеометров, предпочтительно из числа участников процедуры сравнения.

Руководитель процедуры сравнения, назначаемый Physikalish Meteorologisches Observatorium Davos (ПМОД), будет приглашен для участия в совещании группы.

К числу задач консультативной группы относятся, но не ограничиваются:

a) проверка состояния и стабильности ВИСГ и оценка ее роли как практического эталонного стандарта для обеспечения стабильного длинноволнового эталона, который основан на анализе, проведенном ПМОД/МРЦ;

b) формулирование рекомендаций относительно обновления проверочных коэффициентов и изменений для ВИСГ, если это необходимо;

c) обеспечение надзора за международным сравнением пиргеометров, которое планируется проводить каждые пять лет совместно с международным сравнением пиргелиометров;

d) обзор прогресса в поддержании и повышении уровня прослеживаемости до системы СИ посредством проведения международного сравнения пиргеометров и выработка соответствующих рекомендаций;

e) представление своих выводов и рекомендаций Группе управления КПМН.

_____

СПРАВОЧНАЯ И ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ЛИТЕРАТУРА

Bass, A.M. and R.J. Paur, 1985: The ultraviolet cross-sections of ozone: I. The Measurements. *Atmospheric Ozone* (C.S. Zerefos and A. Ghazi, eds.), Reidel, Dordrecht, pp. 606–610.

Bernhard, G. and G. Seckmeyer, 1999: Uncertainty of measurements of spectral solar UV irradiance. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 104(D12):14321–14345.

Bodhaine, B.A., N.B. Wood, E.G. Dutton and J.R. Slusser, 1999: On Rayleigh optical depth calculations. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 16:1854–1861.

Cordero R.R., G. Seckmeyer, A. Damiani, F. Labbe and D. Laroze, 2013: Monte Carlo-based uncertainties of surface UV estimates from models and from spectroradiometers. *Metrologia*, 50(5):L1–L5.

Cordero R.R., G. Seckmeyer, D. Pissulla, L. DaSilva and F. Labbe, 2008: Uncertainty evaluation of spectral UV irradiance measurements. *Measurement Science and Technology*, 19(4):1–15.

Dehne, K., 1980: Vorschlag zur standardisierten Reduktion der Daten verschiedener nationaler Himmelsstrahlungs-Messnetze. *Annalen der Meteorologie* (Neue Folge), 16:57–59.

Drummond, A.J., 1956: On the measurement of sky radiation. *Archiv für Meteorologie, Geophysik und Bioklimatologie*, Serie B, 7:413–436.

Forgan, B.W., 1996: A new method for calibrating reference and field pyranometers. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 13:638–645.

Frouin, R., P.-Y. Deschamps and P. Lecomte, 1990: Determination from space of atmospheric total water vapour amounts by differential absorption near 940 nm: Theory and airborne verification. *Journal of Applied Meteorology*, 29:448–460.

International Commission on Illumination, 1987: *Methods of Characterizing Illuminance Meters and Luminance Meters*, CIE 69-1987. Vienna.

———, 1994: *Guide to Recommended Practice of Daylight Measurement*, CIE 108-1994. Vienna.

International Electrotechnical Commission, 1987: *International Electrotechnical Vocabulary*, Chapter 845: Lighting, IEC 60050-845. Geneva.

International Organization for Standardization, 1990*a*: *Solar Energy – Specification and Classification of Instruments for Measuring Hemispherical Solar and Direct Solar Radiation*, ISO 9060:1990. Geneva.

———, 1990*b*: *Solar Energy – Calibration of Field Pyrheliometers by Comparison to a Reference Pyrheliometer*, ISO 9059:1990. Geneva.

———, 1990*c*: *Solar Energy – Field Pyranometers – Recommended Practice for Use*, ISO/TR 9901:1990. Geneva.

———, 1992: *Solar Energy – Calibration of Field Pyranometers by Comparison to a Reference Pyranometer*, ISO 9847:1992. Geneva.

———, 1993: *Solar Energy – Calibration of a Pyranometer Using a Pyrheliometer*, ISO 9846:1993. Geneva.

International Organization for Standardization/International Electrotechnical Commission, 2008: *Uncertainty of Measurement – Part 3: Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement*, ISO/IEC Guide 98-3:2008, Incl. Suppl. 1:2008/Cor 1:2009, Suppl. 1:2008, Suppl. 2:2011. Geneva. (equivalent to: Joint Committee for Guides in Metrology, 2008: *Evaluation of Measurement Data – Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement*, JCGM 100:2008, Corrected in 2010).

Kerr, J.B. and T.C. McElroy, 1993: Evidence for large upward trends of ultraviolet-B radiation linked to ozone depletion. *Science*, 262:1032–1034.

Le Baron, B.A., W.A. Peterson and I. Dirmhirn, 1980: Corrections for diffuse irradiance measured with shadowbands. *Solar Energy*, 25:1–13.

McKinlay, A.F. and B.L. Diffey, 1987: A reference action spectrum for ultraviolet induced erythema in human skin. In: *Human Exposure to Ultraviolet Radiation: Risks and Regulations* (W.F. Passchier and B.F.M. Bosnjakovic, eds.), Elsevier, Amsterdam, pp. 83–87.

Michalsky, J.J., 1988*a:* The astronomical almanac's algorithm for approximate solar position (1950–2050). *Solar Energy*, 40(3):227–235.

———, 1988*b*: Errata. The astronomical almanac's algorithm for approximate solar position (1950–2050). *Solar Energy*, 41(1):113.

Parrish, J.A., K.F. Jaenicke and R.R. Anderson, 1982: Erythema and melanogenesis action spectra of normal human skin. *Photochemistry and Photobiology*, 36:187–191.

Rüedi, I., 2001: *International Pyrheliometer Comparison IPC-IX, Results and Symposium*. MeteoSwiss Working Report No. 197, Davos and Zurich.

Schneider, W., G.K. Moortgat, G.S. Tyndall and J.P. Burrows, 1987: Absorption cross-sections of NO_2 in the UV and visible region (200–700 nm) at 298 K. *Journal of Photochemistry and Photobiology, A: Chemistry*, 40:195–217.

United States Naval Observatory, 1993: *The Astronomical Almanac*, Nautical Almanac Office, Washington DC.

Vigroux, E., 1953: Contribution à l'étude expérimentale de l'absorption de l'ozone. *Annales de Physique*, 8:709–762.

Webb, A.R., B.G. Gardiner, M. Blumthaler and P. Foster, 1994: A laboratory investigation of two ultraviolet spectroradiometers. *Photochemistry and Photobiology*, 60(1):84–90.

World Meteorological Organization, 1986: *Revised Instruction Manual on Radiation Instruments and Measurements*. World Climate Research Programme Publications Series No. 7 (WMO/TD-No. 149). Geneva.

———, 1993: *Report of the Second Meeting of the Ozone Research Managers of the Parties to the Vienna Convention for the Protection of the Ozone Layer* (Geneva, 10–12 March 1993). WMO Global Ozone Research and Monitoring Project Report No. 32. Geneva.

———, 1996: *WMO/UMAP Workshop on Broad-band UV Radiometers* (Garmisch-Partenkirchen, Germany, 22–23 April 1996). Global Atmosphere Watch Report No. 120 (WMO/TD-No. 894). Geneva.

———, 1999*a*: *Guidelines for Site Quality Control of UV Monitoring*. Global Atmosphere Watch Report No. 126 (WMO/TD-No. 884). Geneva.

———, 1999*b*: *Report of the LAP/COST/WMO Intercomparison of Erythemal Radiometers* (Thessaloniki, Greece, 13–23 September 1999). Global Atmosphere Watch Report No. 141 (WMO/TD-No. 1051). Geneva.

———, 2001: *Instruments to Measure Solar Ultraviolet Radiation. Part 1: Spectral Instruments*. Global Atmosphere Watch Report No. 125 (WMO/TD-No. 1066). Geneva.

———, 2003: *Quality Assurance in Monitoring Solar Ultraviolet Radiation: the State of the Art*. Global Atmosphere Watch Report No. 146 (WMO/TD-No. 1180). Geneva.

———, 2005*a*: *Baseline Surface Radiation Network (BSRN): Operations Manual* (WMO/TD-No. 1274). Geneva.

———, 2005*b*: *WMO/GAW Experts Workshop on a Global Surface-based Network for Long Term Observations of Column Aerosol Optical Properties* (Davos, Switzerland, 8–10 March 2004). Global Atmosphere Watch Report No. 162 (WMO/TD-No. 1287). Geneva.

———, 2008: *Instruments to Measure Solar Ultraviolet Radiation – Part 2: Broadband Instruments Measuring Erythemally Weighted Solar Irradiance*. Global Atmosphere Watch Report No. 164 (WMO/TD-No. 1289). Geneva.

———, 2010*a*: *Instruments to Measure Solar Ultraviolet Radiation – Part 3: Multi-channel Filter Instruments*. Global Atmosphere Watch Report No. 190 (WMO/TD-No. 1537). Geneva.

———, 2010*b*: *Instruments to Measure Solar Ultraviolet Radiation – Part 4: Array Spectroradiometers*. Global Atmosphere Watch Report No. 191 (WMO/TD-No. 1538). Geneva.

———, 2011: *Data Quality Objectives (DQO) for Solar Ultraviolet Radiation Measurements – Part I* (Addendum to *Quality Assurance in Monitoring Solar Ultraviolet Radiation: State of the Art*, GAW Report No. 146). Global Atmosphere Watch Report No. 198. Geneva.

———,2014: *Standard Operating Procedures (SOPs) for Spectral Instruments Measuring Spectral Solar Ultraviolet Irradiance*. Global Atmosphere Watch Report No. 212. Geneva.

ГЛАВА 8. ИЗМЕРЕНИЕ ПРОДОЛЖИТЕЛЬНОСТИ СОЛНЕЧНОГО СИЯНИЯ

8.1 ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

Термин «солнечное сияние» связан с яркостью солнечного диска, превышающей фон диффузного свечения неба, или, что лучше видно невооруженным глазом, с появлением теней позади освещенных объектов. Как таковой, этот термин больше связан с видимым излучением, а не с излучением в области других длин волн, хотя оба аспекта неотделимы друг от друга. На практике, однако, первая формулировка была получена непосредственно на основе данных сравнительно простого регистратора солнечного сияния Кэмпбелла-Стокса (см. 8.2.3), принцип работы которого основан на обнаружении солнечного сияния, когда солнечный луч, сфокусированный специальными линзами, способен прожечь специальную темную бумажную ленту. Этот регистратор был введен в эксплуатацию на метеорологических станциях еще в 1880 г. и по-прежнему используется на многих пунктах наблюдений. Поскольку отсутствуют международные требования, касающиеся размеров и качества тех частей регистратора, которые фиксируют солнечное сияние, его использование давало различные значения продолжительности солнечного сияния.

Для получения с мировой сети станций однородных данных о продолжительности солнечного сияния ВМО рекомендовала использовать специальный тип регистратора солнечного сияния Кэмпбелла-Стокса, так называемый временный эталон солнечного сияния (ВЭСС) (ВМО, 1962). Усовершенствование, полученное с помощью этого «механического определителя» солнечного сияния, было эффективным только в течение предварительного периода, необходимого для нахождения точного физического определения термина «продолжительность солнечного сияния», которое позволяет конструировать как автоматические регистраторы солнечного сияния, так и, по возможности, более точно аппроксимировать «шкалу» регистратора ВЭСС. В отношении «шкалы» настоятельно рекомендовалось определение порогового значения прямой солнечной радиации, при котором возможно прожигание лент на регистраторах Кэмпбелла-Стокса. Исследования, проведенные на различных станциях, показали, что пороговое значение прямой солнечной радиации для прожигания ленты колеблется между 70 и 280 Вт·м$^{-2}$ (Bider, 1958; Baumgartner, 1979). Однако дальнейшие исследования, проведенные во Франции в основном с помощью регистратора ВЭСС, дали среднее значение 120 Вт·м$^{-2}$, которое затем было рекомендовано в качестве порога прямой солнечной радиации, чтобы четко определять продолжительность солнечного сияния[1]. Что касается разброса тестовых результатов, то он составляет 20 %, и это значение должно включаться в спецификацию приборов. В качестве эталонного датчика для обнаружения порога прямой солнечной радиации был рекомендован пиргелиометр. Для усовершенствования эталона в будущем необходимо, по-видимому, окончательно установить значение угла зрения пиргелиометра (см. настоящий том, глава *7*, *7.2* и *7.2.1.3*).

8.1.1 Определение

В соответствии с рекомендациями ВМО (2010)[2] продолжительность солнечного сияния в течение данного периода времени определяется как сумма времени, в течение которого значение прямой солнечной радиации превышает 120 Вт·м$^{-2}$.

---

[1] Рекомендовано КПМН на восьмой сессии (1981 г.) в соответствии с рекомендацией 10 (КПМН-VIII).

[2] Рекомендовано КПМН на десятой сессии (1989 г.) в соответствии с рекомендацией 16 (КПМН-X).

8.1.2 Единицы и шкалы

Физическая продолжительность солнечного сияния (SD) является временной характеристикой. В качестве единиц измерения используются секунды или часы. Для климатологических целей используются такие термины как «часы в день» или «число часов солнечного сияния в течение дня», а также проценты — для определения, например, «относительной продолжительности солнечного сияния в течение дня», когда SD может быть связана с максимально возможной продолжительностью солнечного сияния (SD_0 и SD_{max} соответственно). Важным дополнением к единицам измерения является период измерения (день, декада, месяц, год и т. д.).

8.1.3 Метеорологические требования

Требования, которые необходимо выполнять, приводятся в настоящем томе, глава 1. Продолжительность солнечного сияния должна измеряться с погрешностью до ±0,1 ч и с разрешением 0,1 ч.

Поскольку количество и скорость изменения пороговых переходов прямой солнечной радиации обусловливают возможную неопределенность продолжительности солнечного сияния, метеорологические требования к регистраторам солнечного сияния, по существу, коррелируют с климатологическими условиями облачности (WMO, 1985).

В случае безоблачного неба ежечасные значения, полученные при восходе или заходе Солнца, могут (в зависимости от количества пыли) быть ошибочными вследствие плохо заданных пороговых или спектральных зависимостей.

В случае переменной облачности (Cu, Cs) скорость изменения перехода высока, и энергетическая освещенность, измеренная пиргелиометром при облачном небе, обычно ниже 80 Вт·м$^{-2}$, что обусловливает пониженные требования к корректировке порога. Однако угол обзора прибора может оказывать влияние на результат измерения продолжительности солнечного сияния, если вблизи Солнца находятся скопления ярких облаков.

Необходима наиболее высокая точность, если облака верхнего и среднего яруса (Ci, As) с небольшими изменениями оптической плотности ослабляют прямое солнечное излучение примерно до 120 Вт·м$^{-2}$. Поэтому большое значение придается углу обзора, а также точности корректировки порога.

Требования к регистраторам солнечного сияния в зависимости от местоположения и времени года различаются в соответствии с преобладающими формами облачности. Облачность можно приблизительно описать посредством трех диапазонов относительной продолжительности солнечного сияния в течение дня SD/SD_0 (см. 8.1.2), а именно: «облачное небо», когда
$0 \le SD/SD_0 < 0{,}3$; «переменная облачность», когда $0{,}3 \le SD/SD_0 < 0{,}7$, и «ясная погода», когда $0{,}7 \le SD/SD_0 \le 1{,}0$). Результаты измерений в условиях преимущественно облачного неба имеют наибольшие погрешности (обычно самый высокий процент отклонений от эталона).

8.1.3.1 *Использование данных о продолжительности солнечного сияния*

В первую очередь данные о SD используются для характеристики климата местности, особенно курортных районов. При этом учитывается физиологическое воздействие солнечного света большой интенсивности на самочувствие человека. Эти данные по-прежнему используются некоторыми органами власти на местах для содействия туристическим направлениям.

Описание условий погоды за прошедший период, к примеру за месяц, содержит обычно ежесуточные данные о SD.

Для перечисленных областей применения погрешность около 10 % для средних значений SD представляется приемлемой для периода наблюдений, продолжительностью свыше нескольких десятилетий.

8.1.3.2 *Корреляция с другими метеорологическими параметрами*

Наиболее значительная корреляция наблюдается между продолжительностью солнечного сияния и суммарной солнечной радиацией G. Эта связь описывается так называемой формулой Ангстрема:

$$G/G_0 = a + b \cdot \left(SD/SD_0\right) \tag{8.1}$$

где G/G_0 — так называемый индекс ясности (суммарная солнечная радиация по отношению к ее возможному значению за пределами атмосферы), а SD/SD_0 — относительная продолжительность солнечного сияния (по отношению к ее возможному значению за пределами атмосферы); a и b — константы, которые должны определяться ежемесячно. По данным, полученным на станциях Германии, установлено, что погрешность среднемесячных значений суммарной солнечной радиации, измеряемой с помощью регистратора Кэмпбелла-Стокса, составляет менее 10 % летом и увеличивается до 30 % зимой (Golchert, 1981).

В формуле Ангстрема подразумевается наличие обратной связи между количеством облаков и продолжительностью солнечного сияния. Это не относится к неплотной облачности верхнего яруса и, по-видимому, к облачным полям, не экранирующим Солнце; поэтому степень обратной связи зависит в основном от объема статистических данных (Stanghellini, 1981; Angelí, 1990). Повышение точности данных о SD должно уменьшить разброс статистических результатов, но даже точные данные могут дать достоверные результаты только на статистической основе.

8.1.3.3 *Требования к автоматической регистрации*

Поскольку большинство пунктов наблюдений обеспечено электроэнергией, преимущество регистратора Кэмпбелла-Стокса, состоящее в его автономности, становится не столь существенным. Более того, необходимость ежедневной смены лент приводит к тому, что применение регистраторов Кэмпбелла-Стокса становится проблематичным на АМС или на станциях с ограниченным числом персонала. Другая весомая причина замены регистраторов Кэмпбелла-Стокса на новые автоматизированные методы измерения состоит в желании избежать затрат на визуальные оценки продолжительности солнечного сияния и получать более точные результаты этих оценок на носителях информации, позволяющих осуществлять обработку данных непосредственно на компьютерах.

8.1.4 **Методы измерения**

Ниже кратко описаны методы, используемые для измерения продолжительности солнечного сияния, и соответствующие им типы приборов:

a) Пиргелиометрический метод. Обнаружение с помощью пиргелиометра переходов прямой солнечной радиации через порог 120 Вт·м$^{-2}$ (согласно рекомендации 10 (КПМН-VIII)). Значения продолжительности считываются со счетчиков времени, которые приводятся в действие при соответствующих переходах порога в сторону верхних и нижних значений.

   Тип прибора: пиргелиометр, соединенный с электронным или компьютерным дискриминатором порога и счетчиком времени.

b) Пиранометрический метод.

   i) Измерение производится с помощью пиранометра суммарной (G) и рассеянной (D) солнечной радиации, для того чтобы получить прямую солнечную радиацию с целью распознавания рекомендуемого ВМО порогового значения, как указано в пункте (a) выше.

      Тип прибора: все радиометрические системы из двух встроенных пиранометров и одного затеняющего устройства, соединенные с электронным или компьютерным дискриминатором порога и счетчиком времени.

   ii) Пиранометрический метод измерения суммарной (G) солнечной радиации с целью оценки продолжительности солнечного сияния.

      Тип прибора: пиранометр в сочетании с электронным или компьютеризованным устройством, способным выдавать 10 мин средние значения, а также минимальные и максимальные суммарные значения (G) солнечной радиации за тот же 10-минутный интервал, или в альтернативном порядке предоставлять 1-минутные средние значения суммарной (G) солнечной радиации.

c) Метод прожигания. Пороговый эффект прожигания ленты, вызываемый сфокусированной прямой солнечной радиацией (тепловой эффект поглощенной солнечной энергии). Продолжительность солнечного сияния определяется по следам прожога.

   Тип прибора: регистраторы солнечного сияния Кэмпбелла-Стокса, особенно рекомендованный вариант ВЭСС (см. 8.2).

d) Контрастный метод. Основан на определении различий освещенности в показаниях автономных датчиков, находящихся в различных положениях по отношению к Солнцу, с помощью нормирования выходных сигналов датчиков по значениям сигналов, эквивалентных порогу, рекомендованному ВМО (определяемому на основе сравнения с эталонными значениями SD, как указано в пункте (b)).

   Тип прибора: специально сконструированные приемники с набором датчиков (в основном работающих на фотогальванических элементах), соединенные с электронным дискриминатором и счетчиком времени.

e) Метод сканирования. Основан на распознавании энергетической освещенности, поступающей от непрерывно сканируемых небольших секторов неба, с помощью ее нормирования по эквиваленту порога энергетической освещенности, рекомендованного ВМО (определяемого на основе сравнения с эталонными SD значениями).

   Тип прибора: приемные устройства с одним датчиком, оборудованные специальным сканирующим устройством (например, вращающейся диафрагмой или зеркалом) и соединенные с электронным дискриминатором и счетчиком времени.

Методы измерения продолжительности солнечного сияния, описанные в следующих параграфах, являются примерами использования вышеупомянутых принципов. Эти методы и приборы, за исключением переключателя Фостера, участвовали в сравнении автоматических регистраторов продолжительности солнечного сияния, проведенных ВМО в 1988–1989 гг. в Гамбурге, и в сравнении пиранометров и электронных регистраторов продолжительности солнечного сияния, проведенных Региональной ассоциацией VI (РА-VI) в Будапеште в 1984 г. (WMO, 1986).

Описание регистратора солнечного сияния Кэмпбелла-Стокса в 8.2.3 сделано достаточно подробно, поскольку этот прибор по-прежнему широко используется в национальных сетях метеорологических наблюдений, в связи с чем необходимо учитывать

рекомендованные ВМО технические характеристики и правила расчетов (тем не менее, заметим, что этот метод уже не рекомендуется[3], поскольку продолжительность яркого солнечного сияния не отмечалась с достаточным постоянством).

Обзор истории создания и развития регистраторов солнечного сияния приведен в работах Coulsen (1975), Hameed и Pittalwala (1989); Sonnetag и Behrens (1992).

8.2 ПРИБОРЫ И ДАТЧИКИ

8.2.1 Пиргелиометрический метод

8.2.1.1 *Общие сведения*

Данный метод разработан на основе определения солнечного сияния, принятого ВМО (см. 8.1.1), и поэтому рекомендуется для получения эталонных значений продолжительности солнечного сияния. Метод предполагает использование защищенного от погодных условий пиргелиометра и надежного устройства для слежения за движением солнца, предназначенного для автоматического или, в крайнем случае, полуавтоматического наведения пиргелиометра на солнце. Этот метод можно модифицировать, выбрав пиргелиометр, в котором угол обзора влияет на энергетическую освещенность, измеряемую в то время, когда облака закрывают солнце.

Контроль за порогом солнечного сияния осуществляется непрерывным сопоставлением показаний на выходе пиргелиометра с пороговым эквивалентным напряжением V_{th}=120 Вт·м$^{-2}$ · R мкВ·Вт$^{-1}$·м$^{-2}$, которое рассчитывается по чувствительности пиргелиометра R. Порог перехода определяется, если $\Delta V = V - V_{th}$ меняет знак. Подключенный счетчик времени срабатывает при $\Delta V > 0$.

8.2.1.2 *Источники погрешностей*

Пока еще не разработаны единые требования для угла обзора. Большие различия между показаниями двух пиргелиометров с различными углами обзора возможны, особенно когда солнце окружено облаками (см. настоящий том, глава 7, 7.2 и 7.2.1.3). Более того, типичные погрешности пиргелиометров, а именно: влияние наклона, температурная зависимость, нелинейность и смещение нуля — зависят от класса пиргелиометра. Более значительные погрешности появляются при неточном нацеливании прибора на солнце, а также когда входное защитное окно залито дождем или покрыто снегом.

8.2.2 Пиранометрический метод

8.2.2.1 *Общие сведения*

Пиранометрический метод получения данных о продолжительности солнечного сияния основан на фундаментальной взаимосвязи между прямой (I), суммарной (G) и рассеянной (D) солнечной радиацией:

$$I \cdot \cos\zeta = G - D \tag{8.2}$$

где ζ – зенитный угол солнца; $I \cdot \cos\zeta$ – горизонтальная составляющая I. Для того чтобы точно выполнить условия применения уравнения 8.2, угол затенения пиранометра при измерении D должен быть равным углу обзора пиргелиометра (см. настоящий том, глава 7). Кроме того, спектральные диапазоны, а также постоянные времени пиргелиометра и пиранометра должны быть по возможности одинаковыми.

[3] См. рекомендацию 10 (КПМН-VIII).

При отсутствии нацеленного на солнце пиргелиометра, но при наличии полученных с помощью компьютера данных G и D, измеренных пиранометрами, принятый в ВМО численный критерий солнечного сияния может быть выражен, согласно уравнению 8.2, с помощью формулы

$$\left(G - D\right)\big/\cos\zeta > 120 \text{ Вт·м}^{-2} \tag{8.3}$$

которая может использоваться применительно к мгновенным отсчетам.

Модификации этого метода на различных станциях сводятся прежде всего к следующему:

a) выбор пиранометра;

b) применение затеняющего устройства (теневое кольцо или затеняющий диск с устройством слежения за солнцем) с соответствующей геометрией затенения (угол затенения);

c) корректировка с учетом потерь, обусловленных затеняющим кольцом.

В качестве специальной модификации следует упомянуть замену критерия в уравнении 8.3 на статистически полученную формулу параметризации (для того чтобы избежать определения зенитного угла солнца) для применения в более простых системах сбора данных (Sonntag and Behrens, 1992).

Для определения продолжительности солнечного сияния при измерении только одним пиранометром могут применяться другие алгоритмы, основанные на других допущениях.

Метод Слоба и Монна (Slob and Monna, 1991) основан на двух допущениях в отношении связи между радиацией и облачностью, как показано ниже:

a) довольно точное вычисление возможной суммарной радиации на поверхности Земли, основанное на расчетном значении «заатмосферной радиации» (G_0), принимая во внимание ее угасание в атмосфере. Ослабляющий фактор зависит от высоты солнца h и мутности атмосферы T. Соотношение между измеренной суммарной радиацией и таким образом рассчитанной радиацией при ясном небе является хорошей мерой наличия облаков;

b) очевидное различие между минимальным и максимальным значениями суммарной радиации, измеренной по 10-минутным интервалам, предполагает временное закрытие солнца облаками. С другой стороны, отсутствие такого различия свидетельствует об отсутствии радиации или непрерывной радиации в течение 10-минутного интервала (а именно, $SD = 0$ или $SD = 10$ мин).

Основанный на этих предположениях алгоритм может быть использован (Slob and Monna, 1991) для расчета суточных SD продолжительности солнечного сияния из сумм за 10-минутные SD. В пределах этого алгоритма SD определяется по 10-минутным интервалам с наличием солнечного сияния (а именно, $SD_{10} = f \cdot 10$ минут, где f — часть интервала с солнечным сиянием, $0 \le f \le 1$). Ослабляющий фактор, главным образом, зависит от оптического пути солнечного излучения, проходящего через атмосферу. Поскольку этот путь зависит от высоты солнца, $h = 90° - z$, алгоритм разграничивает 3 временные зоны. Хотя в основном $f = 0$ или $f = 1$, особое внимание уделено $0 < f < 1$. Этот алгоритм приведен в приложении 8.A. Неопределенность расчетов составляет около 0,6 ч для дневных сумм, хотя недавние работы (Hinssen and Knap, 2007; WMO, 2012) показали, что расширенная погрешность ($k = 2$) в отношении суточных данных может превосходить 1 ч.

Карпентрасский метод исходит из возможности параметризации и расчета по 1-минутным интервалам порогового значения (G_{thr}) радиации G как функции наиболее распространенных в данной местности условий мутности атмосферы и высоты

солнца (h). Соответствующий алгоритм этого метода приводится в приложении 8.B. Максимальная расширенная погрешность ($k = 2$) в отношении суточных данных составляет приблизительно 0,7 ч (WMO, 2012).

Применение карпентрасского метода может быть оптимизировано благодаря использованию 1-минутных средних суммарных показателей и прямых показателей радиации (используемых как ориентир) в течение нескольких следующих друг за другом лет (не менее четырех), что позволяет определить коэффициенты для параметризации 1-минутного порогового показателя G_{thr} для конкретных мест. Это минимизирует общую относительную ошибку в отношении дневных показателей SD, рассчитанных по карпентрасскому методу за длительный период времени (годы) посредством использования суммарной разницы SD, а также позволяет оценить максимальную погрешность карпентрасского метода (Morel et al., 2012).

8.2.2.2 *Источники погрешностей*

Согласно уравнению 8.3, погрешности при измерениях суммарной и рассеянной солнечной радиации ведут к увеличению погрешности определения прямой солнечной радиации, которая существенно увеличивается с увеличением зенитного угла солнца. Поэтому для уменьшения погрешностей результатов важно точно вводить поправки на экранирование участков неба теневым кольцом (WMO, 1984*a*) и выбирать высококачественный пиранометр.

8.2.3 Регистратор солнечного сияния Кэмпбелла-Стокса (метод прожигания)

Основной составной частью регистратора солнечного сияния Кэмпбелла-Стокса является стеклянный шар, устанавливаемый в центре сферического сегмента, диаметр которого позволяет солнечным лучам, проходящим через этот шар, фокусироваться строго на ленту, вставленную в пазы сферического сегмента. Способ крепления шара зависит от того, в каких широтах (полярных, умеренных, тропических) используется прибор. Для получения хороших результатов сферический сегмент и шар должны быть сделаны с высокой точностью, а крепление следует выполнять таким образом, чтобы шар располагался точно по центру. В сферическом сегменте имеются три пары перекрывающих друг друга пазов (одна пара для обоих равноденствий) для лент, используемых в различные времена года; при этом форма и длина лент выбираются в соответствии с требованиями геометрии оптики системы. Следует отметить, что проблема, связанная с началом прожога при различных условиях облачности, свидетельствует о том, что этот прибор, также как и любой другой, работающий по такому же принципу, не обеспечивает измерений истинной продолжительности солнечного сияния.

В таблице ниже приведены основные технические характеристики и требования к регистратору солнечного сияния Кэмпбелла-Стокса класса ВЭСС.

8.2.3.1 *Настройка*

При установке регистратора следует провести следующие корректировки:

a) основание должно быть установлено горизонтально, строго по уровню;

b) установка сферического сегмента должна быть проведена таким образом, чтобы центральная линия ленты равноденствия совпадала с небесным экватором (это можно сделать с помощью шкалы широт, нанесенной на опоре сегмента);

c) вертикальная плоскость, проходящая через центр шара, и отметка полудня на сферическом сегменте должны лежать в плоскости географического меридиана (установка «север-юг»).

Технические характеристики регистратора солнечного сияния Кэмпбелла-Стокса (класс ВЭСС)

Стеклянный шар	*Сферический сегмент*	*Ленты для записи*
Форма: постоянная	Материал: пушечная бронза или другой металл с эквивалентной прочностью	Материал: картон хорошего качества, в незначительной степени подверженный действию влаги
Диаметр: 10 см	Радиус: 73 мм	Ширина: точно в пределах 0,3 мм
Цвет: очень слабый или бесцветный	Дополнительные технические характеристики:	Толщина: 0,4 ± 0,05 мм
		Воздействие влаги: в пределах 2%
Показатель преломления: 1,52 ± 0,02	a) центральная линия полудня гравируется поперек внутренней поверхности	Цвет: темный, однородный, невосприимчивый к рассеянному дневному свету
Фокусное расстояние: 75 мм для натриевого «D» света	b) корректировка горизонтального наклона производится в соответствии с широтой	Шкала: часовые линии черного цвета
	c) двойное основание для регулировки уровня и азимута	

Для того чтобы проверить, соответствует ли установка регистратора требованию пункта (c), необходимо наблюдать отражение солнца во время истинного полудня для данной местности: если прибор отрегулирован правильно, то отражение должно падать на отметку полудня сферического сегмента или ленты.

8.2.3.2 ***Оценка данных***

Для получения сравнимых результатов по регистраторам Кэмпбелла-Стокса очень важно выполнять нижеследующие указания по обработке данных ВЭСС. Суммарная дневная продолжительность яркого солнечного сияния определяется следующим образом: по краю ленты одинакового изгиба отмечаются отрезки, длины которых соответствуют следу прожога; далее с точностью до ближайшей десятой доли часа измеряется суммарная длина имеющихся на ленте отрезков прожога. Оценку данных следует производить, руководствуясь следующим:

a) если след прожога отчетлив и имеет закруглённые концы, то его длину на каждом конце следует уменьшить на величину, равную половине радиуса изгиба конца следа; это будет соответствовать уменьшению общей длины каждого следа на 0,1 ч;

b) если след прожога имеет круглую форму, то измеряемая длина должна быть равна половине диаметра следа. Если в день регистрируется более одного закруглённого следа, то этого достаточно, чтобы считать два или три следа эквивалентом 0,1 ч солнечного сияния; четыре, пять, шесть следов — эквивалентом 0,2 ч солнечного сияния и т. д. с шагом 0,1 ч;

c) если след представляет собой сплошную линию, следует измерять всю ее длину, даже тогда, когда лента только слегка обесцвечена;

d) если отчетливый след прожога в ходе времени сокращается по ширине, по крайней мере, на одну треть, то из суммарной длины для каждого такого сокращения следует вычесть величину, равную 0,1 ч. При этом максимально вычитаемая величина не должна превышать половины общей длины следа.

Для анализа случайных и систематических ошибок, допущенных при оценке данных о продолжительности солнечного сияния, а также с целью обеспечения объективности результатов при сравнении приборов рекомендуется, чтобы оценку данных каждого сравниваемого прибора производили последовательно и независимо два или более специалистов в этой области.

8.2.3.3 *Специальные модификации прибора*

Так как стандартный регистратор солнечного сияния Кэмпбелла-Стокса полностью не фиксирует солнечное сияние за летние месяцы на станциях, расположенных на широтах выше 65°, в некоторых странах используются модифицированные версии прибора.

Один из вариантов предусматривает использование двух регистраторов Кэмпбелла-Стокса, установленных один возле другого, при этом один из них установлен обычным образом, а другой направлен на север.

В суровых климатических условиях, возможно, существует необходимость подогрева прибора во избежание обмерзания и конденсации влаги на стеклянном шаре. Сравнение показаний подогреваемых и неподогреваемых приборов показало, что, например, в условиях климата Северной Европы неподогреваемый прибор не регистрирует около 1 % среднемесячной продолжительности солнечного сияния летом и около 5–10 % зимой по сравнению с подогреваемым.

8.2.3.4 *Источники погрешностей*

Погрешности данного регистратора обусловлены, главным образом, зависимостью образования прожогов от температуры и влажности ленты, а также эффектом усиленного прожога, особенно в случае разорванных облаков (Ikeda et al., 1986).

Значения, полученные в утренние часы в средних и высоких широтах, часто обусловлены обмерзанием или отпотеванием стеклянного шара.

8.2.4 Приборы для оценки контраста

Регистратор солнечного сияния Фостера — это электронно-оптическое устройство, которое было введено в эксплуатацию на наблюдательных сетях в США в 1953 г. (Foster and Foskett, 1953). Прибор состоит из двух селеновых фотоэлементов, один из которых защищен от прямого солнечного излучения затеняющим кольцом. Элементы соединены таким образом, что при отсутствии прямой солнечной радиации никакого сигнала не поступает. Регистратор приводится в действие, когда прямая солнечная радиация превышает примерно 85 Вт·м$^{-2}$ (Hameed and Pittalwala, 1989). Положение защитного кольца требует корректировки только четыре раза в год для учета сезонных изменений движения солнца по небосводу.

8.2.5 Приборы для оценки контраста и сканирующие приборы

8.2.5.1 *Общие сведения*

Несколько различных моделей электронно-оптических датчиков, а именно датчиков для оценки контраста и сканирующих приборов (см., к примеру WMO, 1984*b*) прошли сравнение автоматических регистраторов продолжительности солнечного сияния, организованное ВМО и проведенное в Региональном радиационном центре Региональной ассоциации VI в Гамбурге (Германия) в период с 1988 по 1989 гг. Отчет об этих испытаниях содержит детальные описания всех протестированных приборов и датчиков.

8.2.5.2 *Источники погрешностей*

Распределение облачности на небосклоне или солнечное излучение, отраженное от окружающих объектов, могут влиять на результаты, поскольку применяются различные методы оценки контраста и сравнительно большие углы обзора у используемых элементов конструкции. Кремниевые фотогальванические элементы без фильтров обычно максимально чувствительны в спектре, близком к инфракрасному, поэтому полученные результаты зависят от спектрального состава прямой солнечной радиации.

Поскольку сравнительно небольшой прямоугольный обзор таких приборов отличается в большей или меньшей степени от циркулярно-симметричного угла эталонного пиргелиометра, наличие облаков вокруг солнца может вызвать отклонения от показаний эталона.

Так как угол обзора является небольшим, некачественная стеклянная защита может служить особым источником погрешностей. Помимо погрешностей определения высоты солнца, следует учитывать погрешности спектральной характеристики датчиков. В настоящее время принято считать, что только один выпускаемый регистратор, в котором использован пироэлектрический приемник, не подвержен спектральным эффектам.

8.3 УСТАНОВКА ПРИЕМНИКОВ СОЛНЕЧНОГО СИЯНИЯ

Для правильной установки приемников солнечного света необходимо руководствоваться следующими тремя положениями:

a) приемники должны быть жестко укреплены на неподвижной опоре. Это требование необязательно для датчиков SONI (WMO, 1984*b*), которые предназначены для установки на буях;

b) местоположение приемника в любое время года должно быть открыто солнцу в течение всего периода, когда зенитный угол солнце более 3° над горизонтом. Эта рекомендация может быть изменена в следующих случаях:

   i) при отсутствии другого места для установки, когда наличие небольших антенн или других затеняющих объектов с небольшими угловыми размерами (не более 2°) допустимо. В таком случае местоположение, высота и угловой размер объектов должны быть четко описаны, а потенциальные уменьшения измеренной продолжительности солнечного сияния (в часах) в особые часы и дни должны определяться с помощью астрономических расчетов видимой траектории солнца;

   ii) в горных районах (например в долинах) естественные препятствия должны рассматриваться как фактор локального климата и должны четко описываться, как указано выше.

c) На месте установки не должно быть поверхностей, отражающих значительное количество прямой солнечной радиации на приемник, поскольку отраженная солнечная радиация в основном может влиять на результаты измерений контраста. Для исключения таких помех близлежащие поверхности не должны быть окрашены белой либо блестящей краской, их следует очищать от снега или затенять.

Корректировка оси приемника описана выше. Для некоторых приемников рекомендуется изменять наклон оси в зависимости от сезона.

Классификация выбора места для наземных станций приземных наблюдений (см. настоящий том, глава 1, приложение 1.D) предоставляет дополнительные руководящие указания по выбору места и размещению приемников солнечного сияния в рамках выбранного места в целях повышения репрезентативности.

8.4 ОБЩИЕ ИСТОЧНИКИ ПОГРЕШНОСТЕЙ

Погрешности в оценках продолжительности солнечного сияния, полученных с помощью различных приборов и методов, указываются в виде отклонений от эталонных значений, принятых ВМО для погодных условий Гамбурга (Германия) в 1988–1989 гг.

Однако эталонные значения также в некоторой степени содержат погрешности, обусловленные погрешностями калибровки используемого пиргелиометра и размерами его центрального угла (зависимость от ореола). Для единичных значений необходимо, кроме того, учитывать постоянную времени приборов.

Общими источниками погрешностей являются:

a) калибровка регистратора (корректировка порогового эквивалента прямой солнечной радиации (см. 8.5));

b) типичная реакция чувствительности регистратора на изменения метеорологических условий (например, температуры, облачности, пыли) и положения солнца (например, неточность ориентации, солнечный спектр);

c) неправильная установка и неустойчивость основных элементов конструкции приборов;

d) упрощенная или ошибочная оценка измеренных величин;

e) неточности отсчета времени;

f) загрязнение и отложение конденсата на оптической и чувствительной поверхностях прибора;

g) низкий уровень технического обслуживания.

8.5 КАЛИБРОВКА

До описания некоторых методов калибровки целесообразно сделать несколько общих замечаний:

a) отсутствует стандартизированный метод калибровки приемников *SD*;

b) при калибровке на открытом воздухе для получения эталонных данных следует использовать пиргелиометрический метод;

c) ввиду наличия конструктивных различий приемников *SD* и эталонного прибора, а также естественной изменчивости условий измерений, результаты калибровки следует получать путем длительных сравнений (в течение нескольких месяцев);

d) обычно калибровка приемников *SD* требует специальных методов для того, чтобы отрегулировать их пороговое значение (с помощью электроники для электрооптических приборов, с помощью программного обеспечения для пиранометрических систем);

e) для электрооптических приборов с аналоговым выходным устройством период калибровки может быть сравнительно непродолжительным;

f) лабораторный метод (с использованием лампы) рекомендуется, прежде всего, для регулярной проверки устойчивой работы полевых приборов.

8.5.1 Методы калибровки

8.5.1.1 *Сравнение данных о продолжительности солнечного сияния*

Эталонные значения продолжительности солнечного сияния SD_{ref} должны измеряться одновременно со значениями калибруемого приемника SD_{cal}. В качестве эталонного прибора следует использовать пиргелиометр, имеющий устройство слежения за солнцем и соединенный с определителем порога прямой солнечной радиации (см. 8.1.4). Как вариант, можно использовать регулярно калибруемый регистратор солнечного сияния выбранной точности. Поскольку требования к точности порога прямой солнечной радиации, измеряемой приемником, зависят от метеорологических условий (см. 8.1.3), результаты сравнений должны определяться статистически на основе длинных рядов данных измерений.

Если этот метод применяется ко всему ряду данных за определенный период (с типичными условиями облачности), то первый результат калибровки представляет собой соотношение $q_{tot} = \Sigma_{tot} SD_{ref} / \Sigma_{tot} SD_{cal}$.

Для $q > 1$ или $q < 1$ напряжение, эквивалентное пороговому значению, должно быть соответственно отрегулировано к более низким или высоким значениям. Поскольку число необходимых корректировок слабо коррелируется с q_{tot}, необходимы дополнительные периоды последовательных сравнений для того, чтобы постепенно оценить подход к идеальному порогу посредством аппроксимирования $q_{tot} = 1$. Для средних широт Европы продолжительность всего периода калибровки может составлять от 3 до 6 месяцев. Поэтому технические устройства для калибровки сетевых приемников должны предусматривать возможность калибровки одновременно нескольких приемников. (Применение q_{tot} в качестве поправочного коэффициента для величины ΣSD дает надежные результаты только в том случае, если при измерении облачные условия будут такими же, как и в период проведения калибровки. В противном случае использовать данный метод не рекомендуется).

Если описываемый метод калибровки применяется к рядам данных, которые выбираются в соответствии со специальными условиями измерений (облачность, угол высоты солнца, относительная продолжительность солнечного сияния и т. д.), то можно, например, статистически определить факторы $q_{sel} = \Sigma_{sel} SDref / \Sigma_{sel} SD_{cal}$ для различных видов облачности и использовать их для корректировки рядов данных, для которых четко указана облачность.

С другой стороны, корректировка порогового эквивалентного напряжения особенно рекомендуется, если величины q_{sel} рассматриваются в плохих для калибровки условиях облачности (например, облачность типа Ci, As). Повторная процедура для валидации корректировки также необходима. В зависимости от погоды сравнение может проводиться в течение нескольких недель или месяцев.

8.5.1.2 *Сравнение аналоговых сигналов*

Этот метод применяется только для приемников SD, имеющих аналоговый выход, линейно реагирующий на поступление прямой солнечной радиации, по крайней мере в диапазоне менее 500 Вт·м$^{-2}$. Сравнение значений эталонной прямой солнечной радиации, измеряемой пиргелиометром и одновременно измеряемой аналоговым прибором, должно проводиться при безоблачном небе или в другие периоды времени при значениях прямой солнечной радиации менее 500 Вт·м$^{-2}$, незначительно меняющихся во времени.

Анализ линейной связи такого комплекта данных дает наилучшую линию регрессии, по которой можно получить пороговое эквивалентное напряжение для 120 Вт·м$^{-2}$. Если результат калибровки отклоняется от напряжения, указанного в сертификате, более чем на ±20 %, то порог приемника должен быть отрегулирован на новое значение.

Для приемников с ярко выраженной спектральной чувствительностью полученные данные при низких углах высоты солнца и при значениях прямой солнечной радиации около 120 Вт·м$^{-2}$ должны быть исключены из анализа ввиду их спектральной нелинейности, если не представляет интереса пороговое напряжение при восходе и заходе солнца. Пороговое эквивалентное напряжение должно экстраполироваться от более высоких значений прямой солнечной радиации.

8.5.1.3 *Метод определения среднего эффективного порога солнечной радиации (MEIT)*

Так называемый метод MEIT основан на определении солнечной радиации I_m по средним ежечасно измеренным значениям прямой солнечной радиации для калибруемого приемника.

В соответствии с этим методом сперва определяют ежечасные значения продолжительности солнечного сияния $SD_{ref}(h_k, I(n))$ по данным контролируемых компьютером пиргелиометрических измерений для часов h_k и по фиктивным значениям пороговой солнечной радиации $I(n)$, последовательно задаваемым в диапазоне от 60 до 240 Вт·м$^{-2}$ (последнее означает, что $I(n)$ – (60 + n) Вт·м$^{-2}$ при n = 0, 1, 2,...180). Затем оценивают ежечасные значения $SD(h_k)$ на основе данных измерений приемником радиации; полученные таким образом ежечасные оценки сравнивают с $SD_{ref}(h_k, I(n))$ для того, чтобы найти такое $n = n_k$, для которого $SD(h_k)$ равно $SD_{ref}(h_k, I(n))$. Найденное таким образом $I(n_k)$ соответствует среднечасовому эффективному порогу солнечной радиации для сроков h_k: $I_m(h_k)$ = (60 + n_k) Вт·м$^{-2}$. Если n_k не найдено непосредственно, его необходимо определить интерполяцией между соседними значениями.

И, наконец, последним шагом является регулировка порогового эквивалентного напряжения регистратора, если относительное отклонение между средним значением MEIT (значением I_m) и идеальным порогом 120 Вт·м$^{-2}$ составляет более ±20 %. Среднее значение MEIT должно представлять собой, например, среднемесячное значение вследствие большого разброса отклонений ежечасных значений MEIT.

Этот метод неприменим в часы с быстрой сменой пороговых значений; средний градиент за час должен быть менее 5 Вт·м$^{-2}$·с$^{-1}$. Значения MEIT не являются репрезентативными для всего комплекта данных за период калибровки.

8.5.2 **Метод калибровки в лаборатории**

Поскольку в лаборатории моделировать распределение потоков прямого и рассеянного солнечного излучения довольно сложно, можно рекомендовать только «резервную калибровку», которая применима для приемников *SD* с регулируемым пороговым эквивалентным напряжением. Лабораторное контрольное оборудование должно включать стабилизированный источник радиации (желательно со спектром, близким к солнечному) и стенд для точной локальной регулировки приемника *SD*, а также тщательно откалиброванный по солнцу приемник *SD*, который используется в качестве эталонного. Эталонный и калибруемый приемники должны быть одной и той же модели.

В начале проведения испытаний эталонный приемник устанавливается на пути пучка света лампы таким образом, чтобы аналоговое устройство вывода или обычный «переключатель солнечного сияния» показывали 120 Вт·м$^{-2}$. Затем на месте эталонного устройства устанавливается проверяемое устройство, пороговое напряжение которого должно быть отрегулировано, чтобы активизировать переключение или получить эквивалент 120 Вт·м$^{-2}$. Повторные результаты должны быть проверены путем дальнейших поочередных замен приборов.

8.6 ТЕХНИЧЕСКОЕ ОБСЛУЖИВАНИЕ

В техническое обслуживание обычно включается следующее:

a) Очистка. Ежедневная очистка входных окон всех приемников, особенно сканирующих устройств с небольшими углами обзора. Приборы без устройств защиты от росы и инея в дни их появления должны проверяться более одного раза в день.

b) Контроль. Ежедневный контроль касается проверки вращения сканирующих частей, а также проверки значений получаемых данных.

c) Смена лент. В регистраторе солнечного сияния Кэмпбелла-Стокса ежедневно следует заменять ленту; в других устройствах соответствующие носители данных также должны регулярно заменяться.

d) Корректировка. Корректировки необходимы, если сезонное изменение наклона приемника рекомендуется фирмой-изготовителем, а также после сильных штормов.

Техническое обслуживание специальных узлов приемников и систем для сбора данных должно производиться квалифицированными техниками или инженерами, как предусмотрено в инструкциях.

ПРИЛОЖЕНИЕ 8.A. АЛГОРИТМ ВЫЧИСЛЕНИЯ ПРОДОЛЖИТЕЛЬНОСТИ СОЛНЕЧНОГО СИЯНИЯ НА ОСНОВЕ ИЗМЕРЕНИЙ ПРЯМОЙ СУММАРНОЙ СОЛНЕЧНОЙ РАДИАЦИИ

(См. Slob and Monna, 1991)

Определение суточных значений SD основано на суммировании f данных 10-минутных интервалов, а именно $SD = \Sigma\, SD_{10}$, где $SD_{10} = f \leq 10$ мин. На практике $f = 0$ (нет солнечного сияния, все затянуто облаками) или 1 (солнечное сияние, ясное небо), но особое внимание интервалу $0 < f < 1$ (частичное солнечное сияние, частично облачное небо). Вследствие корреляции между SD и суммарной радиацией на горизонтальной поверхности, зависящей от высоты солнца (h), различие устанавливается в первую очередь в отношении sin (h).

Используются следующие переменные:

h высота солнца, градусы
G суммарная радиация на горизонтальной поверхности, Вт·м$^{-2}$
I прямая солнечная радиация на поверхности, перпендикулярной направлению солнца, Вт·м$^{-2}$
D рассеянная солнечная радиации на горизонтальной поверхности, Вт·м$^{-2}$
T_L мутность атмосферы (безразмерная величина)

Для измеренных значений G принимается:

G среднее значение 10-минутных данных о суммарной радиации
G_{min} минимальное значение суммарной радиации из измеренных за 10-минутные интервалы
G_{max} максимальное значение суммарной радиации из измеренных за 10-минутные интервалы ($G_{min} \leq G \leq G_{max}$)

Используемые уравнения:

G_0 $= I_0 \sin(h)$, $I_0 = 1\,367$ Вт·м$^{-2}$ (для «внеземной» радиации)
I $= I_0 \exp(-T_L/(0{,}9 + 9{,}4 \sin(h)))$, $I_0 = 1\,367$ Вт·м$^{-2}$
c $= (G - D)/(I \sin(h))$, где
$T_L = 4$ и
$D = 1{,}2\, G_{min}$, если $(1{,}2\, G_{min} < 0{,}4)$ и
$D = 0{,}4$

<table>
<tr><td>Высота солнца</td><td>sin (h) < 0,1,
h < 5,7°</td><td colspan="2">0,1 ≤ sin (h) ≤ 0,3,
5,7° ≤ h ≤ 17,5°</td><td colspan="6">sin (h) ≥ 0,3,
h ≥ 17,5°</td></tr>
<tr><td rowspan="6">Другие критерии</td><td rowspan="6">Нет других решающих критериев</td><td colspan="2" rowspan="2">При $G/G_0 \leq \{0{,}2 + \sin(h)/3 + \exp(-T_L/(0{,}9 + 9{,}4 \sin(h)))\}$ когда $T_L = 6$?</td><td colspan="6">При $G_{max}/G_0 < 0{,}4$?</td></tr>
<tr><td rowspan="5">If “yes”</td><td colspan="5">If “no”</td></tr>
<tr><td rowspan="2">Если «да»</td><td rowspan="2">Если «нет»</td><td colspan="5">При $G_{min}/G_0 > \{0{,}3 + \exp(-T_L/(0{,}9 + 9{,}4 \sin(h)))\}$ когда $T_L = 10$?</td></tr>
<tr><td rowspan="3">Если «да»</td><td colspan="4">Если «нет»</td></tr>
<tr><td colspan="4">При $G_{max}/G_0 > \{0{,}3 + \exp(-T_L/(0{,}9 + 9{,}4 \sin(h)))\}$ и $G_{max} - G_{min} < 0{,}1\, G_0$ когда $T_L = 10$?</td></tr>
<tr><td>Если «да»</td><td colspan="3">Если «нет»</td></tr>
<tr><td>Итог</td><td>$f = 0$</td><td>$f = 0$</td><td>$f = 1$</td><td>$f = 0$</td><td>$f = 1$</td><td>$f = 1$</td><td>$f = 0$</td><td>$f = c$</td><td>$f = 1$</td></tr>
<tr><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td>$c < 0$</td><td>$0 \leq c \leq 1$</td><td>$c > 1$</td></tr>
</table>

ПРИЛОЖЕНИЕ 8.B. АЛГОРИТМ ВЫЧИСЛЕНИЯ ПРОДОЛЖИТЕЛЬНОСТИ СОЛНЕЧНОГО СИЯНИЯ НА ОСНОВЕ 1-МИНУТНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ СУММАРНОЙ СОЛНЕЧНОЙ РАДИАЦИИ

(Карпентрасский метод; см. WMO, 1998, 2012)

Этот метод, разработанный Региональным радиационным центром ВМО в Карпентрасе (Франция) и описанный Oliviéri (WMO, 1998), включает в себя алгоритм для расчета значений SD каждую минуту посредством измерения 1-минутных средних значений суммарной солнечной радиации (G) по сравнению с пороговым значением (G_{thr}), которое параметризуется двумя коэффициентами (A, B) и высотой солнца h (в частности, sin (h)).

Используются следующие переменные:

h Угловая высота солнца в градусах (см. настоящий том, глава 7, приложение 7.D)

G Суммарная радиация на горизонтальной поверхности Вт·м$^{-2}$ (каждую 1 с, 1 мин усредненно)

Используемые уравнения:

$G_{thr} = F_c$ x Mod

Mod = 1 080 (sin (h))^{1,25}

$F_c = A + B \cos(2\pi d/365)$,

где Mod представляет суммарную солнечную радиацию, полученную в образцовый безоблачный день (ясное небо и среднее значение мутности); F_c представляет коэффициент, эмпирическое значение которого близко к 0,7; тогда как d является номером дня в годовой последовательности.

Фактор F_c, который, как правило, варьируется между 0,5 и 0,8, зависит от климатических условий на местности, тогда как коэффициенты A, B могут быть эмпирически вычислены путем продолжительного сравнения SD и пиргелиометрических измерений (Morel et al., 2012). Как альтернатива, наличие расположенных близко или, что еще лучше, расположенных вместе приборов для измерения мутности атмосферы позволяет с большей точностью определять фактор F_c. Наблюдения показали изменчивость коэффициентов A и B в зависимости от широты (B тяготеет к отрицательным значениям в южном полушарии, тогда как значение A снижается вместе со значением широты).

Алгоритм применяется каждую минуту и может быть выражен следующим образом:

Высота солнца	$h < 3°$	$h \geq 3°$	
Критерии	Нет решений	При $G \geq G_{thr}$?	
		Если «да»	Если «нет»
Итог	SD = 0 мин	SD = 1 мин	SD = 0 мин

Высота солнца должна рассчитываться каждую минуту одновременно с часовым углом солнца, прямым восхождением и геоцентрическим склонением в соответствии с астрономическими формулами, приведенными в настоящем томе, глава 7, приложение 7.D.

Фильтрация данных ($h \geq 3°$) применяется перед проведением основной проверки и позволяет фильтровать ошибки, связанные с несовершенством модели, высотой солнца (низкие высоты) и атмосферной рефракцией. Допускается отклонение 3° над горизонтом в отношении требования, согласно которому приемники SD должны непрерывно располагаться с видом на солнце в любое время года. Ошибки, вызванные фильтрацией данных по h, приводят к небольшому занижению, которое в связи с систематическим

характером таких ошибок может быть скорректировано после продолжительного периода измерений. Сравнение этого метода с другими методами и со справочными данными по SD приводится в публикации ВМО (WMO, 2012).

СПРАВОЧНАЯ И ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ЛИТЕРАТУРА

Всемирная метеорологическая организация, 1962: *Сокращенный окончательный отчет третьей сессии Комиссии по приборам и методам наблюдений* (ВМО-№ 116, R.P. 48). Женева.

———, 1982: *Сокращенный окончательный отчет восьмой сессии Комиссии по приборам и методам наблюдений* (ВМО-№ 590). Женева.

———, 1990: *Сокращенный окончательный отчет десятой сессии Комиссии по приборам и методам наблюдений* (ВМО-№ 727). Женева.

———, 2015 (обновлено в 2017 г.): *Наставление по Глобальной системе наблюдений* (ВМО-№ 544), том I. Женева.

Angell, J.K., 1990: Variation in United States cloudiness and sunshine duration between 1950 and the drought year of 1988. *Journal of Climate*, 3:296–308.

Baumgartner, T., 1979: Die Schwellenintensität des Sonnenscheinautographen Campbell-Stokes an wolkenlosen Tagen. *Arbeitsberichte der Schweizerischen Meteorologischen Zentralanstalt*, No. 84, Zürich.

Bider, M., 1958: Über die Genauigkeit der Registrierungen des Sonnenscheinautographen Campbell-Stokes. *Archiv für Meteorologie, Geophysik und Bioklimatologie*, Serie B, 9(2):199-230.

Coulson, K.L., 1975: *Solar and Terrestrial Radiation. Methods and Measurements*. Academic Press, New York, pp. 215–233.

Dyson, P., 2003: *Investigation of the Uncertainty of Sunshine Duration in the Solar and Terrestrial Radiation Network*. Instrument Test Report 674, Commonwealth Bureau of Meteorology.

Foster, N.B. and L.W. Foskett, 1953: A photoelectric sunshine recorder. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 34:212–215.

Golchert, H.J., 1981: Mittlere Monatliche Global-strahlungsverteilungen in der Bundesrepublik Deutschland. *Meteorologische Rundschau*, 34:143–151.

Hameed, S. and I. Pittalwala, 1989: An investigation of the instrumental effects on the historical sunshine record of the United States. *Journal of Climate*, 2:101–104.

Hinssen, Y.B.L. and W.H. Knap, 2007: Comparison of pyranometric and pyrheliometric methods for the determination of sunshine duration. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 24(5):835–846.

Ikeda, K., T. Aoshima and Y. Miyake, 1986: Development of a new sunshine-duration meter. *Journal of the Meteorological Society of Japan*, 64(6):987–993.

Jaenicke, R. and F. Kasten, 1978: Estimation of atmospheric turbidity from the burned traces of the Campbell-Stokes sunshine recorder. *Applied Optics*, 17:2617–2621.

Morel, J.P., E. Vuerich, J. Oliviéri and S. Mevel, 2012: Sunshine duration measurements using the Carpentras method. Baseline Surface Radiation Network meeting, Postdam, Germany, 1–3 August 2012.

Painter, H.E., 1981: The performance of a Campbell-Stokes sunshine recorder compared with a simultaneous record of normal incidence irradiance. *The Meteorological Magazine*, 110:102–109.

Slob, W.H. and W.A.A. Monna, 1991*: Bepaling van een directe en diffuse straling en van zonneschijnduur uit 10-minuutwaarden van de globale straling*. KNMI TR136, de Bilt.

Sonntag, D. and K. Behrens, 1992: Ermittlung der Sonnenscheindauer aus pyranometrisch gemessenen Bestrahlungsstärken der Global-und Himmelsstrahlung. *Berichte des Deutschen Wetterdienstes*, No. 181.

Stanghellini, C., 1981: A simple method for evaluating sunshine duration by cloudiness observations. *Journal of Applied Meteorology*, 20:320–323.

World Meteorological Organization, 1984*a*: Diffuse solar radiation measured by the shade ring method improved by a new correction formula (K. Dehne). Paper presented at the WMO Technical Conference on Instruments and Cost-effective Meteorological Observations (TECEMO). Instruments and Observing Methods Report No. 15. Geneva.

———, 1984*b*: A new sunshine duration sensor (P. Lindner). Paper presented at the WMO Technical Conference on Instruments and Cost-effective Meteorological Observations (TECEMO). Instruments and Observing Methods Report No. 15. Geneva.

———, 1985: Dependence on threshold solar irradiance of measured sunshine duration (K. Dehne). Paper presented at the Third WMO Technical Conference on Instruments and Methods of Observation (TECIMO-III). Instruments and Observing Methods Report No. 22 (WMO/TD-No. 50). Geneva.

———, 1986: *Radiation and Sunshine Duration Measurements: Comparison of Pyranometers and Electronic Sunshine Duration Recorders of RA VI* (G. Major). Instruments and Observing Methods Report No. 16 (WMO/TD-No. 146). Geneva.

———, 1998: Sunshine duration measurement using a pyranometer (J.C. Oliviéri). Paper presented at the WMO Technical Conference on Meteorological and Environmental Instruments and Methods of Observation (TECO-98). Instruments and Observing Methods Report No. 70 (WMO/TD-No. 877). Geneva.

———, 2012: Updating and development of methods for worldwide accurate measurements of sunshine duration (E. Vuerich, J.P. Morel, S. Mevel, J. Oliviéri). Paper presented at the WMO Technical Conference on Meteorological and Environmental Instruments and Methods of Observation (TECO-2012). Instruments and Observing Methods Report No. 109. Geneva.

ГЛАВА 9. ИЗМЕРЕНИЕ ВИДИМОСТИ

9.1 ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

9.1.1 Определения

Видимость традиционно определялась для метеорологических целей как параметр, который должен оцениваться наблюдателем, причем такого рода наблюдения широко используются. Однако оценка видимости зависит от многих субъективных и физических факторов. Необходимый метеорологический параметр, которым является прозрачность атмосферы, может быть измерен объективно и представлен как метеорологическая оптическая дальность (МОД).

Метеорологическая оптическая дальность. Длина пути светового потока в атмосфере, необходимая для уменьшения этого потока в параллельном пучке лучей от лампы накаливания при цветовой температуре 2 700 K до 5 % его первоначального значения. Световой поток оценивается по функции фотометрической яркости Международной комиссии по освещению (МКО), которая описывает среднюю спектральную чувствительность зрительного восприятия яркости человеком (см. 9.4.1).

Видимость, метеорологическая видимость в дневное время и метеорологическая видимость в ночное время[1]**.** Определяются как наибольшее расстояние, на котором черный объект, имеющий подходящие размеры и находящийся у поверхности земли, можно увидеть и распознать в дневное время или можно увидеть и распознать в ночное время, повысив общую освещенность до уровня нормальной дневной освещенности (ВМО, 1992*a*).

Дальность прямой видимости (метеорологическая). Расстояние, на котором видимый контраст наблюдаемого тела на фоне равен порогу чувствительности глаза наблюдателя (ВМО, 1992*a*).

Воздушная дымка. Создается светом от солнца и неба, рассеянным в глаза наблюдателя атмосферными аэрозолями (и в небольшой степени молекулами воздуха), находящимися в конусе зрения наблюдателя. Рассеянный свет достигает глаза таким же образом, как и рассеянная радиация достигает поверхности Земли. Воздушная дымка является основным фактором, ограничивающим горизонтальную видимость черных объектов в дневное время за счет ее интегрированного воздействия вдоль конуса зрения от глаза до объекта, выражающегося в повышении видимой яркости достаточно отдаленного черного объекта до уровня, который не позволяет отличить его от фоновой яркости неба. В отличие от случая субъективного восприятия, большая часть рассеянного света попадает в глаз наблюдателя из той части конуса его зрения, которая находится от него на довольно близком расстоянии.

---

[1] Во избежание путаницы, видимость в ночное время не следует определять просто как «наибольшее расстояние, на котором можно увидеть и распознать источники света определенной умеренной силы» (см. Сокращенный окончательный отчет одиннадцатой сессии Комиссии по приборам и методам наблюдений (ВМО-№ 807)). Если видимость следует определять, исходя из оценки источников света, рекомендуется оценивать дальность видимости по точно определенной интенсивности света и ее практическому применению, подобно дальности видимости на ВПП. Тем не менее, на своей одиннадцатой сессии КПМН признала необходимость дальнейших исследований для разрешения практических трудностей, возникающих в связи с употреблением этого определения.

В различных стандартах, таких как стандарт Международной электротехнической комиссии (МЭК), подробно описаны следующие четыре фотометрических качества (МЭК, 1987):

a) *Световой поток* (обозначение: F (или Φ), единица: люмен): параметр, рассчитываемый по потоку излучения при оценке излучения по его действию на стандартного фотометрического наблюдателя МКО;

b) *сила света* (обозначение: I, единица: кандела или лм·ср$^{-1}$): отношение светового потока к единице телесного угла;

c) *яркость* (обозначение: L, единица: кд·м$^{-2}$): отношение силы света к единице площади;

d) *освещенность* (обозначение: E, единица: люкс или лм·м$^{-2}$) — отношение светового потока к площади освещаемой им поверхности.

Коэффициент ослабления (обозначение σ). Это дает степень, в которой световой поток коллимированного пучка лучей, излучаемого источником накаливания при цветовой температуре 2 700 K, уменьшается при прохождении единицы расстояния в атмосфере. Этот коэффициент является мерой ослабления, возникающего в результате как поглощения, так и рассеивания.

Яркостный контраст (обозначение C). Отношение разности между яркостью объекта и яркостью его фона к яркости фона.

Пороговый контраст (обозначение ε). Минимальное значение контраста яркости, который может различить глаз человека, т. е. значение, которое позволяет отличить объект от его фонового освещения. Пороговый контраст у разных людей различный.

Пороговая освещенность (обозначение E_t). Наименьшая освещенность на зрачке глаза наблюдателя, которая позволяет обнаруживать точечные источники света на фоне с данной яркостью. В связи с этим значение E_t изменяется в зависимости от условий освещения.

Показатель пропускания (обозначение T). Определяется для коллимированного пучка лучей, испускаемых источником накаливания при цветовой температуре 2 700 K, как часть светового потока, сохраняющаяся в потоке после прохождения им в атмосфере оптического пути заданной длины. Показатель пропускания называется также коэффициентом пропускания. Термины «коэффициент пропускания» или «пропускная способность атмосферы» используются при определении пути, т. е. конкретной длины (например, в случае с трансмиссометром). В последнем случае T часто умножается на 100 и выражается в %.

Аэродром. Определенный участок земной или водной поверхности (включая любые здания, сооружения и оборудование), предназначенный полностью или частично для прибытия, отправления и движения по этой поверхности воздушных судов (ИКАО, 2016).

9.1.2 Единицы измерения и шкалы

Метеорологическая видимость, или МОД, выражается в метрах или в километрах. Диапазон измерений зависит от дальнейшего использования данных. В то время как для потребностей синоптической метеорологии диапазон измерений МОД составляет 100 м – 70 км и более, для других применений он может быть более узким. Так, в гражданской авиации верхней границей может быть и 10 км. Этот диапазон может быть еще более сужен при применении к измерению дальности видимости на взлетно-посадочной полосе, определяющей условия для взлета и посадки при низкой видимости. Дальность видимости на взлетно-посадочной полосе (ВПП) требуется от 50 м или ниже

до 2 000 м и рассчитывается на основе МОД с использованием, среди прочих переменных, интенсивности освещения ВПП и фоновой яркости (см. том III, глава 2 настоящего Руководства). Для других применений, таких как обеспечение дорожного движения или морской навигации, диапазон измерений зависит от потребностей и от места проведения измерений.

Ошибки в данных измерений видимости увеличиваются пропорционально видимости, что учитывается в шкалах измерений. Указанный факт отражен в коде, применяемом для синоптических сводок, путем использования трех линейных интервалов с уменьшающимся разрешением, а именно: при видимости 100–5 000 м она передается в значениях, кратных 100 м; при видимости 6–30 км — в значениях, кратных 1 км, и при видимости 35–70 км — в значениях, кратных 5 км. Эти шкалы позволяют передавать данные о видимости с разрешением, превышающим точность измерения, за исключением тех случаев, когда видимость составляет менее 1 000 м.

9.1.3 Метеорологические требования

Понятие «видимость» широко применяется в метеорологии в двух совершенно определенных значениях. Во-первых, это один из параметров, позволяющих оценить характеристики воздушной массы специально для нужд синоптической метеорологии и климатологии. В этом случае видимость является показателем оптического состояния атмосферы. Во-вторых, это оперативный параметр, соответствующий определенным критериям или специальным применениям. В этом случае видимость выражается в виде расстояния, на котором можно видеть конкретные маркеры или огни.

Одно из наиболее важных специальных применений — метеорологическое обслуживание авиации (см. том III, глава 2 настоящего Руководства).

Мера видимости, используемая в метеорологии, должна быть свободна от влияния условий, не являющихся метеорологическими, но она должна быть просто связана с субъективными представлениями о видимости и расстоянием, на котором обычные объекты могут наблюдаться в нормальных условиях. Концепция МОД была разработана для удовлетворения этих потребностей, поскольку она удобна для использования инструментальных методов в дневное и ночное время, а также хорошо связана с другими мерами видимости. МОД была официально принята ВМО в качестве меры видимости как для использования в авиации, так и для широкого применения (WMO, 2014). Это понятие также признано Международной электротехнической комиссией (МЭК, 1987) для использования в атмосферной оптике и визуальной сигнализации.

МОД связана с субъективными представлениями о видимости через пороговый контраст. В 1924 г. Кошмидер, а за ним Геймгольц, предложили для ε значение 0,02. Другими авторами были предложены иные значения. Они колеблются от 0,007 7 до 0,06 или даже до 0,2. Меньшие значения дают большую дальность видимости для данных атмосферных условий. Для требований авиации принято, что ε превышает 0,02 и принимается за 0,05, поскольку для пилота контрастность объекта (маркировочные огни на ВПП) на фоне окружающей местности гораздо меньше контрастности объекта на фоне горизонта. Предполагается, что когда наблюдатель может едва видеть и распознавать черный объект на фоне горизонта, то видимая контрастность объекта составляет 0,05, в связи с чем, как будет показано ниже, именно значение 0,05 было выбрано в качестве коэффициента пропускания, принятого в определении для МОД.

Требования к точности МОД, дальности видимости на взлетно-посадочной полосе и фоновой освещенности приведены в настоящем томе, глава 1.

9.1.4 Методы измерения

Видимость представляет собой сложное психофизическое явление, обусловленное, главным образом, коэффициентом ослабления, связанным с твердыми и жидкими частицами, находящимися в атмосфере во взвешенном виде; ослабление обусловлено, главным образом, рассеиванием, а не поглощением света. Оценка видимости зависит от индивидуальной способности восприятия и интерпретации, а также от характеристик источника света и коэффициента пропускания. Таким образом, любая визуальная оценка видимости является субъективной.

Когда видимость оценивается человеком (наблюдателем), она зависит не только от фотометрических и размерных характеристик объекта, которые воспринимаются или должны восприниматься, но и от порогового контраста наблюдателя. В темное время суток она зависит от яркости источников света, фоновой освещенности и — при оценке ее наблюдателем — от адаптации к темноте глаз наблюдателя, а также от пороговой освещенности. Оценка видимости в темное время суток является особенно сложной. Первое определение видимости в ночное время в 9.1.1 дается как эквивалент видимости в дневное время, для того чтобы обеспечить отсутствие искусственных изменений при оценке видимости на рассвете и в сумерках. Второе определение имеет практические применения, особенно для требований авиации, однако оно отличается от первого, и обычно при его использовании получают другие результаты. Однако очевидно, что оба они не являются точными.

С помощью инструментальных методов измеряют коэффициент ослабления, по которому можно рассчитать МОД. Затем на основе данных о пороговых контрастах и освещенности или путем задания для них согласованных значений можно рассчитать видимость. Шепард (1983) указал на то, что «строгое соблюдение определения (МОД) потребует установки прожектора и приемника с соответствующими спектральными характеристиками на двух платформах, которые можно разнести (например, вдоль железной дороги) так, чтобы коэффициент пропускания составлял 5 %. Любые другие методы дают только оценку МОД.».

Однако применяемые на практике приборы используются, исходя из предположения о том, что коэффициент ослабления не зависит от расстояния. С помощью одних приборов непосредственно измеряют ослабление, а с помощью других измеряют рассеяние света для того, чтобы рассчитать коэффициент ослабления. Они описываются в 9.3. Краткий анализ физики видимости, сделанный в настоящей главе, может быть полезен для понимания взаимосвязи между различными методами измерений коэффициента ослабления, а также для рассмотрения приборов, используемых для его измерения.

Визуальное восприятие — видимость днем и ночью

Условия визуального восприятия основаны на измерении эффективности восприятия глазом человека в дневное время монохроматического излучения в видимом спектре. Термины *«дневное видение»* и *«ночное видение»* относятся к условиям дневного и ночного времени соответственно.

Прилагательное *«дневное»* относится к состоянию аккомодации глаза к внешней освещенности в условиях дневного времени. Более точно дневное видение определяется как зрительная реакция наблюдателя с нормальным зрением на раздражитель, которым является свет, падающий на ямку сетчатки (наиболее чувствительную центральную часть сетчатки), с помощью которой различаются мельчайшие детали и цвета при названных условиях аккомодации к свету.

При дневном видении (зрении посредством центральной части сетчатки) относительная чувствительность глаза к свету изменяется в зависимости от длины волны падающего света. При дневном видении чувствительность глаза максимальна при длине волны 555 нм. Кривая относительной чувствительности глаза к различным длинам волн видимого

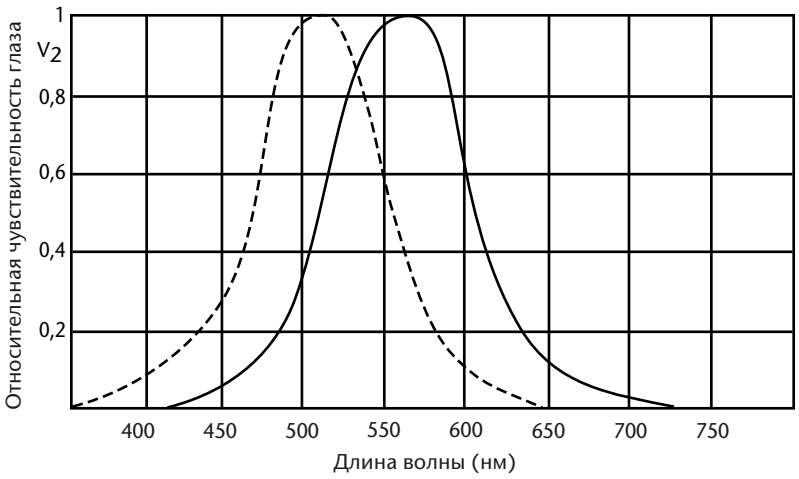


Рисунок 9.1. Относительная чувствительность глаза человека к монохроматическому излучению. Сплошная линия — дневное видение, штриховая линия — ночное видение.

спектра может быть построена путем определения чувствительности к волне длиной 555 нм в качестве эталонной величины. На рисунке 9.1 представлена кривая, принятая МКО для среднего нормального наблюдателя.

Зрение в темное время суток называется ночным видением (это зрение, при котором возникает возбуждение палочек, а не колбочек сетчатки). Палочки, находящиеся на периферии сетчатки, не обладают чувствительностью к цвету или тонким деталям, но особенно чувствительны к свету низкой интенсивности. При ночном видении максимальная чувствительность глаза соответствует длине волны 507 нм.

Ночное видение требует длительного периода аккомодации (до 30 мин), тогда как период аккомодации при дневном видении составляет всего лишь 2 мин.

Основные уравнения

Основное уравнение для измерения видимости — это закон Бугера–Ламберта:

$$F = F_0\, e^{-\sigma x} \tag{9.1}$$

где F — световой поток, принимаемый после прохождения пути длиной x в атмосфере, а F_0 — поток при $x = 0$ и σ— коэффициент ослабления на единицу длины. Путем дифференцирования мы получаем:

$$\sigma = \frac{-dF}{F} \cdot \frac{1}{dx} \tag{9.2}$$

Следует принять во внимание, что этот закон действителен только для монохроматического света, однако может применяться с хорошей аппроксимацией и для спектрального потока. Коэффициент пропускания описывается выражением:

$$T = F/F_0 \tag{9.3}$$

Математические зависимости между МОД и различными параметрами, характеризующими оптическое состояние атмосферы, могут выводиться из закона Бугера–Ламберта. Соотношение между коэффициентом пропускания и МОД справедливо для капель тумана, но в тех случаях, когда видимость ухудшена за счет других гидрометеоров (таких как дождь или снег) или литометеоров (таких как низовая песчаная метель), значения МОД следует интерпретировать с большей осторожностью.

Из уравнений 9.1 и 9.3 следует, что

$$T = F / F_0 = e^{-\sigma x} \tag{9.4}$$

Если применить этот закон для определения значения МОД при $T = 0{,}05$, и, установив $x = P$, где P обозначает МОД,, то может быть записано следующее:

$$T = 0{,}05 = e^{-\sigma P} \tag{9.5}$$

Отсюда математическое соотношение между МОД и коэффициентом ослабления можно представить, как:

$$P = \left(1/\sigma\right) \cdot \ln\left(1/0{,}05\right) \approx 3/\sigma \tag{9.6}$$

где ln — логарифм по основанию e, или натуральный логарифм. Объединяя уравнение 9.4, выведенное из закона Бугера–Ламберта, с уравнением 9.6, получаем:

$$P = x \cdot \ln\left(0{,}05\right)/\ln\left(T\right) \tag{9.7}$$

Эта формула взята за основу для измерения МОД с помощью трансмиссометров, причем x в данном случае равно базовой линии трансмиссометра a в уравнении 9.14.

Метеорологическая видимость в дневное время

Яркостный контраст определяется как:

$$C = \frac{L_b - L_h}{L_h} \tag{9.8}$$

где L_h — яркость горизонта, а L_b — яркость объекта.

Яркость неба на горизонте обусловлена светом, рассеянным вдоль линии зрения наблюдателя.

Следует отметить, что если объект темнее, чем горизонт, то значение C является отрицательным, а если объект черный ($L_b = 0$), то $C = -1$.

В 1924 г. Кошмидер установил взаимосвязь, которая стала известна как закон Кошмидера, между кажущимся контрастом (C_x) объекта, который видит на фоне горизонта наблюдатель, находящийся на определенном расстоянии, и действительным контрастом (C_0), т. е. контрастом объекта, который был бы виден на фоне горизонта с очень близкого расстояния. Уравнение Кошмидера может быть записано в следующем виде:

$$C_x = C_0\, e^{-\sigma x} \tag{9.9}$$

Это уравнение справедливо при условии, что коэффициент рассеяния не зависит от угла азимута, а освещение является однородным вдоль всей линии между наблюдателем, объектом и горизонтом.

Если черный объект наблюдается на фоне горизонта ($C_0 = -1$) и видимый контраст составляет –0,05, то уравнение 9.9 сокращается до следующего вида:

$$0{,}05 = e^{-\sigma x} \tag{9.10}$$

Сравнение этого результата с уравнением 9.5 показывает, что если видимый контраст черного объекта, наблюдаемого на фоне горизонта, составляет 0,05, то этот объект находится на расстоянии МОД (P).

Метеорологическая видимость в темное время суток

Расстояние, на котором свет (маркера для определения видимости в ночное время) может быть виден ночью, не просто связано с МОД. Оно зависит не только от МОД и силы света, но и от освещения от других источников света, которое видит наблюдатель.

В 1876 г. Аллард предложил закон ослабления света от точечного источника известной силы (I) как функцию расстояния (x) и коэффициента ослабления (σ). Освещенность (E) точечным источником света определяется как:

$$E = I \cdot x^{-2} \cdot e^{-\sigma x} \tag{9.11}$$

Когда свет едва видим, $E = E_t$ можно записать следующее уравнение:

$$\sigma = (1/x) \cdot \ln\left\{ I \Big/ \left(E_t \cdot x^2 \right) \right\} \tag{9.12}$$

Принимая во внимание, что $P = (1/\sigma) \cdot \ln(1/0{,}05)$ (уравнение 9.6), мы можем написать:

$$P = x \cdot \ln(1/0{,}05) \Big/ \ln\left(I \Big/ \left(E_t \cdot x^2 \right) \right) \tag{9.13}$$

Соотношение между МОД и расстоянием, на котором могут быть видны огни, рассматриваются в 9.2.3, а использование этого уравнения для визуальных наблюдений описывается в 9.2.

9.2 ВИЗУАЛЬНАЯ ОЦЕНКА МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКОЙ ОПТИЧЕСКОЙ ДАЛЬНОСТИ

9.2.1 Общие сведения

Визуальная оценка метеорологической оптической дальности может проводиться метеорологом-наблюдателем, использующим естественные или искусственные объекты (группы деревьев, скалы, вышки, выдвижные устройства, церкви, огни и т. д.).

Для каждой станции следует подготовить план объектов, используемых для наблюдений, с указанием расстояний до них и пеленгов от наблюдателей. Этот план должен включать объекты, пригодные для наблюдений в дневное время, и объекты, пригодные для наблюдений в темное время суток. Наблюдатель также должен уделять особое внимание существенным изменениям МОД по направлениям во время оценки видимости.

Наблюдения должен проводить наблюдатель с нормальным зрением, соответствующим образом подготовленный. Как правило, наблюдения должны проводиться без использования каких-либо дополнительных оптических устройств (бинокля, телескопа, теодолита и т. д.), и желательно не проводить наблюдения через окно, особенно когда объекты или огни наблюдаются в ночное время. Глаза наблюдателя должны быть на нормальной высоте над поверхностью земли (около 1,5 м); таким образом, наблюдения не должны проводиться с верхних этажей командно-диспетчерских пунктов или других высоких зданий. Это особенно важно в условиях низкой видимости.

Когда видимость меняется в разных направлениях, записанное или сообщенное значение может зависеть от методов кодирования сводки. В синоптических сообщениях следует передавать нижние значения видимости, но в сводках для авиации следует руководствоваться указаниями ВМО (WMO, 2014).

9.2.2 Оценка метеорологической оптической дальности в дневное время

При наблюдениях в дневное время визуальная оценка видимости дает хорошую аппроксимацию истинного значения МОД.

При условии соблюдения следующих требований для наблюдений в дневное время следует выбирать как можно больше объектов, расположенных на разных расстояниях. Выбирать нужно только черные или почти черные по цвету объекты, выделяющиеся на фоне неба на горизонте. Следует по мере возможности избегать выбора объектов светлых тонов, расположенных близко к поверхности земли. Это особенно важно в условиях, когда объект освещается солнцем. В случае, если альбедо объекта не превышает 25 %, погрешность при облачном небе не превысит 3 %, в то время как при солнечном освещении она может быть гораздо больше. Так, например, дом белого цвета будет непригоден для выбора в качестве объекта, а вот группа темных деревьев подходит для этой цели, за исключением тех случаев, когда они ярко освещены солнцем. Если приходится использовать объект на фоне наземных предметов, то он должен быть расположен гораздо ближе своего фона, т. е. по меньшей мере посередине между точкой наблюдения и фоном. Например, дерево, стоящее на опушке леса, будет неподходящим объектом для наблюдений видимости.

Для того чтобы наблюдения были репрезентативными, используемые объекты должны противолежать глазу наблюдателя под углом не менее 0,5°. Объект, противолежащий под углом менее этой величины, становится невидимым на меньшем расстоянии, чем более крупный объект при тех же условиях. Следует отметить, что отверстие диаметром 7,5 мм, пробитое в карточке, которую наблюдатель держит на расстоянии вытянутой руки, дает примерно такой угол; поэтому рассматриваемый через отверстие объект должен полностью его заполнять. Вместе с тем, нельзя допускать, чтобы такой объект противолежал под углом зрения более 5°.

9.2.3 Оценка метеорологической оптической дальности в ночное время

Методы оценки МОД в ночное время с помощью визуальных наблюдений путем определения расстояний, на которых воспринимаются источники света, описываются ниже.

В качестве объекта для определения видимости можно использовать любой источник света при условии, что его сила в направлении наблюдателя хорошо определена и известна. Желательно, однако, использовать огни, которые могут рассматриваться в качестве точечных источников и сила которых в каком-либо одном направлении не выше, чем в другом, и не ограничена телесным углом, который слишком мал. Следует позаботиться о том, чтобы была обеспечена механическая и оптическая стабильность источника света.

Необходимо проводить различие между источниками, известными как точечные, по соседству с которыми нет других источников или освещенных зон, и группами огней, если даже они отделены друг от друга. В последнем случае такое расположение может оказать влияние на видимость каждого источника, рассматриваемого по отдельности. Для измерения видимости в ночное время рекомендуется использовать только точечные источники, распределенные должным образом.

Следует отметить, что на ночные наблюдения видимости с использованием освещаемых объектов может оказать заметное влияние освещение окружающей местности и физиологические эффекты ослепляющих и других огней, даже если они находятся вне поля зрения. Это влияние еще больше усиливается, если наблюдения проводятся через окно. Таким образом, точное и надежное наблюдение можно провести лишь из темного и должным образом выбранного места.

Более того, нельзя недооценивать значение физиологических факторов, поскольку это серьезный источник разброса получаемых значений наблюдений. Важно, чтобы такие

измерения проводили только квалифицированные наблюдатели с нормальным зрением. Необходимо также предусматривать период адаптации (обычно от 5 до 15 минут), в течение которого глаза привыкают к темноте.

Для практических целей связь между расстоянием, на котором воспринимается источник света в ночное время, и значением МОД может быть выражена двумя различными способами:

a) для каждого значения МОД задается такая сила света, при которой отмечается прямое соответствие между расстоянием, на котором огонь едва виден, и значением МОД;

b) для огня заданной силы света устанавливается соотношение между расстоянием, на котором воспринимается огонь, и значением МОД.

Второй способ является более простым и, кроме того, более практичным, поскольку весьма сложно установить источники света различной силы на разных расстояниях. Указанный метод включает использование источников света, которые или уже имеются, или устанавливаются вокруг станции, и замену I, x и E_t в уравнении 9.13 соответствующими значениями для имеющихся источников света. Таким образом, метеорологические службы могут подготовить таблицы, где значения МОД даются как функции фоновой яркости и источников света известной силы. Значения, которые должны задаваться пороговой освещенности E_t существенно различаются в зависимости от яркости фона. Следует использовать следующие значения, которые может использовать средний наблюдатель:

a) $10^{-6,0}$ лк для наблюдений в сумерках и на рассвете или когда едва видимый свет исходит от искусственных источников;

b) $10^{-6,7}$ лк для наблюдений при лунном свете или когда еще не совсем темно;

c) $10^{-7,5}$ лк для наблюдений в полной темноте или только при свете звезд.

В таблицах 9.1 и 9.2 приводятся соотношения между МОД и расстоянием, на котором воспринимаются источники света, для каждого из вышеупомянутых методов при различных условиях наблюдений. Они были составлены как руководство для

Таблица 9.1. Соотношение между МОД и силой едва видимого точечного источника света для трех значений E_t

МОД	*Сила света (кандела) ламп, едва видимых на расстояниях, указанных в графе для P*		
P (м)	*В сумерках ($E_t = 10^{-6,0}$)*	*При лунном свете ($E_t = 10^{-6,7}$)*	*В полной темноте ($E_t = 10^{-7,5}$)*
100	0,2	0,04	0,006
200	0,8	0,16	0,025
500	5	1	0,16
1 000	20	4	0,63
2 000	80	16	2,5
5 000	500	100	16
10 000	2 000	400	63
20 000	8 000	1 600	253
50 000	50 000	10 000	1 580

Таблица 9.2. Соотношение между МОД и расстоянием, на котором точечный источник света в 100 кд едва виден, для трех значений E_t

МОД	*Дальность восприятия (м) лампы в 100 кд как функция значения МОД*		
P (м)	*В сумерках* ($E_t = 10^{-6,0}$)	*При лунном свете* ($E_t = 10^{-6,7}$)	*В полной темноте* ($E_t = 10^{-7,5}$)
100	250	290	345
200	420	500	605
500	830	1 030	1 270
1 000	1 340	1 720	2 170
2 000	2 090	2 780	3 650
5 000	3 500	5 000	6 970
10 000	4 850	7 400	10 900
20 000	6 260	10 300	16 400
50 000	7 900	14 500	25 900

метеорологических служб с целью помощи в выборе или установке огней при наблюдениях видимости в ночное время и для подготовки инструкций для их наблюдателей в целях расчета значений МОД.

Обычная лампочка накаливания мощностью 100 Вт обеспечивает источник света приблизительно в 100 кд.

Ввиду наличия существенных различий, обусловленных относительно небольшими изменениями пороговой освещенности и разными условиями общей освещенности, очевидно, что таблица 9.2 предназначена не для того, чтобы дать абсолютный критерий видимости, а для того, чтобы показать необходимость калибровки огней, используемых для оценки МОД в темное время суток; это гарантирует, насколько возможно, сравнимость наблюдений в темное время суток в различных местах и проводимых различными службами.

9.2.4 Оценка метеорологической оптической дальности при отсутствии удаленных объектов

В определенных местах (открытая равнина, судно и т. д.), а также из-за ограниченного горизонта (долина или ледниковый кар) или отсутствия подходящих удаленных объектов невозможно проводить прямые оценки, за исключением наблюдений при относительно низкой видимости. При отсутствии инструментальных методов значения МОД, превышающие значения, для которых имеются объекты видимости, должны быть получены по общей прозрачности атмосферы. Это можно сделать, если принять во внимание, насколько отчетливо вырисовываются удаленные объекты. Четкие очертания и характерные признаки при небольшом ослаблении цвета или без всякого ослабления цвета указывают на то, что МОД больше расстояния между объектом и наблюдателем. С другой стороны, нечеткие объекты указывают на наличие дымки или других явлений, уменьшающих МОД.

9.2.5 Точность визуальных наблюдений

Общие сведения

Наблюдения объектов обычно должны выполняться наблюдателями, прошедшими специальную подготовку и обладающими зрением, которое принято называть нормальным. Этот человеческий фактор имеет существенное значение при оценке видимости в данных атмосферных условиях, поскольку восприятие и визуальная способность интерпретации у разных людей различны.

Точность визуальных оценок метеорологической оптической дальности в дневное время

Наблюдения показывают, что значения МОД, основанные на инструментальных измерениях, хорошо согласуются с визуальными оценками видимости в дневное время. Видимость и МОД должны быть равны в том случае, если пороговый контраст у наблюдателя составляет 0,05 (при использовании критерия распознавания), а коэффициент ослабления характеризуется одинаковыми значениями вблизи прибора, и между наблюдателем и объектами.

Middleton (1952) на основании 1 000 измерений обнаружил, что средний пороговый контраст для группы из 10 молодых служащих ВВС, подготовленных в качестве метеорологических наблюдателей, составлял 0,033 при разбросе для отдельных наблюдений от 0,01 и менее до 0,2 и более. Sheppard (1983) указал на то, что, когда данные Мидлтона наносятся на логарифмическую шкалу, то они показывают хорошее согласие с распределением Гаусса. Если данные Мидлтона репрезентативны для нормальных условий наблюдений, то мы должны ожидать, что значения оценок видимости в дневное время в среднем будут на 14 % выше, чем МОД, при среднем квадратическом отклонении от МОД 20 %. Эти расчеты прекрасно согласуются с результатами, полученными в ходе Первых сравнений ВМО по измерению видимости (WMO, 1990), которые показали, что значения видимости, полученные наблюдателями в дневное время, оказались на 15 % выше, чем данные инструментальных измерений МОД. Диапазон интерквантильных различий между значениями, полученными наблюдателями и с помощью приборов, составлял около 30 % измеренной МОД. Это соответствует среднему квадратическому отклонению приблизительно 22 % в случае распределения Гаусса.

Точность визуальных оценок метеорологической оптической дальности в темное время суток

Из таблицы 9.2 в 9.2.3 ясно видно, насколько значения МОД могут вводить в заблуждение в том случае, если они основаны только на расстоянии, на котором можно видеть огонь, без должного учета силы света и условий наблюдений. Это подчеркивает необходимость предоставления наблюдателям четких, точных инструкций и обучения их проведению наблюдений видимости.

Следует принять во внимание, что на практике использование методов и таблиц, описанных выше, для подготовки схем размещения излучающих свет объектов не всегда является легкой задачей. Источники света, используемые в качестве объектов, не обязательно удачно расположены или стабильны, не всегда известна сила их света и не всегда они являются точечными. Что касается последнего, то огни могут быть в виде широкого или узкого луча, они могут быть сгруппированы или даже быть разных цветов, к которым глаз имеет различную чувствительность. При использовании таких огней следует соблюдать большую осторожность.

Визуальная оценка дальности видимости огней может давать надежные результаты для видимости в темное время суток только в тех случаях, когда огни и их фон тщательно подобраны, условия наблюдений, в которых находится лицо, их проводящее, тщательно контролируются, а наблюдению может быть посвящено значительное время, для того

чтобы обеспечить полную аккомодацию глаз наблюдателя к условиям наблюдений. Результаты первых сравнений ВМО по измерению видимости (WMO, 1990) показывают, что в темное время суток оценки наблюдателями видимости оказались на 30 % выше данных инструментальных измерений МОД. Интерквартильный диапазон различий между значениями, полученными наблюдателями и полученными с помощью приборов, оказался лишь незначительно больше, чем при наблюдениях в дневное время (приблизительно 35–40 % измеренной МОД).

9.2.6 Использование передающих камер

Системы передающих камер иногда используются в качестве вспомогательного средства для наблюдателя при оценке видимости области, которая закрыта от обзора зданиями, или для наблюдения за видимостью в удаленном месте. В настоящее время разрабатываются системы автоматизированного определения наличия тумана и оценки видимости по изображениям с передающих камер. Это неудивительно, учитывая, что доступность и качество (веб-)камер возросли, стоимость этих систем снизилась, а изображения можно легко разместить в Интернете. Кроме того, методы обработки изображений развиваются и в настоящее время легко доступны. Были реализованы различные методы, такие как определение того, видны ли объекты на известных расстояниях путем оценки границ территории или уменьшения контрастности. Другие методы используют статистические параметры изображения, такие как градиенты или анализ Фурье, и связывают их с видимостью, или используют результаты методов улучшения изображения, таких как устранение дымки. Эти методы могут быть применены либо к отдельным изображениям, либо к двум изображениям одного и того же участка, полученным двумя камерами на разных расстояниях, либо к одному изображению относительно (набора) эталонных изображений в определенных атмосферных условиях. Часто методы ограничены дневным временем, и реализация должна быть настроена на изображения/участки для конкретного сайта (см. к примеру, WMO, 2016).

9.3 ИНСТРУМЕНТАЛЬНЫЕ ИЗМЕРЕНИЯ МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКОЙ ОПТИЧЕСКОЙ ДАЛЬНОСТИ

9.3.1 Общие сведения

Принятие определенных допущений позволяет преобразовать данные инструментальных измерений в МОД. При измерениях в дневное время, если имеется ряд подходящих ориентиров для проведения прямых наблюдений, использование приборов не всегда является предпочтительным. Однако прибор для измерения видимости часто используется в темное время суток, или при отсутствии ориентиров, или же для автоматических систем наблюдений. Приборы для измерения МОД могут быть отнесены к одной из двух категорий:

a) приборы для измерения коэффициента ослабления или коэффициента пропускания в горизонтальном цилиндре воздуха: ослабление света происходит как за счет рассеяния, так и за счет поглощения частицами, находящимися в воздухе на пути светового луча;

b) приборы для измерения интенсивности света, рассеянного в определенных направлениях в небольшом объеме воздуха, из которого выводится коэффициент рассеяния: в условиях естественного тумана поглощением часто можно пренебречь, а коэффициент рассеяния может рассматриваться равным коэффициенту ослабления.

Обе вышеуказанные категории включают приборы, использующие источник света и фотоприемник для обнаружения рассеянного и ослабленного светового луча.

Основные характеристики этих двух категорий приборов для измерения МОД описаны ниже.

9.3.2 Приборы для измерения коэффициента ослабления

Телефотометрические приборы

Ряд телефотометров был разработан для измерения коэффициента ослабления в светлое время суток путем сравнения видимой яркости удаленного объекта с яркостью небесного фона, однако они, как правило, не используются для повседневных измерений, поскольку, как было указано выше, предпочтительно использовать прямые визуальные наблюдения. Эти приборы могут, однако, оказаться полезными для экстраполяции значений МОД за пределы самого отдаленного объекта.

Визуальный фотометр

Очень простой прибор, использующийся в темное время суток при наличии удаленного источника света и представляющий собой градуированный нейтральный светофильтр, который обеспечивает гашение в известной степени света; при этом положение фильтра можно регулировать до тех пор, пока свет не становится едва видимым. Показания прибора позволяют судить о степени прозрачности атмосферы между источником света и наблюдателем, на основании чего можно вычислить коэффициент ослабления. Общая точность, главным образом, зависит от изменений чувствительности глаза и флуктуации силы излучения источника света. Ошибка увеличивается пропорционально увеличению МОД.

Преимуществом этого прибора является то, что он позволяет получать достаточно точные значения МОД в диапазоне 100 м – 5 км с использованием только трех хорошо размещенных источников света, тогда как без помощи этого прибора для достижения той же степени точности необходимо использовать более сложную систему источников света. Однако способ применения такого прибора (позволяющего определить расстояние, на котором свет появляется или исчезает) в значительной степени влияет на точность и однородность измерений.

Трансмиссометры

Измерения с помощью трансмиссометра — наиболее широко используемый метод для измерения среднего значения коэффициента ослабления в горизонтальном цилиндре воздуха между передатчиком, который является источником модулированного светового потока постоянной средней мощности, и приемником, включающим в себя фотодетектор (обычно это фотодиод, помещенный в фокальной точке параболического зеркала или линз). Первоначально наиболее часто используемым источником света являлась галогенная лампа или ксеноновая импульсная газоразрядная лампа. В современных трансмиссометрах используются светодиоды. Модулирование источника света позволяет устранить влияние солнечного света на точность измерений. Коэффициент пропускания определяется по выходному сигналу фотодетектора, что позволяет рассчитать коэффициент ослабления и МОД.

Поскольку оценки МОД с помощью трансмиссометра основаны на ослаблении светового потока параллельного пучка лучей в зависимости от рассеяния и поглощения, то эти оценки тесно связаны с определением МОД. Хороший и правильно обслуживаемый трансмиссометр, работающий в диапазоне, в котором он дает самую высокую точность, обеспечивает прекрасную аппроксимацию истинного значения МОД.

Существует два типа трансмиссометров:

a) трансмиссометры, которые состоят из передатчика и приемника, находящихся в различных блоках на известном расстоянии друг от друга (рисунок 9.2);

b) трансмиссометры, у которых передатчик и приемник совмещены в одном блоке, а излучаемый луч света отражается зеркалом или обратным отражателем, находящимся на известном расстоянии, которое составляет половину базовой линии (поскольку световой луч проходит расстояние до отражателя и обратно), как показано на рисунке 9.3.

Расстояние, которое проходит луч между передатчиком и приемником, обычно называется базовой линией, и это расстояние может изменяться от нескольких метров до 150 м (или даже достигать 300 м) в зависимости от диапазона значений МОД, которые должны измеряться прибором, а также от того, для каких целей должны использоваться данные измерений.

Как было видно из выражения для МОД в уравнении 9.7, отношение

$$P = a \cdot \ln(0,05) / \ln(T) \tag{9.14}$$

где a — базовая линия трансмиссометра, представляет собой основную формулу для измерений с помощью трансмиссометров. Справедливость ее зависит от допущений, предусматривающих, что применение законов Кошмидера, Бугера-Ламберта является приемлемым и что коэффициент ослабления вдоль базовой линии трансмиссометра является таким же, как и на линии между наблюдателем и объектом при данном значении МОД.

Если необходимо, чтобы данные измерений оставались приемлемыми в течение длительного периода времени, световой поток должен оставаться постоянным в течение всего этого периода. При использовании галогенового источника света проблема старения нити лампы носит менее критический характер и световой поток остается более постоянным. Однако в некоторых трансмиссометрах используется система обратной связи (за счет восприятия и измерения небольшой части излучаемого потока), обеспечивающая большую однородность светового потока с течением времени или коррекцию в случае любых изменений.

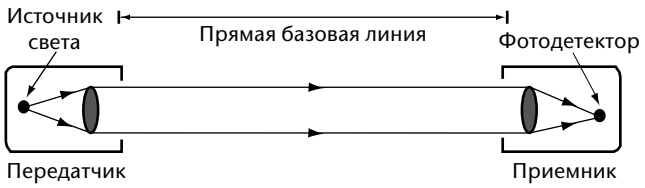


Рисунок 9.2. Двухлучевой трансмиссометр

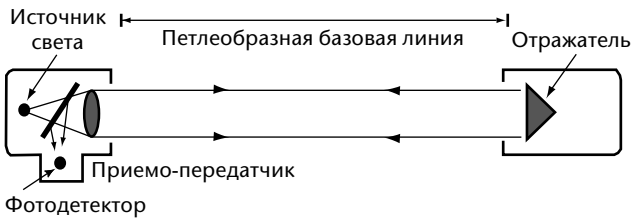


Рисунок 9.3. Однолучевой трансмиссометр

Как мы увидим в разделе, посвященном точности измерений МОД, значение, принятое для базовой линии трансмиссометра, определяет диапазон измерений МОД. В целом принято, что этот диапазон лежит между величиной, равной базовой линии, и величиной, превышающей ее в 25 раз. Тем не менее, современные оптоэлектронные приборы могут обеспечивать более точные результаты с расширенным диапазоном (см. 9.3.6 и WMO, 1992*b*).

Дальнейшее совершенствование принципа измерения с помощью трансмиссометров — использование двух приемников или обратных отражателей, находящихся на разных расстояниях, с тем, чтобы расширить как нижний предел (короткая базовая линия), так и верхний предел (длинная базовая линия) диапазона измерений МОД. Эти приборы известны как приборы с «двойной базовой линией».

Во многих современных трансмиссометрах в качестве источника света используются светодиоды. Однако для получения репрезентативного коэффициента ослабления обычно рекомендуется использовать полихроматический свет видимого спектра.

Определение видимости с помощью лидара

Технологии доплеровских метеорологических лазерных локаторов ЛИДАР, как они описаны для лазерного облакомера в настоящем томе, глава 15, могут быть использованы для определения видимости в случае, если луч строго горизонтален. Продольный профиль сигнала обратного рассеяния S зависит от выходящего сигнала S_0, расстояния x, коэффициента обратного рассеяния β, фактора передачи T согласно уравнению:

$$S(x) \sim S_0 \cdot 1/x^2 \cdot \beta(x) \cdot T^2 \quad \text{где} \quad T = \int -\sigma(x)\, dx \tag{9.15}$$

Если атмосфера горизонтально однородна, то β и σ — константы, а коэффициент ослабления σ определяется только по двум точкам профиля:

$$\ln\left(S(x) \cdot x^2 / S_0\right) \sim \ln \beta - 2\,\sigma\, x \tag{9.16}$$

В условиях неоднородной атмосферы зависящие от дальности параметры $\beta(x)$ и $\sigma(x)$могут быть определены с помощью алгоритма Клетта (Klett, 1985).

При МОД, приближающейся к 2 000 м, точность метода с использованием технологии ЛИДАР становится неудовлетворительной.

Более подробную информацию о требованиях к осуществлению измерений видимого диапазона с помощью лидара для определения метеорологической оптической дальности, зависящей от направления, можно найти в стандарте Международной организации по стандартизации ИСО 28902-1:2012 (ISO, 2012).

9.3.3 Инструменты для оценки коэффициента рассеяния

Ослабление света в атмосфере происходит как за счет рассеяния, так и за счет поглощения. Наличие загрязняющих веществ вблизи от промышленных зон, ледяные кристаллы (переохлажденный туман) или пыль могут привести к тому, что величина поглощения станет значительной. Однако, как правило, фактором поглощения можно пренебречь, а явление рассеяния, обусловленное отражением, рефракцией и дифракцией на каплях воды, становится основным фактором, определяющим ухудшение видимости. Тогда коэффициент ослабления может приниматься равным коэффициенту рассеяния, а инструмент для определения последнего может использоваться для оценки МОД.

Измерения удобнее всего выполнять, направляя луч света на небольшой объем воздуха и определяя фотометрическими методами долю света, рассеянного при достаточно большом телесном угле в направлениях, где рассеяние обеспечивает наилучшую оценку коэффициента рассеяния во всех условиях. При условии полного экранирования от

других источников света или при условии, что свет источника модулирован, прибор такого типа можно использовать как в светлое, так и в темное время суток. Коэффициент рассеяния b является функцией, которую можно записать в следующем виде:

$$b = \frac{2\pi}{\Phi_v} \int_0^{\pi} I(\phi) \sin(\phi)\, d\phi \tag{9.17}$$

где Φ_v — поток воздуха, поступающий в объем воздуха V, а $I(\phi)$ — сила света, рассеиваемого в направлении ϕ по отношению к падающему лучу.

Следует принять во внимание, что точное определение b требует измерения и интегрирования значений света, рассеянного от луча под всеми углами. Используемые на практике приборы измеряют рассеянный свет по ограниченному углу и основаны на высокой степени корреляции между ограниченным интегральным значением и полным интегральным значением во всех условиях.

В этих приборах используются три метода измерений: измерения обратного рассеяния, прямого рассеяния и рассеяния, интегрированного по широкому углу.

a) *Обратное рассеяние.* В приборах для измерения обратного рассеяния (рисунок 9.4) луч света направляется на небольшой объем воздуха перед передатчиком, а приемник помещается в том же блоке и ниже источника света, куда поступает в обратном направлении свет, рассеянный исследуемым объемом воздуха. Некоторые исследователи пытались определить соотношение между видимостью и коэффициентом обратного рассеяния, но в целом принято считать, что такая корреляция не является удовлетворительной.

b) *Прямое рассеяние*. Количество света, рассеянного частицами малого размера (аэрозоли, мелкие капли), имеет угловую зависимость. Кроме того, угловая зависимость определяется химическим составом (например, концентрацией соли), типом ядра (песок, пыль), а также размером и формой частиц. Следовательно, угол рассеяния должен быть выбран таким образом, чтобы угловая зависимость была минимальной и репрезентативной для коэффициента рассеяния. Несколько авторов показали, что оптимальным является угол между 20° и 50° (Kneizys et al., 1983; Jia and Lü, 2014; Barteneva, 1960; Van de Hulst, 1957). Поэтому приборы для измерения прямого рассеяния включают в себя передатчик и приемник, причем угол между лучами составляет от 20° до 50°. При другой конструкции прибора предусматривается установка посередине между передатчиком и приемником одной диафрагмы либо двух диафрагм, каждая из которых расположена на небольшом расстоянии от передатчика или приемника. На рисунке 9.5 показаны две используемые конфигурации приборов. Приборы, определяющие МОД на основе принципа прямого рассеяния, обычно называются приборами прямого рассеяния или измерителями прямого рассеяния.

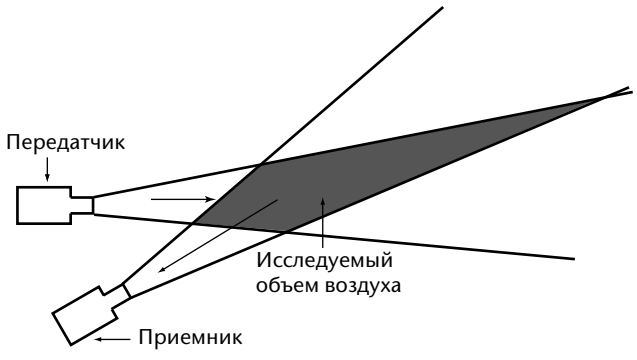


Рисунок 9.4. Измеритель видимости, основанный на измерении обратного рассеяния

c) *Рассеяние в пределах широкого угла.* Такой прибор, представленный на рисунке 9.6, известен как интегрирующий нефелометр и основан на принципе измерения рассеяния в максимально широком угле: идеально от 0° до 180°, однако на практике примерно от 0° до 120°. Приемник устанавливается перпендикулярно оси источника света, который обеспечивает освещение с широким углом. Хотя в теории такой прибор должен давать более точные значения коэффициента рассеяния, чем прибор, измеряющий небольшой диапазон углов рассеяния, на практике при его использовании сложнее избежать изменения коэффициента ослабления в исследуемом объеме воздуха из-за нахождения в нем самого прибора. На практике интегрирующие нефелометры редко применяются для измерения МОД, но широко используются для измерения количества загрязняющих веществ.

Во всех перечисленных выше приборах, как и в большинстве трансмиссометров, приемники включают в себя фотодетекторы или фотодиоды. Используемый свет излучается в виде импульсов (например, применяется ксеноновая газоразрядная лампа большой мощности).

Для использования приборов этого типа достаточно ограниченного пространства (как правило, 1–2 м). В связи с этим они полезны при отсутствии ориентиров видимости или источников света (на судах, обочинах дорог и т. д.). Поскольку в данном случае измерения относятся лишь к небольшому объему воздуха, их репрезентативность для состояния атмосферы в том или ином месте может быть поставлена под сомнение. Однако

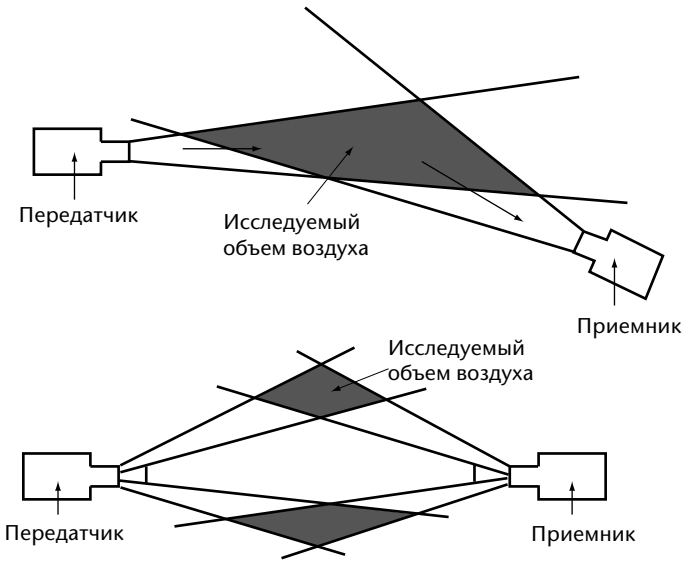


Рисунок 9.5. Измеритель видимости, основанный на измерении прямого рассеяния, в двух конфигурациях



Рисунок 9.6. Измеритель видимости, основанный на измерении рассеянного света в широком угле

репрезентативность можно улучшить путем осреднения большого числа проб или измерений. Кроме того, иногда сглаживание результатов достигается путем исключения экстремальных значений.

Использование приборов этого типа нередко ограничивалось специализированными применениями (например, для измерения видимости на автострадах или определения наличия или отсутствия тумана). Кроме того, они применяются в тех случаях, когда достаточно менее точных измерений МОД. В настоящее время эти приборы все чаще используются в автоматических метеорологических системах наблюдений из-за их способности измерять МОД в широком диапазоне и их относительно низкой восприимчивости к загрязнению оптических поверхностей по сравнению с трансмиссометрами.

9.3.4 Выбор места и установка приборов

Измерительные приборы должны устанавливаться в таких местах, где имеется гарантия того, что измерения будут достаточно репрезентативными. Таким образом, для синоптических целей приборы следует размещать в местах, свободных от локального загрязнения атмосферы, т. е. от дыма и промышленных выбросов, вдали от пыльных дорог и т. д.

Объем воздуха, в котором измеряется коэффициент ослабления или коэффициент рассеяния, как правило, должен находиться на уровне глаза наблюдателя, т. е. примерно на высоте 1,5 м над поверхностью земли.

Необходимо учитывать, что трансмиссометры и измерители прямого рассеяния должны быть установлены таким образом, чтобы солнце не находилось в оптическом поле зрения приемника в любое время суток. Обычно это достигается либо установкой оптической оси в направлении север-юг (до ±45°), когда приемник расположен горизонтально и направлен в сторону от экватора на широтах до 50°, либо с помощью систем экранов или отражателей. Измерители прямого рассеяния также должны быть выровнены таким образом, чтобы избежать отражения объектов в оптическом поле зрения приемника.

Для авиационных целей измерения должны быть репрезентативными для условий на аэродроме или вдоль взлетно-посадочной полосы. Эти условия, которые более конкретно относятся к эксплуатации аэродромов, описываются в томе III, глава 2 настоящего Руководства.

Приборы следует устанавливать в соответствии с теми направлениями, которые указаны изготовителями. Особое внимание необходимо уделять обеспечению соосности передатчиков и приемников и правильной юстировке светового луча. Опоры, на которых устанавливают передатчики/приемники, должны быть механически прочными (и в то же время быть упругими — при установке на аэродромах), чтобы избежать любого смещения из-за движения грунта во время замерзания и особенно во время оттаивания. Кроме того, крепления не должны деформироваться под воздействием термических напряжений, которым они подвергаются. Некоторые современные трансмиссометры могут автоматически производить регулировку их соосности, чтобы компенсировать это.

9.3.5 Калибровка и техническое обслуживание приборов

Для того чтобы получить удовлетворительные и надежные данные наблюдений, необходимо проводить техническое обслуживание приборов для измерения МОД, эксплуатировать их в соответствии с требованиями фирм-изготовителей и постоянно содержать их в хорошем рабочем состоянии. Регулярные поверки и калибровка согласно рекомендациям изготовителя должны обеспечивать их оптимальное функционирование.

9.3.5.1 ***Техническое обслуживание***

Большинство трансмиссометров требуют регулярной чистки оптических поверхностей; соответственно необходимо планировать выполнение частого технического обслуживания, особенно на аэродромах. Эти приборы следует регулярно чистить во время или после атмосферных возмущений, поскольку дождь или ливни, а также сильные ветры могут приводить к тому, что оптические системы покрываются большим количеством водяных капель и твердых частиц, в результате чего возникают значительные ошибки при измерении МОД. То же самое справедливо и в отношении снегопада, который может блокировать оптические системы. Системы подогрева часто размещаются перед оптическими системами и в кожухе, чтобы улучшить работу прибора в таких условиях. Системы продувки воздухом иногда используются для уменьшения вышеуказанных проблем и необходимости частой очистки. Однако следует указать на то, что эти системы обдува и подогрева могут генерировать воздушные потоки, более теплые, чем окружающий воздух, и тем самым отрицательно влиять на результаты измерений коэффициента ослабления воздушной массы. В засушливых зонах песчаные бури или поднимающийся в воздух песок могут блокировать оптическую систему и даже повредить ее. Современные трансмиссометры и измерители прямого рассеяния контролируют загрязнение оптической линзы или окошка и выдают предупреждения и ошибки, когда загрязнение достигает порогового значения. Некоторые приборы вносят поправку на загрязнение окошка.

На измерение МОД измерителем прямого рассеяния влияет паутина или даже отдельные нити паутины в измеряемом объеме. Летающие насекомые, которые обычно роятся в сумерках в спокойных погодных условиях, могут способствовать рассеянному сигналу. И то, и другое приводит к тому, что измеритель прямого рассеяния сообщает ложно заниженные параметры МОД. Уменьшение значений МОД измерителем прямого рассеяния из-за паутины и летающих насекомых может быть весьма значительным, между тем как они практически не влияют на МОД, определяемую трансмиссометром. Некоторые измерители прямого рассеяния фильтруют необработанный сигнал на наличие всплесков, вызванных летающими насекомыми (WMO, 2012). Однако необходимо следить за тем, чтобы пиковые отклонения, возникающие в результате воздействия атмосферных частиц или капель, не отфильтровывались, так как такая фильтрация приводит к более высоким значениям МОД, что может повлечь за собой проблемы для безопасности.

Основные источники ошибок и рекомендуемые действия обобщены в таблице 9.3 для трансмиссометров и в таблице 9.4 для измерителей прямого рассеяния.

9.3.5.2 ***Калибровка***

Калибровку следует регулярно производить (обычно это выполняется в условиях очень хорошей видимости, то есть на расстоянии от 10 до 15 км), а прибор следует откалибровать и при необходимости отрегулировать. Необходимо избегать таких атмосферных условий, которые приведут к ошибкам в калибровке. Например, при наличии сильных восходящих потоков или после ливневых осадков отмечаются значительные изменения коэффициента ослабления в слое воздуха у поверхности земли, и если используется несколько удаленных друг от друга трансмиссометров (как это бывает на аэродромах), то результаты их измерений характеризуются значительной дисперсией. В таких условиях проводить калибровку не рекомендуется.

Трансмиссометр может быть откалиброван путем прямого сравнения с расстоянием, на котором наблюдатель может видеть определенные объекты и светосигналы известной интенсивности. Наблюдение должно быть как можно ближе к МОД, так как это значение МОД, которое используется для преобразования, чтобы определить коэффициент пропускания. Калибровка также может быть выполнена непосредственно с помощью отслеживаемых оптических фильтров нейтральной плотности.

Таблица 9.3. Трансмиссометры: источники погрешностей и действия по их устранению

Источник погрешности	*Действие*
Атмосферные загрязнители, оседающие на оптических поверхностях	1. Функции самодиагностики прибора: алгоритмы измерения загрязнения и корректировки загрязнения в программном обеспечении прибора 2. Профилактическое обслуживание: регулярная чистка в соответствии с инструкциями производителя 3. Текущее техническое обслуживание: очистка при необходимости
Нестабильность электронного оборудования системы	Регулярная проверка калибровки с использованием градуированного набора фильтров ослабления в стабильных условиях высокой видимости. При необходимости регулировка настройки прибора в соответствии с инструкциями производителя
Скопление снега или льда на поверхностях вблизи оптического измерительного тракта	Профилактические меры: установить обогреватели измерительной головки и обогреватели крышки прибора
Старение источника света передатчика или неправильная центровка ламп	1. Функции самодиагностики прибора: измерение интенсивности лампы и предупреждающие сообщения о старении 2. Профилактическое/текущее техническое обслуживание: замена источника света передатчика, если требуется 3. Использование встроенной программы автоматического выравнивания, при наличии
Недостаточная жесткость и стабильность креплений передатчика/приемника, а также последствия замерзания или оттаивания грунта и термического напряжения	Регулярная проверка калибровки с использованием градуированного набора фильтров ослабления в устойчивых условиях высокой видимости. При необходимости регулировка настройки прибора в соответствии с инструкциями производителя
Дистанционная передача коэффициента ослабления в виде сигнала слабого тока может быть подвержена помехам от электромагнитных полей (особая проблема на аэродромах)	Сигналы в цифровой форме менее подвержены помехам, чем аналоговые сигналы
Ошибка калибровки из-за калибровки/регулировки, выполняемой при низкой видимости или нестабильных атмосферных условиях, влияющих на коэффициент затухания	Калибровка и регулировка должны выполняться в соответствии с инструкциями производителя
Неправильная настройка передатчиков и приемников	Использование встроенной программы автоматического выравнивания, при наличии
Помехи, когда солнце находится вблизи горизонта, или из-за отражений от прилегающих поверхностей	Установка и ориентация должны выполняться в соответствии с инструкциями производителя

Таблица 9.4. Измерители прямого рассеяния: источники погрешностей и действия по их устранению

Источник погрешности	*Действие*
Атмосферные загрязнители, оседающие на оптических поверхностях, и/или неправильная корректировка этого загрязнения	1. Функции самодиагностики прибора: алгоритмы измерения загрязнения и корректировки загрязнения в программном обеспечении прибора 2. Конструктивные особенности: геометрия обзора вниз и колпаки над приборными головками обеспечивают лучшую защиту оптики и увеличивают интервалы между техническим обслуживанием 3. Профилактическое обслуживание: регулярная чистка в соответствии с инструкциями производителя 4. Текущее техническое обслуживание: очистка при необходимости
Нестабильность электронного оборудования системы	Регулярная проверка калибровки с использованием рассеивающих пластин (также известных как калибровочные блоки измерителя рассеяния – SCU), которые имитируют определенные условия тумана. При необходимости регулировка настройки прибора в соответствии с инструкциями производителя
Скопление снега или льда на поверхностях вблизи оптического измерительного тракта	Профилактические меры: установить обогреватели измерительной головки и обогреватели крышки прибора
Старение источника света передатчика	1. Функции самодиагностики прибора: измерение интенсивности лампы и предупреждающие сообщения о старении 2. Профилактическое/текущее техническое обслуживание: замена источника света передатчика, если требуется
Источник света не на видимых длинах волн	Конструктивная особенность, учитываемая при проверке калибровки по трансмиссометру
Атмосферные условия (например, дождь, снег, кристаллы льда, песок, местные атмосферные загрязнители), дающие коэффициент рассеяния, который отличается от коэффициента затухания	1. Конструктивная особенность: оптимизированный угол рассеяния 2. Разбор атмосферных условий и их корректировка
Дополнительное поглощение песком, пылью и дымом, которое влияет на видимость и ее измерение	Различение и коррекция поглощения или применение калибровочного коэффициента, полученного для этих условий
Ошибка калибровки из-за калибровки/регулировки, выполняемой при низкой видимости или нестабильных атмосферных условиях, влияющих на коэффициент затухания	Калибровка и регулировка должны выполняться в соответствии с инструкциями производителя
Неправильные процедуры калибровки/регулировки или использование неправильных или поврежденных рассеивающих пластин	Калибровка и регулировка должны выполняться в соответствии с инструкциями производителя
Помехи, когда солнце находится вблизи горизонта, или из-за отражений от прилегающих поверхностей	Установка и ориентация должны выполняться в соответствии с инструкциями производителя

Источник погрешности	*Действие*
Помехи от паутины или даже отдельных паутинок и летающих насекомых в измеряемом объеме	1. Профилактическое обслуживание: регулярная чистка в соответствии с инструкциями производителя 2. Текущее техническое обслуживание: чистка при необходимости 3. Распознавание и коррекция всплесков рассеянного сигнала из-за летающих насекомых

Калибровка приборов, основанная на измерении коэффициента рассеяния, также известных как измерители рассеяния, не может быть выполнена напрямую. Калибровка измерителя прямого рассеяния должна быть отслеживаемой и проверяемой в соответствии со стандартом трансмиссометра, точность которого была проверена в предполагаемом рабочем диапазоне (ICAO, 2016). Калибровка измерителя рассеяния включает в себя вставку оптических пластин (часто называемых калибровочными блоками с дозированием рассеяния (SCU)) в измеряемый объем в фиксированном положении, которое имитирует определенное значение МОД. Эти SCU являются специфическими и предоставляются производителем прибора. Как правило, только SCU, соответствующие минимальному значению МОД в сочетании с блокировкой приемника (высокое значение МОД), могут использоваться для выполнения двухточечной калибровки.

SCU подвержены изменениям в течение периода использования из-за загрязнения и старения, и их следует в самом начале, а затем регулярно проверять и калибровать. Это должно быть сделано путем возврата пластин в подходящее испытательное оборудование, оснащенное соответствующими эталонами для видимости и отслеживаемой цепочкой калибровки. Для некоторых приборов производитель может предложить эквивалентную услугу калибровки для SCU, поставляемых самостоятельно.

В соответствии с ICAO (2005), раздел 9.4.3 относительно эталонов для видимости: «идеальный» эталон представляет собой набор приборов, состоящий по меньшей мере из двух трансмиссометров (оптимально с использованием двух разных базовых линий) и двух измерителей прямого рассеяния, показывающих медианные значения со смещением менее 5 % по сравнению с трансмиссометрами.

На объекте калибровки видимости SCU следует проверить на известном эталонном измерителе прямого рассеяния и при необходимости еще раз откалибровать с новым коэффициентом.

Там известные эталонные измерители прямого рассеяния сами регулярно калибруются с помощью эталонного блока SCU и систематически сверяются с эталонными трансмиссометрами в условиях случаев низкой видимости. В случае отклонения от определенного порогового значения (5 % для ИКАО) эталонный блок SCU повторно калибруется с новым коэффициентом. Эталонные трансмиссометры также должны регулярно калиброваться. Это может быть произведено в сопоставлении с визуальными наблюдениями или с помощью набора оптических фильтров нейтральной плотности. Следует установить прослеживаемость количества измерений МОД до известного стандарта. Эталонная и калибровочная цепочка определения видимости описана, например, в публикации WMO (2006). Результирующая цепочка производства калибровки описана на рисунке 9.7.

Сравнение измерителей прямого рассеяния и трансмиссометров должно быть тщательно проведено с использованием проверенных данных. Сравнение измерителей рассеяния и трансмиссометров следует проводить в периоды условий низкой видимости, так как SCU обычно имитирует эти условия. Кроме того, точность эталонных трансмиссометров очень высока при низкой видимости, а значения низкой видимости имеют существенно важное значение для целей авиации.

Следует сохранять данные только по случаям появления тумана, а эпизоды, включающие осадки (дождь, снег), должны быть исключены. Причина была отмечена в 9.1.4: взаимосвязь между коэффициентом пропускания и МОД действительна для капель

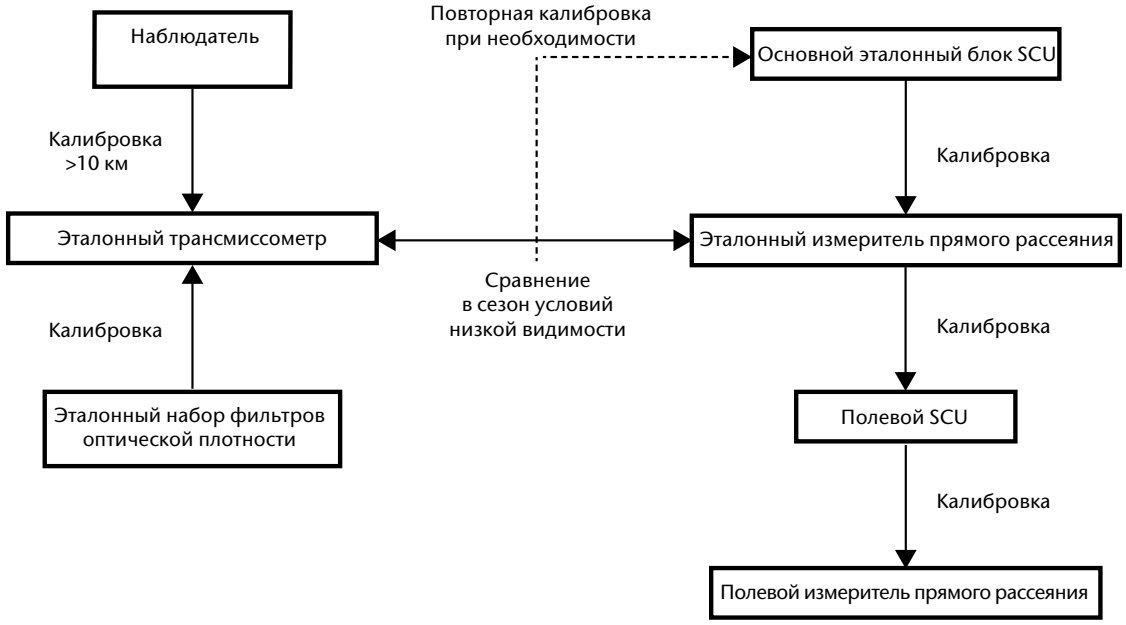


Рисунок 9.7. Цепочка калибровки видимости для измерителей рассеяния

тумана, однако когда видимость снижается другими гидрометеорами (такими как дождь или снег) или литометеорами (такими как песчаная буря), к значениям МОД следует относиться с большей осторожностью.

Наконец, как поясняется в публикации ICAO (2005), при сравнении приборов необходимо проверять однородность тумана. Неоднородные туманы могут сильно повлиять на коэффициент распределения МОД у прибора. Поэтому такие периоды должны быть определены и исключены из анализа данных.

Следует обратить внимание, что более высокие значения видимости также могут учитываться при сравнении измерителей прямого рассеяния и трансмиссометров, когда трансмиссометр может служить в качестве эталона. Это расширение диапазона МОД, кроме того, служит для проверки линейности и двухточечной калибровки измерителей прямого рассеяния в большем диапазоне видимости.

9.3.6 Оценки точности измерения метеорологического оптического диапазона

9.3.6.1 *Общие сведения*

Все оперативные приборы, используемые на практике для измерений МОД, исследуют относительно небольшой объем воздуха по сравнению с тем, что видит глаз наблюдателя. Приборы могут производить точные измерения МОД только в тех случаях, когда объем воздуха, который они исследуют, является репрезентативным для атмосферы, окружающей место наблюдения, до радиуса, равного МОД. Легко представить себе такую ситуацию, когда в условиях зарядов тумана, локального дождя или снежной бури показания прибора вводят в заблуждение. Однако опыт показал, что такие ситуации отмечаются довольно редко, и постоянный мониторинг МОД с помощью прибора позволяет обнаружить изменения МОД до того, как их распознал наблюдатель, работающий без приборов. Тем не менее, результаты инструментальных измерений МОД должны интерпретироваться с осторожностью.

Другой фактор, который должен приниматься во внимание при обсуждении репрезентативности измерений, — однородность самой атмосферы. Для всех значений

МОД коэффициент ослабления в небольшом объеме воздуха обычно колеблется быстро и нерегулярно, и результаты отдельных измерений МОД с помощью измерителей рассеяния и трансмиссометров с короткой базовой линией, не имеющих встроенных систем сглаживания или осреднения, характеризуются значительной дисперсией. В связи с этим необходимо проводить много измерений и сглаживать или осреднять их для получения репрезентативного значения МОД. Анализ результатов первых сравнений ВМО по измерению видимости (WMO, 1990) показывает, что для большинства приборов осреднение в течение периода более 1 минуты не дает никаких преимуществ, однако для самых «шумных» приборов предпочтительное время осреднения составляет более 2 минут.

9.3.6.2 ***Точность трансмиссометров***

Основные источники погрешностей при измерениях с помощью трансмиссометра перечислены в таблице 9.3 в 9.3.5.1.

Хорошо откалиброванный и правильно обслуживаемый трансмиссометр должен давать репрезентативные результаты измерения МОД, если коэффициент ослабления вдоль оптической оси прибора является репрезентативным коэффициентом ослабления в пределах МОД. Однако трансмиссометр может обеспечивать производство точных измерений МОД только в ограниченном диапазоне. Кривая относительной погрешности для МОД может быть построена по данным, полученным путем дифференцирования основной формулы трансмиссометра (см. уравнение 9.7). На рисунке 9.8 показаны изменения относительной погрешности в зависимости от пропускания при допущении того, что точность измерений коэффициента пропускания T должна составлять 1 %.

Такая погрешность (1 %) коэффициента пропускания, которая может считаться нормальной для многих старых приборов, не включает погрешности, связанные с дрейфом приборов и загрязнением их оптических элементов, или разброс в результатах измерений, обусловленный самим явлением. Если точность уменьшается примерно до 2–3 % (с учетом других факторов), то значение относительной погрешности, приведенное на вертикальной оси графика, следует умножить на тот же коэффициент 2 или 3. Следует также принять во внимание, что относительная погрешность измерений МОД возрастает экспоненциально в начале и конце кривой, тем

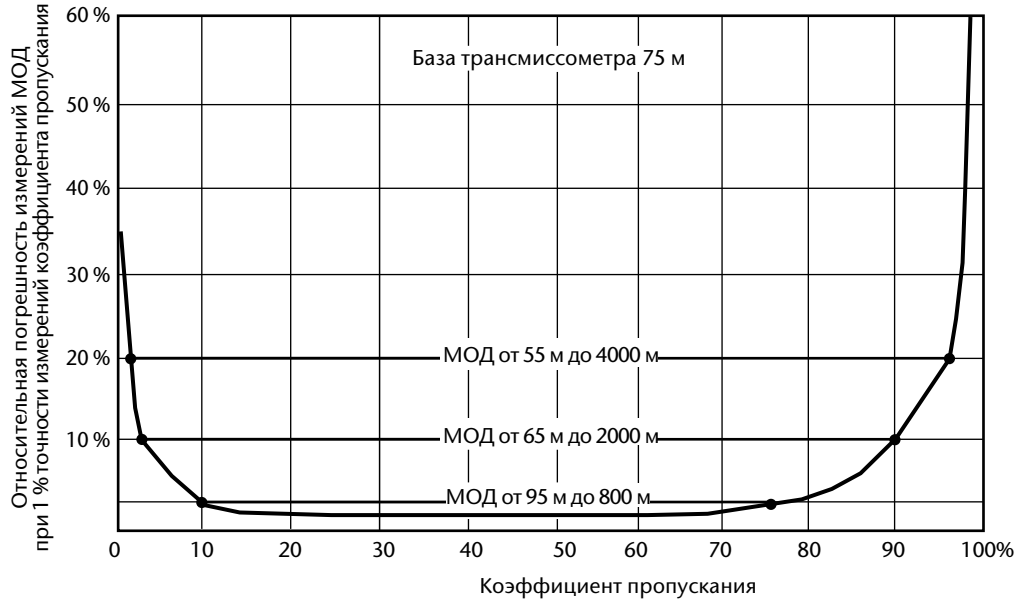


Рисунок 9.8. Зависимость погрешности измерений метеорологической оптической дальности от погрешности коэффициента пропускания 1 %.

самым обусловливая ограничение верхних и нижних пределов диапазона измерений МОД. Пример, показанный кривой, указывает на то, где находится предел диапазона измерений в том случае, если погрешность 5, 10 или 20 % допускается на верхней и нижней границах диапазона измерений при базовой линии 75 м. Можно также вывести, что при измерениях МОД в пределах 1,25–10,7 длины базовой линии относительная погрешность МОД должна быть низкой (примерно 5 %), если исходить из допущения, что погрешность для T составляет 1 %. Относительная погрешность МОД превышает 10 % в тех случаях, когда МОД составляет менее 0,87 длины базовой линии или превышает ее более чем в 27 раз. При дальнейшем расширении диапазона измерений ошибка быстро увеличивается и становится неприемлемой. Тем не менее, поскольку современные трансмиссометры допускают погрешности коэффициента пропускания, которые явно ниже образцового показателя 1 %, пригодный для использования диапазон измерений может быть расширен соответствующим образом.

Уже результаты первых взаимных сравнений ВМО по измерениям видимости (WMO, 1990) показали, что лучшие трансмиссометры при правильной их калибровке и хорошем техническом обслуживании могут обеспечивать измерения МОД при среднем квадратическом отклонении примерно 10 % в тех случаях, когда МОД равна величине, до 60 раз превышающей базовую линию.

9.3.6.3 ***Точность измерителей рассеяния***

Основные источники погрешностей при измерениях МОД с помощью измерителей рассеяния перечислены в Таблице 9.4 в 9.3.5.1.

Результаты первых взаимных сравнений ВМО по измерениям видимости (WMO, 1990) показывают, что при низких значениях МОД измерители рассеяния, как правило, являются менее точными, чем трансмиссометры, и их показания имеют большую изменчивость. Было также обнаружено доказательство того, что как класс измерители рассеяния более подвержены влиянию осадков, чем трансмиссометры. Однако самые лучшие измерители рассеяния продемонстрировали небольшую уязвимость к осадкам или вообще ее отсутствие и выдавали оценки МОД со средним квадратическим отклонением около 10 % в диапазоне МОД 100 м – 50 км. Почти все измерители рассеяния в ходе сравнений показали наличие значительной систематической ошибки в какой-либо части диапазона их измерений. Оптические системы измерителей рассеяния также продемонстрировали хорошую устойчивость к загрязнению.

Обзор различий между измерителями рассеяния и трансмиссометрами предложен ВМО (WMO, 1992*b*).

9.3.6.4 ***Точность телефотометров и визуальных фотометров***

Визуальные измерения, основанные на измерениях коэффициента ослабления, проводить довольно трудно. Основным источником погрешностей является изменчивость и неопределенность функционирования глаза человека. Эти погрешности были описаны в разделах, касающихся методов визуальной оценки МОД.

СПРАВОЧНАЯ И ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ЛИТЕРАТУРА

Бартенева О. Д., 1960: Индикатрисы рассеяния света в призменном слое атмосферы. *Изв. АН СССР., Сер. геофиз.* [*Bull. Acad. Sci. USSR, Geophysics Series*], № 12: 1237-1244.

Международная организация гражданской авиации, 2016: *Метеорологическое обеспечение международной аэронавигации*. Приложение 3 к Конвенции о международной гражданской авиации — 19-е издание. Монреаль, ИКАО.

Международная электротехническая комиссия,1987: *Международный электротехнический словарь*, глава 845: Освещение, МЭК 60050-845. Женева.

Всемирная метеорологическая организация, 1992*a*: *Международный метеорологический словарь* (ВМО-№ 182). Женева.

———, 2014: *Руководство по системам метеорологических наблюдений и распространения информации для метеорологического обслуживания авиации* (ВМО-№ 731). Женева.

International Civil Aviation Organization, 2005: *Manual of Runway Visual Range Observing and Reporting Practices*. Doc 9328, AN/908. Third edition. Montreal, ICAO.

International Organization for Standardization, 2012: *Air Quality – Environmental Meteorology – Part 1: Ground-based Remote Sensing of Visual Range by Lidar*. ISO 28902-1:2012. Geneva.

Jia S-J. and D-R. Lü, 2014: Optimal forward-scattering angles of atmospheric aerosols in North China. *Atmospheric and Oceanic Science Letters*, *7*(3):236–242.

Klett, J.D., 1985: Lidar inversion with variable backscatter/extinction ratios. *Applied Optics*, *24*(11):1638–1643.

Kneizys, F.X., E.P. Shettle, W.O. Gallery, J.H. Chetwynd, L.W. Abreu, J.E.A. Selby, S.A. Clough and R.W. Fenn, 1983: Atmospheric Transmittance/Radiance: Computer Code LOWTRAN 6, Appendix D. AFGL-TR-83-0187, Environmental Research Papers No. 846. Air Force Geophysics Laboratory, Massachusetts.

Middleton, W.E.K., 1952: *Vision Through the Atmosphere*. Toronto, University of Toronto Press.

Sheppard, B.E., 1983: Adaptation to MOR. Preprints of the Fifth Symposium on Meteorological Observations and Instrumentation (Toronto, 11–15 April 1983), pp. 226–269.

Van de Hulst, H.C., 1957: *Light Scattering by Small Particles*. New York, Wiley & Sons (repr. Dover Books on Physics, 1981).

World Meteorological Organization, 1990: *The First WMO Intercomparison of Visibility Measurements: Final Report* (D.J. Griggs, D.W. Jones, M. Ouldridge and W.R. Sparks). Instruments and Observing Methods Report No. 41 (WMO/TD-No. 401). Geneva.

———, 1992*b*: *Visibility Measuring Instruments: Differences between Scatterometers and Transmissometers* (J.P. van der Meulen) (WMO/TD-No. 462). Paper Presented at the WMO Technical Conference on Instruments and Methods of Observation (TECO-92) (Vienna, Austria, 11–15 May 1992). Instruments and Observing Methods Report No. 49. Geneva.

———, 2006: *KNMI Visibility Standard for Calibration of Scatterometers* (H. Bloemink) (WMO/TD-No. 1354). Paper presented at the WMO Technical Conference on Instruments and Methods of Observation (TECO-2006) (Geneva, Switzerland, 4–6 December 2006). Instruments and Observing Methods Report No. 94. Geneva.

———, 2012: Filtering of insect reduced MOR measurements by a forward scatter sensor (W. Wauben). Paper presented at the WMO Technical Conference on Meteorological and Environmental Instruments and Methods of Observation (TECO-2012) (Brussels 16–18 October 2012). Instruments and Observing Methods Report No. 109. Geneva.

———, 2016: Exploration of fog detection and visibility estimation from camera images (W. Wauben and M. Roth). Paper presented at the WMO Technical Conference on Meteorological and Environmental Instruments and Methods of Observation (TECO-2016) (Madrid, 27-30 September 2016). Instruments and Observing Methods Report No. 125. Geneva.

ГЛАВА 10. ИЗМЕРЕНИЕ ИСПАРЕНИЯ

10.1 ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

10.1.1 Определения

Международный гидрологический словарь (ВМО/Организация Объединённых Наций по вопросам образования, науки и культуры, 2012) и *Международный метеорологический словарь* (ВМО, 1992) дают следующие определения (с некоторыми отличиями):

(Действительное) испарение. Количество воды, испаряющейся с открытой поверхности воды и/или почвы.

Транспирация. Процесс, при котором вода с растений переносится в атмосферу в виде пара.

(Действительное) суммарное испарение (или эффективное суммарное испарение). Количество водяного пара, испаряющегося с поверхности почвы и растений при естественном уровне влагосодержания почвы.

Потенциально возможное испарение (или испаряемость). Количество водяного пара, которое могло бы испариться с поверхности чистой воды с единицы площади и за единицу времени при существующих метеорологических условиях.

Потенциальное суммарное испарение. Максимальное количество воды, которая может испариться в данных климатических условиях с участка сплошной растительности, полностью покрывающей почву и хорошо снабжаемой водой. Потенциальное суммарное испарение включает испарение с поверхности почвы и транспирацию растений в конкретном районе в определенный период времени. Потенциальное суммарное испарение выражается как толщина слоя воды.

Если используется термин *потенциальное суммарное испарение*, то должны ясно указываться типы испарения и транспирации. За более подробной информацией по этим терминам следует обращаться к публикации ВМО (2008), том I.

10.1.2 Единицы измерения

Скорость испарения определяется как количество воды, испарившейся с единицы площади за единицу времени. Она может быть выражена как масса или объем жидкой воды, испарившейся с площади за единицу времени; обычно она выражается как эквивалентная толщина слоя жидкой воды, испарившейся за единицу времени с поверхности любой площади. За единицу времени обычно приняты сутки. Объем испарившейся воды следует выражать в миллиметрах (ВМО, 2015). В зависимости от типа прибора обычная погрешность измерения составляет от 0,1 до 0,01 мм.

10.1.3 Метеорологические требования

Оценки как испарения со свободных поверхностей воды и с почвы, так и суммарного испарения с поверхностей, покрытых растительностью, имеют большое значение для гидрологического моделирования, а также для гидрометеорологических и сельскохозяйственных исследований, например, при проектировании и эксплуатации водохранилищ, ирригационных и дренажных систем.

Требования к проведению работ описаны в настоящем томе, глава 1. Для суточных сумм максимальный диапазон составляет 0–100 мм при разрешении 0,1 мм. Неопределенность

при 95 % степени достоверности должна составлять ±0,1 мм для объемов менее 5 мм и ±2 % для больших объемов. Точность в 1 мм предложена в качестве достижимой. В принципе, обычные приборы могут удовлетворять таким требованиям к точности, однако сложности при размещении и эксплуатации приводят к появлению значительно больших погрешностей измерений (WMO, 1976).

Факторы, влияющие на скорость испарения с любого предмета или поверхности, можно в целом разделить на две группы: метеорологические факторы и факторы, связанные с характеристиками поверхности, причем каждый из них может ограничивать скорость испарения. В свою очередь, метеорологические факторы делятся на энергетические и аэродинамические переменные. Энергия необходима для превращения воды из жидкости в пар; в природе это происходит главным образом за счет солнечной радиации и земного излучения. Аэродинамические переменные, такие как скорость ветра у поверхности земли и разность значений давления пара на участке между поверхностью и нижними слоями атмосферы, влияют на скорость переноса водяного пара.

Полезно различать случаи наличия или отсутствия несвязанной воды на поверхности. К важным факторам относятся количество и состояние воды, а также такие характеристики поверхности, которые влияют на процесс переноса в воздухе или через поверхность объекта. Противодействие переносу влаги в атмосферу зависит, например, от шероховатости поверхности; в аридных и полуаридных районах чрезвычайно большое значение имеют размер и форма испаряющей поверхности. Транспирация растений, помимо уже отмеченных метеорологических и поверхностных факторов, в значительной степени определяется характеристиками и параметрами реагирования растений. Это включает, например, количество и размер устьиц (устьичные отверстия на листьях), а также то, открыты они или закрыты. Устьичное сопротивление переносу влаги характеризуется поведением растения в течение суток, но также в значительной степени зависит от поступления почвенной влаги к корневой системе.

Поступление почвенной влаги к корням и испарение с открытой почвы зависят от количества и характеристик почвенных капилляров, а именно от текстуры и состава почвы. На испарение с поверхностей озер и водохранилищ влияет тепло, аккумулируемое водоемом.

Методы оценки испарения и суммарного испарения являются как правило косвенными: либо посредством точечных измерений при помощи прибора или измерительной установки, либо путем расчета с использованием других измеренных метеорологических переменных (WMO, 1997).

10.1.4 **Методы измерения**

Прямые измерения испарения или суммарного испарения с обширных естественных водных поверхностей или суши в настоящее время осуществить затруднительно. Однако разработано несколько косвенных методов на основе точечных измерений или других расчетов, которые дают приемлемые результаты.

Потеря воды со стандартной насыщенной влагой поверхности измеряется с помощью приборов для измерения испарения (эвапориметров), которые можно разделить на атмометры и испарители, или испарительные бассейны. Эти приборы непосредственно не измеряют ни испарение с естественных водных поверхностей, ни действительное, ни потенциальное суммарное испарение. Поэтому без внесения поправок полученные значения не могут быть использованы для надежной оценки испарения или действительной и потенциальной эвапотранспирации с естественных поверхностей.

Почвенный испаритель (лизиметр) представляет собой сосуд (или контейнер), установленный в грунте вровень с его поверхностью и наполненный почвой, на которой может быть выращена растительность. Он представляет собой многоцелевой прибор для изучения нескольких фаз гидрологического цикла в естественных условиях. Оценки суммарного испарения (или испарения в том случае, если почва лишена растительности)

могут производиться путем измерения и расчета всех остальных компонентов водного баланса контейнера, таких как выпадение осадков, дренаж подземных вод и изменение запаса воды почвенного монолита. Как правило, поверхностный сток устраняется. Почвенные испарители могут также использоваться для оценки потенциального испарения с почвы или потенциального суммарного испарения почвы, покрытой растительностью, при условии поддержания влажности почвы на уровне полевой влагоемкости.

Для водохранилищ или озер, стоковых площадок или небольших водосборов оценки испарения могут производиться на основании водного и энергетического балансов, а также с использованием аэродинамического подхода и подхода с учетом дополнительных взаимосвязей. Вышеуказанные методики описываются в 10.5.

Следует также подчеркнуть, что различные испарители или лизиметры представляют различающиеся по физической природе средства измерений. Поправочные коэффициенты, которые требуются для того, чтобы они представляли данные измерений испарения с озера или действительного либо потенциального суммарного испарения, неизбежно являются различными. Таким образом, такие приборы и их установка должны описываться очень тщательно и точно, чтобы иметь как можно более полное представление об условиях, в которых производились измерения.

Более подробное описание всех методов представлено в публикации ВМО (2008), тома I и II.

10.2 АТМОМЕТРЫ

10.2.1 Виды приборов

Атмометр — это прибор для измерения испарения с увлажненной пористой поверхности. Увлажненные поверхности представляют собой либо пористые керамические шарики, цилиндры или пластины, либо открытые диски из фильтровальной бумаги, насыщенные водой. Испаряющим элементом атмометра Ливингстона является керамический шарик диаметром около 5 см, соединенный с сосудом с водой стеклянной или металлической трубкой. Атмосферное давление на поверхности воды в резервуаре поддерживает шарик в насыщенном состоянии. Атмометр Беллани состоит из керамического диска, зафиксированного вверху глазурованной керамической воронки, в которую вода попадает через бюретку, выполняющую роль резервуара и измерительного устройства. Испаряющим элементом испарителя Пише является диск из фильтровальной бумаги, прикрепленный к перевернутой цилиндрической градуированной трубке, закрытой с одной стороны; из этой трубки вода поступает на диск. Последовательные измерения объема воды, оставшейся в градуированной трубке, позволяют оценить количество воды, потерянной на испарение за любой заданный промежуток времени.

10.2.2 Измерение с помощью атмометров

Хотя принято считать, что атмометры дают относительную меру испарения с поверхности растений, в действительности полученные данные измерений мало связаны с испарением с естественных поверхностей.

Показания испарителей Пише при условии их тщательной, стандартизованной, экранированной установки с определенным успехом использовались для получения аэродинамической составляющей; умножение функций ветра и дефицита насыщения водяного пара необходимы для расчета испарения при использовании, например, комбинационного метода Пенмана после получения корреляций между ними.

Хотя испарение, измеренное с помощью атмометров, вероятно, может быть эмпирически связано с испарением с естественной поверхности, можно предполагать,

что эта связь для разных типов поверхности и климата будет различной. Вероятно, атмометры будут по-прежнему применяться в мелкомасштабных исследованиях. Их существенные преимущества — это небольшой размер, низкая цена и малый расход воды. Густая сеть атмометров может быть расположена на небольшой площадке для микрометеорологических исследований. Не рекомендуется использовать атмометры для исследований в области водных ресурсов, если имеются другие данные.

10.2.3 Источники ошибки в атмометрах

Одна из основных проблем в работе атмометров — это поддержание чистоты испарительных поверхностей. Загрязненные поверхности существенно влияют на скорость испарения точно так же, как это происходит со смоченным термометром в психрометрии.

Кроме того, на измерения испарения значительное влияние часто оказывают различия в их размещении. Это особенно касается размещения по отношению к потоку движущегося воздуха вблизи испаряющей поверхности в том случае, если прибор экранирован.

10.3 ИСПАРИТЕЛИ И ИСПАРИТЕЛЬНЫЕ БАССЕЙНЫ

Изготавливаемые испарители и испарительные бассейны имеют самые различные формы и размеры, и существуют разные способы их размещения. Среди различных типов используемых испарителей следует отметить испаритель класса «А» (США), испаритель ГГИ-3000 (Россия) и испарительный бассейн площадью 20 м^2 (Россия), описание которых приводится ниже. В настоящее время эти приборы широко применяются в качестве стандартных сетевых приборов для измерения испарения, и их характеристики изучались в самых разнообразных климатических условиях и в большом диапазоне широты и высоты. Данные этих приборов находятся в тесной, хотя сложной и зависящей от климатической зоны, связи с метеорологическими элементами, определяющими испарение, при условии точного соблюдения стандартов при изготовлении и инструкций по размещению.

Российский измерительный бассейн площадью 20 м^2 рекомендован в качестве международного эталонного испарителя.

10.3.1 Испаритель класса А (США)

Испаритель класса «А» (Соединенные Штаты Америки) — это цилиндрический сосуд глубиной 25,4 см и диаметром 120,7 см. Испаритель устанавливается на деревянной платформе в виде рамки с тем, чтобы дно испарителя находилось на высоте 3–5 см от поверхности земли, что обеспечивает циркуляцию воздуха под испарителем, удерживает дно испарителя выше уровня воды на поверхности земли во время дождливой погоды и обеспечивает простоту осмотра базы испарителя. Испаритель изготавливается из оцинкованного железа толщиной 0,8 мм, меди или монель-металла , причем поверхность испарителя не окрашивается. Испаритель заполняется на 5 см ниже верхней кромки (так называемый эталонный уровень).

Уровень воды измеряется с помощью крючковой рейки или стационарной игольчатой водомерной рейки. Крючковая рейка состоит из подвижной шкалы и верньера с крючком, конец которого при правильной установке прибора касается поверхности воды. Успокоитель с небольшим отверстием на дне диаметром около 10 см и глубиной около 30 см разбивает любые мелкие волны, которые могут возникнуть в испарителе, и служит в качестве держателя для крючковой рейки во время наблюдения. Испаритель пополняется, как только уровень воды по показаниям водомерной рейки опускается более чем на 2,5 см ниже исходного уровня.

10.3.2 Испаритель ГГИ-3000 (Россия)

Испаритель ГГИ-3000 (Россия) — это цилиндрический сосуд с коническим дном и площадью поверхности 3 000 см^2 и глубиной 60 см. Испаритель устанавливается в грунте, причем его края на 7,5 см выступают над поверхностью земли. В центре испарителя находится металлическая мерная трубка, на которую при измерениях испарения устанавливают объемную бюретку. Бюретка снабжена клапаном, который открывается, для того чтобы уровень воды в ней сравнялся с уровнем воды в испарителе. Затем клапан закрывается, и производится точное измерение объема воды в бюретке. Уровень воды над металлической мерной трубкой определяется на основе объема воды в бюретке и ее размеров. Указатель, прикрепленный к металлической реперной трубке, показывает высоту, на которую необходимо установить уровень воды в испарителе. Уровень воды следует поддерживать таким образом, чтобы он не опускался ниже или не поднимался выше острия указателя более чем на 5 и 10 мм соответственно. Обычно рядом с испарителем ГГИ-3000 устанавливается дождемер ГГИ-3000 с приемной площадью 3 000 см^2.

10.3.3 Испарительный бассейн площадью 20 м^2 (Россия)

Этот испарительный бассейн представляет собой цилиндрический бак с плоским дном площадью 20 м^2, глубиной 2 м и диаметром 5 м. Он изготавливается путем сварки 4-5-миллиметровых листов железа и устанавливается в грунте, причем его края выступают над землей на 7,5 см. Внутренняя и выступающая внешняя поверхности бака окрашены в белый цвет. Бассейн оборудован специальным доливным баком и успокоителем с мерной трубкой, на которую при измерении высоты уровня воды в бассейне устанавливается объемная бюретка. В успокоителе рядом с мерной трубкой установлен специальный стерженек, заканчивающийся острием иглы и служащий указателем высоты, до которой должен корректироваться уровень воды в бассейне. Уровень воды должен всегда поддерживаться таким образом, чтобы он был не ниже и не выше острия иглы более чем на 5 и 10 мм соответственно. К доливному баку прикреплена стеклянная трубка с делениями для измерения количества воды, доливаемой в испарительный бассейн, и для грубого контроля измерений по бюретке.

10.3.4 Измерения с помощью испарителей и испарительных бассейнов

Скорость испарения измеряется путем наблюдения изменения уровня свободной поверхности воды в испарителе или бассейне. Эти измерения можно проводить с помощью таких устройств, описанных выше, как испарители класса «А» и ГГИ-3000 соответственно.

Используется несколько типов автоматических испарителей. Уровень воды в таком испарителе поддерживается путем постоянного долива воды в испаритель из доливного бака или отлива воды из испарителя после дождя. Количество доливаемой или отливаемой воды регистрируется. В некоторых испарительных бассейнах или испарителях уровень воды непрерывно регистрируется с помощью поплавка в успокоителе. Поплавок приводит в действие самописец.

Измерения испарения с поверхности испарителя положены в основу ряда методик для оценки испарения и суммарного испарения с естественных поверхностей, потеря воды которыми представляет интерес. Измерениям, производимым с помощью испарителей, отдается предпочтение, поскольку в любом случае они являются результатом воздействия всех метеорологических параметров, а данные измерений можно получить сразу же и за любой требуемый период времени. Поэтому испарители часто используются для получения текущей информации об испарении в пределах наблюдательной сети.

10.3.5 Размещение испарителей и испарительных бассейнов

Для испарителей и испарительных бассейнов в основном используются следующие три вида размещения:

a) размещение в грунте, когда основная емкость испарительного бассейна расположена ниже уровня земли, при этом испаряющая поверхность находится на уровне поверхности земли или вблизи нее;

b) размещение над землей, когда весь испаритель и испаряющая поверхность находятся на небольшой высоте над поверхностью земли;

c) размещение на заякоренных плавающих платформах на озерах или других водных объектах.

Испарительные площадки должны размещаться на совершенно ровных и открытых участках, свободных от всякого рода препятствий, таких как деревья, здания, кустарники или приборные будки. Расстояние между такими отдельными препятствиями, если они небольшого размера, и испарителем должно быть в пять раз больше их высоты над испарителем; для препятствий, образующих скопления, это расстояние должно быть в 10 раз больше. Участки должны быть достаточно большими, чтобы на показания не влиял снос струй или краевые эффекты со стороны участка с сельскохозяйственной культурой или какие-либо другие. Такие эффекты могут распространяться на расстояние более 100 м. Участок должен быть огорожен, чтобы защитить приборы и не допустить к воде животных; однако ограда должна быть устроена таким образом, чтобы не нарушать структуру поля ветра над испарителем.

Покров поверхности испарительной площадки следует поддерживать в состоянии как можно близком к естественному покрову, характерному для данной территории. Траву, сорняки и тому подобное необходимо регулярно скашивать, для того чтобы их высота не превышала высоту кромки испарителя (7,5 см). Такая же высота травы (менее 7,5 см) предпочтительна также для испарителей класса «А». Прибор ни в коем случае нельзя устанавливать на бетон, асфальт или гравий. Испарители этого типа не следует закрывать от солнца.

10.3.6 Источники ошибки в испарителях и испарительных бассейнах

От способа установки испарителя зависят как различные преимущества, так и источники ошибок при измерениях.

Испарители, установленные над поверхностью земли, дешевы, и их легко устанавливать и обслуживать. Они чище установленных в грунте испарительных бассейнов, поскольку грязь не смывается в них в больших количествах с окружающей поверхности. Любую утечку, возникшую после установки, легко обнаружить и устранить. Однако количество испарившейся воды больше, чем из установленных в грунте испарителей, главным образом, за счет дополнительной лучистой энергии, поглощаемой через боковую поверхность. Нежелательное воздействие стенки испарителя можно в значительной степени исключить, используя защищенный испаритель, но это приводит к его удорожанию, нарушению стандартных инструкций и изменению «устойчивых связей», упомянутых в 10.3.

Размещение испарителя в грунте способствует уменьшению нежелательных граничных эффектов, таких как влияние излучения на боковую поверхность и теплообмен между собственно испарителем и атмосферой. Однако недостатками являются следующие:

a) в испарителе накапливается больше ненужных веществ, и его трудно очищать;

b) течь трудно обнаружить и устранить;

c) высота окружающей растительности является в некоторой степени более критичной. Кроме того, имеет место значительный теплообмен между водной массой испарителя и почвой, и это зависит от многих факторов, включая тип почвы и ее влагосодержание, а также растительный покров.

В случае плавучего испарителя условия более приближены к испарению с поверхности озера, чем к испарению с прибрежного испарителя, установленного или над землей или на уровне земли, хотя способности аккумулировать тепло у плавучего испарителя и у озера различны. На плавучий испаритель, однако, оказывает влияние то озеро, в котором он находится, и испаритель не всегда является хорошим индикатором испарения с поверхности озера. Имеются значительные трудности при проведении наблюдений и, в частности, забрызгивание и выплескивание часто ухудшают репрезентативность данных. Установка и эксплуатация таких испарителей требуют значительных затрат.

При любом способе размещения важно, чтобы испаритель был изготовлен из нержавеющего металла, и чтобы все соединения были прочными и не давали течи.

Сильный дождь и очень сильный ветер могут вызвать выплескивание из испарителей, в результате чего измерения могут стать ошибочными.

Имеет значение уровень водной поверхности в испарителе. Если испаритель переполнен, то до 10 % (или более) любых жидких осадков может вылетать из него в виде брызг, что приведет к завышенной оценке испарения. Слишком низкий уровень воды приведет к уменьшенной скорости испарения (2,5 % на каждый сантиметр ниже 5сантиметрового исходного уровня в районах с умеренным испарением) в результате затененности бортиком. Если допустить очень низкий уровень воды, то скорость испарения увеличивается за счет повышенного нагрева водной поверхности.

Рекомендуется ограничить допускаемый интервал изменения уровня воды либо с помощью автоматических методов, путем подгонки уровня при снятии каждого показания, либо путем отлива или долива воды, когда уровень достигает верхней или нижней отметок соответственно.

10.3.7 **Обслуживание испарителей и испарительных бассейнов**

Осмотр следует проводить не реже одного раза в месяц, уделяя особое внимание обнаружению течи. Испаритель следует чистить по мере необходимости, удаляя мусор, осадок, водоросли и нефтяные пленки. Рекомендуется добавление в воду небольшого количества медного купороса или других альгицидов для ограничения роста водорослей.

Если вода замерзает, необходимо сколоть весь лед со стенок испарительного бассейна и, пока лед плавает, произвести замеры уровня. Если лед разрушен, то тот факт, что часть воды находится в замерзшем состоянии, незначительно влияет на ее уровень. Если толщина льда не позволяет его расколоть, измерения следует отложить до того времени, когда это можно будет сделать; тогда испарение следует определять за более продолжительный период времени.

Нередко приходится защищать испаритель от птиц и мелких животных, особенно в засушливых и тропических районах. Это можно обеспечить с помощью использования следующих средств:

a) химических репеллентов. Во всех случаях использования такой защиты необходимо принимать меры, чтобы физические характеристики воды в испарителе значительно не изменялись;

b) проволочной сетки, натянутой над испарителем. Стандартные сетки такого типа широко используются в ряде районов. Они защищают воду от птиц и животных, но они уменьшают потери на испарение за счет частичного экранирования поверхности воды от солнечной радиации и уменьшения интенсивности движения воздуха

над водной поверхностью. Для оценки ошибки, обусловленной воздействиями проволочной сетки на поле ветра и тепловые характеристики испарителя, рекомендуется сравнить показания защищаемого испарителя с показаниями стандартного испарителя, расположенного на ближайшей подходящей для сравнения площадке. Испытания с предохранительным цилиндром, который изготовлен из 25-миллиметровой стальной сетки с шестиугольными ячейками, удерживаемой каркасом из 8-миллиметровых стальных прутьев, выявили стабильное уменьшение скорости испарения, равное 10 % за двухлетний период на трех различных площадках.

10.4 ИЗМЕРИТЕЛИ СУММАРНОГО ИСПАРЕНИЯ (ЛИЗИМЕТРЫ)

Несколько типов лизиметров описано в специальной технической литературе. Подробное описание конструкций некоторых приборов, используемых в различных странах, приводится в публикациях ВМО (WMO, 1966; 2008 (том I)).

Обычно лизиметр представляет собой внутренний наполненный почвой контейнер, установленный в углублении в грунте с укрепленными стенками или в наружном заглубленном контейнере со специальными устройствами для измерения фильтрации и изменения влагосодержания почвы.

Не существует универсального международного стандартного лизиметра для измерения суммарного испарения. Площадь поверхности используемых лизиметров изменяется от 0,05 м^2 до нескольких сотен квадратных метров, а их глубина — от 0,1 до 5,0 м. В соответствии с принципом их действия лизиметры могут быть классифицированы как невесовые и весовые приборы. Каждый из этих типов приборов имеет свои конкретные достоинства и недостатки, и выбор какого-либо типа лизиметра зависит от поставленной задачи.

Невесовые (фильтрационный тип) лизиметры могут использоваться только для измерений, производимых через большие промежутки времени, за исключением тех случаев, когда влагосодержание почвы может быть измерено каким-либо независимым и надежным способом. Большие лизиметры фильтрационного типа используются для исследований водного баланса и суммарного испарения в том случае, если растительный покров состоит из зрелых деревьев — высоких, с глубокими корнями. Небольшие лизиметры простого типа для почвы, лишенной растительности либо покрытой травой или сельскохозяйственными культурами, могут давать результаты, полезные для практических целей во влажных условиях. Лизиметр такого типа может быть легко установлен, а стоимость его технического обслуживания невысока, благодаря чему он подходит для использования при организации сети наблюдений.

Стоимость весовых лизиметров, за исключением простых микролизиметров для измерения почвенного испарения, гораздо выше, но их преимущество заключается в том, что они обеспечивают надежные и точные оценки суммарного испарения за небольшие промежутки времени при условии соблюдения необходимых мер предосторожности в отношении конструкции, эксплуатации и размещения.

Разработано несколько видов технологий взвешивания с использованием механических и гидравлических принципов. Более простые небольшие лизиметры обычно вынимают из углубления для них и размещают на механических весах с помощью передвижных подъемных кранов. Контейнер лизиметра может быть установлен на стационарных механических весах для непрерывной регистрации показаний. Конструкция системы взвешивания и регистрации может быть значительно упрощена путем использования датчиков нагрузки и тензодатчиков с изменяющимся электрическим сопротивлением. В гидравлических системах взвешивания используется принцип вытеснения жидкости в результате изменения плавучести контейнера (так называемый плавучий лизиметр) или принцип изменения давления жидкости в гидравлических датчиках нагрузки.

Большие взвешиваемые и регистрирующие лизиметры рекомендуются для точных измерений в исследовательских центрах, а также для стандартизации и параметризации других методов измерения эвапотранспирации и ее моделирования. Взвешиваемые лизиметры небольшого размера весьма полезны и подходят для использования в сети. Микролизиметры для измерения испарения с почвы – это относительно новое средство измерений.

10.4.1 **Измерение с помощью лизиметра**

Скорость суммарного испарения можно определить из обобщенного уравнения водного баланса для контейнеров лизиметра. Значение суммарного испарения равно количеству осадков (или воды при поливе) за вычетом количества просочившейся (дренированной, отфильтрованной) воды изменения запаса воды в почве.

Таким образом, программа наблюдений на площадках, где установлены лизиметры, включает наблюдения за осадками (или поливом), фильтрацией и изменением запаса воды в почве. Полезно включить в эту программу также наблюдения за ростом и развитием растений.

Количество осадков (а также воды в поливе, если он имеет место) предпочтительно измерять на уровне земли стандартными методами. Сбор фильтрующейся воды производится в резервуаре, и ее объем может измеряться через регулярные интервалы времени или регистрироваться с помощью прибора. Для точных измерений изменения водных запасов используются точные гравиметрические методы, описанные выше. При взвешивании лизиметр следует экранировать во избежание воздействия ветровой нагрузки.

Долговременные значения суммарного испарения вполне удовлетворительно можно оценивать с применением объемного метода. С помощью этого метода производятся измерения осадков и фильтрации. Допускается, что за период между наблюдениями изменение запаса воды стремится к нулю. Изменения влагосодержания почвы могут быть определены путем доведения содержания влаги в почве до значения, характерного для полевых условий в начале и конце этого периода.

10.4.2 **Размещение измерителей суммарного испарения**

Наблюдения за суммарным испарением должны учитывать растительный покров и условия влажности на общей территории вокруг станции (ВМО, 2015). Для имитации репрезентативных значений интенсивности суммарного испарения почва и растительный покров лизиметра должны соответствовать почве и растительному покрову окружающей территории, а любые неблагоприятные эффекты, вызванные присутствием приборов, должны быть сведены к минимуму. Наиболее важные требования к размещению лизиметров описаны ниже.

Для обеспечения сохранения гидромеханических свойств естественной почвы рекомендуется поместить ее в контейнер в виде целого блока (монолита). В случае почвы рыхлого, довольно однородного типа и при наличии большого контейнера достаточно наполнить контейнер слой за слоем в той же последовательности и с той же плотностью, как и в натуральном разрезе почвы.

С целью моделирования естественного дренажного процесса в контейнере следует обеспечить свободный дренаж у его дна. В зависимости от текстуры почвы может оказаться необходимым обеспечить искусственное отсасывание на днище лизиметра посредством разрежения воздуха.

Лизиметр, кроме микролизиметров, предназначенных для измерения испарения почвы, должен быть достаточно большим и глубоким, а его кромка низкой насколько это практически возможно, чтобы получить репрезентативный, свободно растущий зеленый покров без каких-либо ограничений для его развития.

В целом, расположение лизиметров зависит от требований, связанных с препятствиями для ветра, таких же, как требования к установке испарительных бассейнов, а именно: площадка должна быть расположена вне зоны влияния зданий, даже одиночных деревьев, метеорологических приборов и т. д. Для того чтобы свести к минимуму эффекты адвекции, площадки с лизиметрами следует располагать на достаточном расстоянии от влияющих на поле ветра препятствий, имеющихся на окружающей территории, т. е. на расстоянии не менее чем 100–150 м. Предотвращение эффектов адвекции очень важно при измерениях, проводимых на орошаемых землях.

10.4.3 Источники ошибки в измерениях с помощью лизиметров

Для измерений с помощью лизиметров характерно несколько источников ошибки, возникающей вследствие нарушения естественных условий самим прибором. Ниже перечислены некоторые основные факторы:

a) ограниченный рост корневой системы;

b) изменение турбулентной диффузии в результате нарушения однородности растительного покрова между лизиметром и окружающей территорией. Любое нарушение однородности может быть обусловлено наличием кольцеобразного слоя, образованного стенкой контейнера и подпорными стенами, а также в результате возникновения различий в самом растительном покрове;

c) недостаточная тепловая эквивалентность лизиметра и окружающей почвы в результате следующих причин:

   i) термоизоляции от подпочвенного слоя;

   ii) термических эффектов воздуха, поднимающегося или опускающегося между контейнером и стенками углубления;

   iii) изменения термических свойств почвы вследствие изменения ее структуры и влажности;

d) недостаточная эквивалентность водного баланса в лизиметре и в окружающей почве в результате:

   i) нарушения структуры почвы;

   ii) ограниченного дренажа;

   iii) вертикальной фильтрации через стенки углубления;

   iv) предотвращения стока с поверхности и поперечного движения почвенной влаги.

Существует несколько удобных способов сведения к минимуму ошибок, возникающих при измерениях лизиметрами (например, регулировка температуры под контейнером, сокращение вертикальной фильтрации стен с помощью колец с фланцами и т. д.). Помимо требований к точному воспроизведению конструкции оборудования лизиметра, особенно большое значение имеет достаточная репрезентативность растительности и типа почвы для изучаемой местности. Более того, местоположение площадки почвенного испарителя должно быть полностью репрезентативным для естественных полевых условий.

10.4.4 Обслуживание лизиметров

Для обеспечения репрезентативности растительного покрова в лизиметре необходимо учитывать несколько факторов. Все сельскохозяйственные и другие работы (сев, внесение удобрений, жатва и тому подобное) в контейнере и на окружающей территории должны проводиться одинаково и одновременно. Во избежание ошибок, связанных с атмосферными осадками, растения около и внутри контейнера должны поддерживаться в вертикальном положении, а опавшие листья и сломанные стебли не должны находиться на поверхности лизиметра.

Обслуживание технических устройств является специфическим для каждого вида приборов и его описание не может быть дано в этом документе.

Желательно, по крайней мере, один раз в год проверять измеритель суммарного испарения на течь путем экранирования его поверхности для предотвращения суммарного испарения и последующего наблюдения в течение нескольких дней за объемом дренажа, который должен быть равен количеству воды, добавленной на его поверхность.

10.5 ОЦЕНКА ИСПАРЕНИЯ С ЕСТЕСТВЕННЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ

Как показано в 10.1.3, анализ факторов, влияющих на испарение, свидетельствует о том, что скорость испарения с естественных поверхностей обязательно будет отличаться от скорости испарения с измерителя испарения, установленного в таких же атмосферных условиях, поскольку физические характеристики двух испаряющих поверхностей не идентичны.

На практике интерес представляет скорость испарения или суммарного испарения с естественных поверхностей, например, испарение с поверхности водохранилища или озера, с территорий, занятых сельскохозяйственными культурами, а также пространственное распределение испарения с таких обширных поверхностей суши, как районы водосбора.

В частности, точные пространственные оценки суммарного испарения в регионах с различными характеристиками поверхности и формами землепользования получить очень трудно (WMO, 1966, 1997).

Подходящие методы для оценки испарения с поверхности озера или водохранилища — это использование водного баланса, энергетического баланса и аэродинамических подходов, метода комбинирования аэродинамических и энергобалансовых уравнений и взаимодополняющей связи между действительным и потенциальным испарением. Кроме того, в ряде методик испарение, измеренное с помощью испарителя, используется для установления связи озеро-испаритель. Эти связи являются специфическими для каждого типа испарителя и способа их размещения. Они также зависят и от климатических условий (см. WMO, 1985, 2008 (том I, глава 4)).

Значения в точке или ареале не ограниченного наличием воды суммарного испарения с поверхности суши, покрытой растительностью, могут быть получены путем определения такого потенциального суммарного испарения (или суммарного испарения для эталонной сельскохозяйственной культуры) методами, аналогичными уже вышеописанным методам для озер, но адаптированными к условиям растительности. Некоторые методы используют дополнительные коэффициенты зависимости от стадии роста для каждого вида растительности, такой как сельскохозяйственные культуры, и/или интегрированное значение устьичного сопротивления, характерное для растительности в целом.

Королевский Нидерландский метеорологический институт применяет следующую процедуру, разработанную Г. Ф. Маккинком (Hooghart, 1971) для расчета суточного (24 ч) эталонного испарения растительности при среднесуточной температуре воздуха и суточном количестве суммарной радиации:

если давление насыщенного водяного пара при температуре воздуха T:

$$e_s(T) = 6{,}107 \cdot 10^{7{,}5 \cdot \frac{T}{237{,}3+T}}$$ гПа

наклон кривой насыщенного водяного пара в зависимости от температуры T:

$$\Delta(T) = \frac{7{,}5 \cdot 237{,}3}{(237{,}3+T)^2} \cdot \ln(10) \cdot e_s(T)$$ гПа/°C

психрометрический коэффициент:

$$\Delta(T) = 0{,}646 + 0{,}0006T$$ гПа/°C

удельная теплота испарения воды:

$$\lambda(T) = 1\,000 \cdot (2\,501 - 2{,}38 \cdot T)$$ Дж/кг

плотность воды:

$$\rho = 1\,000$$ кг/м³

суммарная суточная радиация (количество за 24 ч):

$$Q$$ Дж/м²

температура воздуха (среднесуточная):

$$T$$ °C

тогда суточное эталонное испарение (суточная интенсивность испарения) с растительности:[1]

$$E_r = \frac{1000 \cdot 0{,}65 \cdot \delta(T)}{\{\delta(T) + \gamma(T)\} \cdot \rho \cdot \lambda(T)} \cdot Q$$ мм

Связывая измеренное значение интенсивности действительного суммарного испарения с оценками не ограниченного наличием воды потенциального суммарного испарения, а затем последовательно связывая эту нормализованную величину с влагосодержанием почвы, дефицитом воды в почве или водным потенциалом в корневой зоне, можно получить коэффициенты для расчета действительной интенсивности суммарного испарения при данном влагосодержании.

Значения действительного суммарного испарения с земной поверхности могут оцениваться и непосредственно в ходе наблюдений за изменениями влагосодержания почвы путем измерений влажности почвы на регулярной основе. Можно произвести измерения более точно, используя весовой лизиметр. В других методах применяются измерения турбулентности (например, метод корреляции турбулентного потока) и измерения профилей (например, методы использования данных для пограничного слоя, а также метод расчета коэффициента энергетического баланса Боуэна на двух уровнях). Эти методы более дорогостоящие, для их реализации требуются специальные приборы и датчики влажности, скорости ветра и температуры. Такие оценки для изучаемых типов почв и растительного покрова могут быть использованы в качестве надежных независимых справочных данных при выявлении эмпирических связей в процессе моделирования суммарного испарения.

При определении суммарного испарения с поверхности бассейна возникает проблема, связанная с тем, что в случае нарушения непрерывности характеристик поверхности

[1] Константа 1000 используется для преобразования из метров в миллиметры; константа 0,65 является типичной эмпирической константой.

значения интенсивности суммарного испарения в пределах рассматриваемой территории становятся различными. При рассмотрении значений, полученных в результате измерений через короткие промежутки времени, необходимо оценивать суммарное испарение с использованием эмпирических связей. Для оценки суммарного испарения с поверхности водного бассейна за большой период времени (в целях сведения к минимуму эффектов накопления) может быть использован метод водного баланса (см. WMO, 1971). Один из подходов, применяемых для оценок испарения с обширных территорий, связан с методом водного баланса, при этом суммарное испарение по площади оценивается на основе данных радиозондирования. Информация об описанных выше методах, их преимуществах и пределах их применения представлена в публикации ВМО (2008, том I, глава 4).

Измерение испарения с поверхности снега является более сложной задачей, и, возможно, данные таких измерений менее точные, чем расчет испарения с поверхности воды.

Во многих странах для измерения испарения с поверхности снежного покрова используются испарители, изготовленные из полиэтилена или бесцветной пластмассы; наблюдения проводятся только при отсутствии снегопада.

Испарение со снежного покрова можно оценивать на основании данных наблюдений влажности воздуха и скорости ветра на одном или двух уровнях над поверхностью снежного покрова и непосредственно у поверхности с использованием уравнения турбулентной диффузии. Оценки считаются наиболее надежными, когда значения испарения вычисляются для пятидневных и более длинных периодов.

СПРАВОЧНАЯ И ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ЛИТЕРАТУРА

Всемирная метеорологическая организация, 1992: *Международный метеорологический словарь* (ВМО-№ 182). Женева.

———, 2008: *Руководство по гидрологической практике* (ВМО-№ 168), тома I и II. Женева.

———, 2015 (обновлено в 2017 г.): *Руководство по Глобальной системе наблюдений* (ВМО-№ 544), том I. Женева.

Всемирная метеорологическая организация/Организация Объединенных Наций по вопросам образования, науки и культуры, 2012: *Международный гидрологический словарь* (ВМО-№ 385). Женева.

Hooghart, J.C. (ed.), 1971: *Evaporation and Weather.* TNO Committee of Hydrological Research, Technical Meeting 44, Proceedings and Information No. 39, TNO, The Hague.

World Meteorological Organization, 1966: *Measurement and Estimation of Evaporation and Evapotranspiration*. Technical Note No. 83 (WMO-No. 201, TP. 105). Geneva.

———, 1971: *Problems of Evaporation Assessment in the Water Balance* (C.E. Hounam). WMO/IHD Report No. 13 (WMO-No. 285). Geneva.

———, 1973: *Atmospheric Vapour Flux Computations for Hydrological Purposes* (J.P. Peixoto). WMO/IHD Report No. 20 (WMO-No. 357). Geneva.

———, 1976: *The CIMO International Evaporimeter Comparisons* (WMO-No. 449). Geneva.

———, 1977: *Hydrological Application of Atmospheric Vapour-Flux Analyses* (E.M. Rasmusson). Operational Hydrology Report No. 11 (WMO-No. 476). Geneva.

———, 1985: *Casebook on Operational Assessment of Areal Evaporation.* Operational Hydrology Report No. 22 (WMO-No. 635). Geneva.

———, 1997: *Estimation of Areal Evapotranspiration.* Technical Reports in Hydrology and Water Resources No. 56 (WMO/TD-No. 785). Geneva.

ГЛАВА 11. ИЗМЕРЕНИЕ ВЛАЖНОСТИ ПОЧВЫ

11.1 ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

Влажность почвы является важным компонентом атмосферного водного цикла как в небольшом сельскохозяйственном масштабе, так и в крупномасштабном моделировании взаимодействия суши/атмосферы. Растительность и сельскохозяйственные культуры всегда в большей степени зависят от состояния влажности на корневом уровне, нежели от выпадения осадков. Составление водного баланса для планирования ирригации, а также составление фактического графика ирригационных мероприятий требует наличия информации о влажности почвы на местном уровне. Наличие информации о степени влажности почвы способствует пониманию начала конвективных явлений и прогнозированию риска быстроразвивающихся паводков или образования тумана.

Тем не менее, на метеорологических станциях редко проводятся регулярные наблюдения за состоянием влажности почвы. Документация о влажности почвы обычно ограничивалась описанием «состояния почвы» в соответствии с кодовыми таблицами ВМО 0901 и 0975, а его измерение оставлялось на усмотрение гидрологов, специалистов сельского хозяйства и других весьма заинтересованных сторон. Примерно в 1990 г. метеорологи стали проявлять больший интерес к измерению влажности почвы. Отчасти это объяснялось тем, что по результатам новаторской работы Диадорффа (Deardorff, 1978) численные модели атмосферы различных масштабов стали в большей мере приспособлены к работе с данными о потоках явного и скрытого тепла в поверхностных слоях почвы. Кроме того, новые разработанные методы измерения влажности почвы являются более практически применимыми для метеорологических станций по сравнению с большинством классических методов.

Для удовлетворения возрастающей потребности в определении состояния влажности почвы будут рассмотрены наиболее распространенные методы и приборы, в том числе их преимущества и недостатки. Будут также упомянуты некоторые менее распространенные методы наблюдений. В данной главе рассматриваются вопросы измерений влажности почвы как *in situ*, так и с помощью дистанционного зондирования. Также охватываются вопросы дистанционного зондирования из космоса, дополненные информацией в томе IV настоящего Руководства.

11.1.1 Определения

При определении влажности почвы измеряются либо содержание почвенной влаги, либо потенциал почвенной влаги.

Содержание почвенной влаги. Выражается в виде массы или объема влаги в почве, при этом энергетическое состояние почвенной влаги выражается в виде потенциала почвенной влаги. Отношение между содержанием и потенциалом не является универсальным и зависит от характеристик местной почвы, таких как плотность почвы и текстура почвы.

Содержание влаги в почве, определяемое на основе массы, выражается в виде гравиметрического содержания влаги в почве — θ_g, определяемого формулой:

$$\theta_g = M_{water} / M_{soil} \tag{11.1}$$

где M_{water} — масса воды в образце почвы, а M_{soil} — масса сухой почвы, содержащейся в почвенном образце. Значения θ_g обычно выражаются в метеорологии в %.

Поскольку параметры осадков, суммарного испарения и переноса растворенных веществ обычно выражаются в виде потока, объемное выражение содержания влаги в почве часто является более полезным. Объемное содержание влаги в почве в почвенном образце — θ_v выражается формулой:

$$\theta_v = V_{water} / V_{sample} \tag{11.2}$$

где V_{water} — это объем воды в почвенном образце, а V_{sample} — общий объем сухой почвы + воздух + вода в образце. И в этом случае, данное отношение обычно выражается в %, хотя многие научно-исследовательские сообщества в настоящее время принимают объемное содержание влаги ($м^3/м^3$) в качестве стандарта для выражения влажности почвы. Зависимость между гравиметрическим и объемным содержанием влаги выражается формулой:

$$\theta_v = \theta_g \left(\rho_b / \rho_w \right) \tag{11.3}$$

где ρ_b — плотность сухой почвы, а ρ_w — плотность почвенной воды.

Основным способом измерения влагосодержания почвы является гравиметрический метод, описанный ниже в 11.2. Поскольку в основе этого метода лежат прямые измерения, он является стандартом, по которому сравниваются все другие методы. К сожалению, взятие гравиметрических проб нарушает структуру почвы и делает невозможным повторные измерения на том же самом почвенном образце. Ввиду трудностей точного измерения объемов сухой почвы и воды объемные содержания влаги обычно не определяются непосредственным образом.

Потенциал влажности почвы. Это является описанием энергетического состояния почвенной влаги и важным параметром для анализа переноса воды, оценок запаса воды и определения взаимосвязей в системе почва–растения–вода. Разность потенциалов почвенной влаги между двумя участками почвы характеризует тенденцию перетока воды от участка с высоким потенциалом к участку с низким потенциалом. При высыхании почвы потенциал ее влажности становится более отрицательным и поэтому увеличивается объем работы, который должен быть выполнен для извлечения воды из почвы. В результате этого затрудняется извлечение воды растениями и, таким образом, водный потенциал в растениях уменьшается, что приводит к нагрузке на растения и, в конечном итоге, к их ускоренному увяданию.

Формально потенциал влажности почвы является мерой измерения способности почвенной влаги совершать работу или, в случае отрицательного потенциала, — работу, которую необходимо совершить для извлечения воды из почвы. Общий потенциал почвенной влаги ψ_t — совокупный эффект всех силовых полей — выражается в виде формулы:

$$\psi_t = \psi_z + \psi_m + \psi_o + \psi_p \tag{11.4}$$

где ψ_z — гравитационный потенциал, определяемый высотой места над средним уровнем моря (СУМ); ψ_m — матричный потенциал (благодаря которому происходит всасывание воды почвенной матрицей); ψ_o — осмотический потенциал, являющийся результатом энергетических эффектов растворенных в воде веществ; ψ_p — потенциал давления, т. е. гидростатическое давление ниже поверхности воды.

Совокупность потенциалов, не связанных с составом воды или почвы, именуется гидравлическим потенциалом — ψ_h. В случае насыщенной почвы он выражается в виде формулы $\psi_h = \psi_z + \psi_p$, а в случае ненасыщенной почвы — формулой $\psi_h = \psi_z + \psi_m$. При использовании фразы «водный потенциал», иногда с символом ψ_w, рекомендуется проверять данное автором определение, поскольку этот термин может быть использован для формулы $\psi_m + \psi_z$, а также для формулы $\psi_m + \psi_o$.

Градиенты отдельных потенциалов не всегда будут достаточно эффективными в создании стока. Например, ψ_o требует наличия полупроницаемой мембраны для создания стока, а ψ_p будет существовать в условиях насыщения или подпора, однако в большинстве случаев практических применений почва является ненасыщенной.

11.1.2 Единицы измерения

При решении уравнений баланса массы или неразрывности применительно к воде необходимо помнить о том, что компоненты набора параметров содержания воды не являются безразмерными. Гравиметрическое содержание влаги в почве выражается в виде веса почвенной влаги, содержащейся в единице веса почвы (кг воды/кг сухой почвы). Аналогично этому, объемное содержание влаги является объемной долей ($м^3$ воды/$м^3$ почвы).

Базовой единицей водного потенциала является единица энергии (в джоулях = $кг \cdot м^2 \cdot с^{-2}$) на единицу массы — $Дж \cdot кг^{-1}$. При ином способе описания энергия на единицу объема ($Дж \cdot м^{-3}$) является эквивалентом давления, выраженного в паскалях ($Па = кг \cdot м^{-1} \cdot с^{-2}$). Единицами измерения, встречающимися в более ранней литературе, являются бар (= 100 кПа), атмосфера (= 101,32 кПа) или фунты на квадратный дюйм (= 6,895 кПа). Третьим классом единиц измерения являются единицы измерения высоты столба воды или ртути в (санти)метрах — энергия на единицу веса. Отношение этих трех потенциальных классов единиц выражается следующей формулой:

$$\psi\left(\mathrm{J \cdot kg^{-1}}\right) = \gamma \cdot \psi\left(\mathrm{Pa}\right) = \left[\psi\left(\mathrm{m}\right)\right] / \mathrm{g} \tag{11.5}$$

где γ = 103 $кг \cdot м^{-3}$ (плотность воды) и g = 9,81 $м \cdot с^{-2}$ (ускорение свободного падения). Поскольку потенциал почвенной влаги характеризуется широким диапазоном значений, он часто выражается в логарифмической шкале — в виде логарифма давления водяного столба. Обычно используемая единица для него называется pF и равна логарифму десятичному от абсолютного значения высоты водяного столба, выраженной в сантиметрах.

11.1.3 Метеорологические требования

Почва состоит из отдельных частиц и крупнозернистой массы минеральных и органических материалов, разделенных пространством или порами, которые заполнены водой и воздухом. Относительный объем пористого пространства уменьшается по мере увеличения размера частиц почвы (интуитивно ожидалось бы обратное). Перемещение жидкой воды в почве зависит от размера, строения и как правило геометрии пористого пространства.

При добавлении большого количества воды в образец «сухой» почвы часть этой воды в результате действия гравитации быстро просачивается через любые относительно большие трещины и каналы. Оставшаяся часть воды будет стремиться вытеснить часть воздуха в пространстве между частицами и, в первую очередь, в крупных пористых пространствах. В широком смысле слова четко определенный «фронт увлажнения» будет перемещаться в почве в направлении сверху вниз, оставляя при этом все более толстый слой, сохраняющий всю влажность, которую он может удержать, несмотря на действие гравитации. Соответственно этот слой почвы именуется «полевой влагоемкостью» – состояние, при котором большинство видов почвы характеризуется формулой $\psi_m \approx -33$ Дж/кг в диапазоне значений от –1 Дж/кг для органических почв до –100 Дж/кг для тяжелых глинистых почв. Значение –10 Дж/кг (pF ≈ 2) может быть установлено для суглинистой песчаной почвы. Это состояние почвы нельзя смешивать с нежелательной ситуацией «насыщенной» почвы, когда все пористое пространство заполнено водой. После вызывающего насыщение явления, такого как сильный дождь, почве обычно требуется по меньшей мере 24 ч для достижения полевой влагоемкости. Когда содержание влажности снижается ниже уровня полевой влагоемкости, последующее ограниченное перемещение воды в почве происходит частично в жидком виде и частично в паровой фазе в результате дистилляции (в зависимости от температурных градиентов в почве), и иногда в результате переноса воды в корнях растений.

Корни растения в почвенном блоке будут извлекать жидкую воду из водяных пленок вокруг частиц почвы, с которыми они находятся в контакте. Скорость, с которой возможно это извлечение, зависит от потенциала важности почвы. Наступает момент, когда силы, удерживающие пленки влажности у частиц почвы, не могут быть преодолены

всасывающей способностью корней растений, и в результате чего растениям не хватает воды, и они утрачивают свою упругость (тургор): влажность почвы достигает «точки увядания», которая в большинстве случаев наблюдается при потенциале влажности почвы –1,5 МПа (pF ≈ 4,2). В сельском хозяйстве доступной растениям влажностью почвы обычно считается количественная разница между полевой влагоемкостью и точкой увядания, и это значение характеризуется существенным различием в зависимости от вида почвы: в песчаных почвах оно может быть менее 10 объемных процентов, а в почвах с большим содержанием органического вещества оно может превышать 40 объемных процентов.

Желательно обычно знать содержание и потенциал влажности почвы как функцию глубины. Модели суммарного испарения (модели эвапотранспирации касаются, главным образом, небольшой глубины (десятки сантиметров); сельскохозяйственные же применения требуют наличия информации о влажности на глубине обитания корней (порядка одного метра), а модели общей циркуляции атмосферы включают ряд слоев до нескольких метров. Для гидрологических потребностей и нужд водного баланса, таких как модели стока в масштабе водосбора, а также для оказания воздействия на свойства почвы, такие как механическая прочность, теплопроводность и диффузионная способность, требуется информация о содержании влаги в почве на различной глубине. В зависимости от вида применения меняется точность, требуемая в отношении определения содержания влажности и пространственного и временного разрешения. Часто возникает проблема, связанная с неоднородностью многих видов почвы, суть которой заключается в том, что единственное место наблюдения не может обеспечить абсолютную информацию о состоянии влажности почвы на какой-либо территории, а предоставляет лишь относительные сведения об ее изменении.

11.1.4 **Методы измерения**

Методы и приборы, имеющиеся для оценки состояния влажности почвы, могут быть классифицированы тремя способами. Во-первых, проводится различие между определением влагосодержания и определением потенциала влажности. Во-вторых, так называемый прямой метод требует наличия обширной репрезентативной территории, на которой можно брать большое количество проб почвы для проведения разрушающего анализа в лаборатории. При косвенных методах используется прибор, помещаемый в почву для измерения определенной характеристики почвы, связанной с ее влажностью. В-третьих, методы могут быть классифицированы согласно оперативной приемлемости, при этом учитывается постоянный состав привлекаемого персонала, степень зависимости от наличия исследовательских лабораторий, сложность функционирования и достоверность результата. Кроме того, предварительные затраты на приобретение приборного оборудования должны сравниваться с последующими затратами на местные регулярные наблюдения и обработку данных.

Такие обзоры, как подготовленные ВМО (WMO, 1968, 1989, 2001) и Schmugge et al. (1980), являются весьма полезными для ознакомления с практическими задачами, однако, например, диэлектрические методы измерений влажности почвы стали достаточно корректными только после 1980 г., поэтому не следует чрезмерно полагаться на слишком ранние обзоры при выборе оперативного метода.

Имеются пять оперативных альтернативных вариантов для определения содержания почвенной влаги. Во-первых, существует классическое гравиметрическое определение влагосодержания, которое является простым прямым методом. Во-вторых, существует лизиметрия — не разрушающий почву вариант гравиметрических измерений. Он заключается в том, что заполненный почвой контейнер взвешивается либо эпизодически, либо постоянно для получения сведений об изменении общей массы в контейнере; эти сведения могут быть частным или общим результатом изменений во влажности почвы (более подробно лизиметры рассматриваются в настоящем томе, глава 10). В-третьих, содержание влаги может определяться косвенным образом посредством различных радиологических методов, таких как рассеяние нейтронов или поглощение гамма-излучения. В-четвертых, данные о содержании влаги могут определяться, исходя из

диэлектрических характеристик почвы, например, путем использования динамической рефлектометрии. И наконец, влажность почвы можно получить в глобальном масштабе с помощью дистанционных измерений тепловых или отражательных свойств Земли.

Измерение потенциала влажности почвы может осуществляться несколькими косвенными методами, в частности с использованием тензиометров, резисторных блоков и почвенных психрометров. Ни один из этих приборов не является эффективным в настоящее время в отношении полного спектра возможных значений потенциала влаги. Информация о расширенном исследовании всех различных методов измерений влажности почвы содержится в обновленных справочных пособиях, подготовленных Klute (1986), Dirksen (1999), Gardner et al. (2001) и Mullins (2001).

11.2 ПРЯМОЕ ГРАВИМЕТРИЧЕСКОЕ ИЗМЕРЕНИЕ СОДЕРЖАНИЯ ВЛАГИ В ПОЧВЕ

Гравиметрическое измерение содержания влаги в почве θ_g обычно осуществляется непосредственным образом. Образцы почвы массой около 50 г берутся в полевых условиях с помощью наиболее доступных орудий (лопаты, спиральные ручные буры, ковшовые буры, керновые буры с механическим приводом), при этом образец структуры почвы разрушается по возможности в минимальной степени (Dirksen, 1999). Пробы почвы следует немедленно поместить в водонепроницаемый, бесшовный, предварительно взвешенный и маркированный контейнер. Поскольку пробы будут помещены в печь, этот контейнер должен выдерживать высокие температуры и, при этом не плавиться и не терять собственную массу. Самыми распространенными контейнерами для почвы являются алюминиевые банки, однако в случае высушивания проб в лаборатории в микроволновых печах следует использовать неметаллические контейнеры. Если пробы почвы должны перевозиться на большое расстояние, следует использовать ленту для герметизации контейнера, с тем чтобы предотвратить потерю влажности в результате испарения.

Пробы и контейнер взвешиваются в лаборатории перед высушиванием и после него, при этом разница представляет собой массу воды, первоначально содержавшейся в пробе почвы. Процедура высушивания заключается в помещении открытого контейнера в электрическую печь при температуре 105 °C до тех пор, пока масса не стабилизируется на постоянном уровне. Время, обычно необходимое для высушивания, колеблется от 16 до 24 часов. Необходимо отметить, что высушивание при температуре 105 ± 5 °C является частью общепринятого процесса определения «содержания влаги в почве», исходной целью которого является измерение содержания только «свободной влаги», которое не связано с матрицей почвы (Gardner et al., 2001).

Если пробы почвы содержат значительные количества органического вещества, то при температуре 105 °C может произойти чрезмерное окисление его и некоторая часть органического вещества из пробы будет потеряна. Хотя трудно определить конкретную температуру, при которой происходит такое, понижение температуры печи со 105 °C до 70 °C является, очевидно, достаточным, для того чтобы избежать существенной потери органического вещества. Однако это может привести к оценкам содержания влаги, которые являются слишком низкими. Следует проверять и регистрировать температуру и время высушивания в печи.

Кроме применения электрической печи для гравиметрического определения содержания воды в почве также может эффективно использоваться высушивание в микроволновой печи (Gee and Dodson, 1981). При использовании этого метода температура воды в почве быстро повышается до точки кипения, при которой она остается постоянной в течение определенного периода времени, обусловленного поглощением тепла водой в процессе испарения. Затем температура быстро повышается, как только энергия, поглощаемая водой в почве, превысит энергию, которую необходимо расходовать для испарения воды. При использовании этого метода следует проявлять осторожность, поскольку при значительном повышении температуры пластмассовые контейнеры могут расплавиться, если в пробе почвы присутствуют камни.

Гравиметрическое содержание влаги в воздушно-сухой (25 °C) минеральной почве часто составляет менее 2 %, однако, по мере приближения почвы к точке насыщения, содержание влаги может увеличиться до значений от 25 до 60 % в зависимости от типа почвы. Объемное содержание влаги в почве θ_v может находиться в пределах от менее 10 % для воздушно-сухой почвы до 40–50 % для приближающихся к точке насыщения минеральных почв. Определение величины θ_v почвы требует проведения измерения плотности почвы, например, посредством покрытия комка почвы парафином и его взвешивания в воздухе и воде, либо при помощи какого-либо другого метода (Campbell и Henshall, 2001).

Содержание влаги в каменистой или гравийной почве может быть весьма неопределенным. В тех случаях, когда камни занимают существенный объем почвы, они изменяют результат прямого измерения почвенной массы, не оказывая при этом аналогичного воздействия на пористость почвы. Например, гравиметрическое содержание влаги может составлять 10 % для пробы почвы с объемной плотностью в 2000 кг·м$^{-3}$; в то же время содержание влаги в пробе, состоящей из мелкого почвенного материала (камни и гравий исключаются), составило бы 20 %, если объемная плотность мелкого почвенного материала составляла 1620 кг·м$^{-3}$.

Хотя гравиметрическое содержание влаги для фракции мелкозернистой почвы $\theta_{g,fines}$ является величиной, обычно используемой для пространственного и временного сравнения, может также существовать необходимость определения объемного содержания влаги в гравийной почве. Последнее значение может иметь важное значение при расчете объема влаги в корневой зоне. Соотношение между гравиметрическим содержанием влаги в мелкозернистом почвенном материале и объемным содержанием влаги выражается формулой:

$$\theta_{v,stony} = \theta_{g,fines}\left(\rho_b / \rho_w\right)\left(1 + M_{stones} / M_{fines}\right) \quad (11.6)$$

где $\theta_{v,stony}$ — объемное содержание влаги в почве, в состав которой входят камни или гравий, а M_{stones} и M_{fines} — соответственно массы камней и мелкозернистых почвенных фракций (Klute, 1986).

11.3 СОДЕРЖАНИЕ ВЛАГИ В ПОЧВЕ: КОСВЕННЫЕ МЕТОДЫ

Способность почвы удерживать влагу является функцией текстуры и структуры почвы. При отборе пробы почвы исследуемая почва разрушается, и соответственно изменяется ее способность удерживать воду. Косвенные методы измерения содержания влаги в почве являются целесообразными, когда они позволяют собирать информацию с одного и того же участка от многих точек наблюдений, не разрушая при этом систему почва-вода. Кроме того, при помощи большинства косвенных методов определяется объемное содержание влаги в почве и при этом совершенно отсутствует какая-либо необходимость в определении плотности почвы.

11.3.1 Радиологические методы

Существуют два разных радиологических метода для измерения содержания влаги в почве. Одним из них является широко используемый метод рассеяния нейтронов, который основан на взаимодействии нейтронов большой энергии (быстрых нейтронов) с ядрами атомов водорода в почве. При помощи другого метода измеряется ослабление гамма-лучей во время их прохождения через почву. Оба метода используют портативное оборудование для проведения многочисленных измерений на станциях постоянных наблюдений и требуют тщательной калибровки, предпочтительно в почве, в которой должно использоваться данное оборудование.

При использовании любого устройства радиоактивного излучения необходимо соблюдать определенные меры предосторожности. Изготовитель предоставляет защитный экран, которым необходимо постоянно пользоваться. Измерительный щуп находится вне

защитного экрана только тогда, когда он опускается в скважину в почве, армированную трубой. При соблюдении руководств и правил радиационной безопасности, составленных фирмами-изготовителями и органами здравоохранения, нет никакой опасности подвергнуться воздействию повышенного уровня радиации независимо от того, как часто используется оборудование. Тем не менее, вне зависимости от типа используемого устройства радиоактивного излучения, оператор должен носить при себе определенный вид дозиметра, который позволит ежемесячно оценивать и фиксировать персональные уровни облучения.

11.3.1.1 *Метод рассеяния нейтронов*

При определении влажности в почве при помощи нейтронов (Visvalingam и Tandy, 1972; Greacen, 1981) в почву опускается датчик, в который вмонтированы радиоактивный источник, испускающий нейтроны большой энергии (быстрые нейтроны), и счетчик медленных нейтронов. Ядра водорода, масса которых почти равна массе нейтронов, обладают способностью замедления нейтронов при столкновении с ними по меньшей мере в десять раз, равно как и большинство других содержащихся в почве ядер. Поскольку в любой почве большая часть водорода присутствует в виде молекул воды, плотность потока медленных («тепловых») нейтронов вблизи нейтронного зонда приблизительно пропорциональна объемному содержанию влаги в почве.

После ряда столкновений определенная доля замедленных нейтронов вновь достигает датчика и его счетчика. Если содержание влаги в почве является значительным, не так много нейтронов способны пролететь большое расстояние до того момента, когда они станут тепловыми и неэффективными, и в таком случае 95 % подсчитанных нейтронов поступает из относительно небольшого объема почвенного слоя. Во влажной почве «радиус воздействия» может составлять лишь 15 см, тогда как в сухой почве этот радиус может увеличиться до 50 см. В этой связи измеряемый объем почвы меняется в зависимости от содержания влаги, и невозможно разделять тонкие слои. Таким образом, этот метод в меньшей степени подходит для локализации разрывов непрерывности в содержании влаги и не может эффективно использоваться в верхнем слое почвы толщиной в 20 см из-за разрыва непрерывности в среде почва–воздух.

Возможно, несколько вариантов расположения источника и детектора в нейтронном датчике, однако наилучшим является датчик с двойным детектором и источником в центре – как правило, в цилиндрическом контейнере. Подобное расположение позволяет обеспечить почти сферическую зону воздействия и получить более линейную зависимость подсчета нейтронов от влагосодержания почвы.

Для соединения нейтронного датчика с основным электронным оборудованием используется кабель, с тем чтобы этот зонд можно было опускать в предварительно подготовленную скважину в почве, армированную трубой. Труба, армирующая скважину, должна быть без стыков и с достаточно толстой стенкой (не менее 1,25 мм), чтобы обеспечить жесткость, но не настолько толстой, чтобы вызывать значительное замедление нейтронов. Эта труба должна быть изготовлена из устойчивого к коррозии материала, такого как нержавеющая сталь, алюминий или пластмасса, хотя следует избегать использования поливинилхлорида, поскольку он поглощает медленные нейтроны. Обычно достаточной является прямая труба диаметром в 5 см, для того чтобы опускать датчик в эту трубу, не опасаясь, что он там застрянет. При установке армирующей трубы следует проявлять аккуратность для обеспечения того, чтобы между этой трубой и почвенной матрицей не было ни одной воздушной полости. Труба должна выступать над поверхностью почвы как минимум на 10 см, с тем чтобы обеспечить установку поверх армирующей трубы бокса, содержащего электронное оборудование. Все армирующие трубы должны быть снабжены съемными крышками для предотвращения попадания дождевой воды в эти трубы.

Для повышения экспериментальной воспроизводимости результатов измерений содержание воды в почве определяется не напрямую по числу зарегистрированных медленных нейтронов, а по расчетному соотношению (CR), выраженному следующей формулой:

$$\mathrm{CR} = C_{\mathrm{soil}} / C_{\mathrm{background}} \tag{11.7}$$

где C_{soil} — число тепловых нейтронов, зарегистрированных от почвы, а $C_{\mathrm{background}}$ — число тепловых нейтронов в исходном носителе. Все нейтронные датчики снабжаются в настоящее время стандартным образцом для этих фоновых калибровок — обычно в сопоставлении с водой. Стандартный образец, в который помещается датчик, должен иметь как минимум 0,5 м в диаметре, с тем чтобы представлять «неопределенный» носитель. Калибровка для определения $C_{\mathrm{background}}$ может проводиться посредством снятия 10-одноминутных показаний, которые должны усредняться, или посредством единственного одночасового показания. C_{soil} определяется на основе усреднения нескольких показаний измерений в почве на конкретной глубине/месте. Для целей калибровки лучшего всего взять три пробы вокруг армирующей скважину трубы и усреднить показатели содержания воды, соответствующие среднему CR, рассчитанному для этой глубины. Для каждой глубины следует оценивать, как минимум, пять различных значений влагосодержания в почве. Хотя некоторые калибровочные кривые могут быть аналогичными, следует проводить отдельную калибровку для каждой глубины. Срок службы большинства датчиков составляет более 10 лет.

11.3.1.2 *Ослабление гамма-излучения*

Если нейтронный метод измеряет объемное содержание воды в большой сфере, то при использовании метода абсорбции гамма-излучения сканируется тонкий слой. В настоящее время прибор с применением гамма-каротажа с двумя датчиками используется в лабораторных условиях, поскольку для использования в полевых условиях стали пригодными диэлектрические методы. Другой причиной этого является то, что гамма-лучи представляют собой большую опасность при работе с ними по сравнению с устройствами на основе рассеяния нейтронов, а также тот факт, что эксплуатационные расходы на приборы гамма-излучения являются относительно высокими.

Изменения в ослаблении гамма-излучения для заданного массового коэффициента поглощения могут быть связаны с изменениями общей плотности почвы. Поскольку поглощение гамма-излучения обусловлено массой, то невозможно определить содержание воды, пока неизвестно ослабление гамма-излучения, вызванное плотностью сухой почвы в данном месте, и пока оно остается неизменным при изменении содержания влаги. В этой связи непростой задачей является точное определение содержания влаги в почве на основе разницы между общими значениями ослабления и значениями ослабления в сухой почве.

По сравнению с методом рассеяния нейтронов затухание гамма-излучения обладает преимуществом, позволяющим проведение точных измерений на глубине в несколько сантиметров ниже раздела между воздухом и поверхностью почвы. Хотя данный метод характеризуется высокой степенью разрешения, малый объем оцениваемой почвы приведет к большему отражению в результатах значительной пространственной изменчивости, вызванной неоднородностью почвы (Gardner и Calissendorff, 1967).

11.3.2 Диэлектрические постоянные системы почва–вода

При помещении какого-либо вещества в электрическое поле конденсатора или волновода его воздействие на электрические силы в этом поле выражаются в виде соотношения между силами в данном веществе и теми силами, которые существовали бы в вакууме. Это отношение, именуемое диэлектрической проницаемостью или «диэлектрической постоянной», применительно к жидкой воде почти в 20 раз превышает соответствующее соотношение для усредненной сухой почвы, поскольку молекулы воды являются постоянными диполями. Диэлектрические свойства льда и воды, рассматриваемые в связи

с почвенной матрицей, сопоставимы с соответствующими характеристиками сухой почвы. Благодаря этому объемное содержание свободной почвенной влаги может определяться по диэлектрическим характеристикам влажной почвы посредством надежных, быстрых и недеструктивных методов измерения без потенциальных опасностей, связанных с радиоактивными устройствами. Кроме того, подобные диэлектрические методы могут быть полностью автоматизированы для получения данных. В настоящее время коммерчески доступными и широко используемыми являются два метода для оценки диэлектрических характеристик почвенной влаги, а именно динамическая рефлектометрия и частотное измерение.

11.3.2.1 ***Динамическая рефлектометрия***

Динамическая рефлектометрия — это метод, позволяющий определять диэлектрическую постоянную путем наблюдения прохождения электромагнитного импульса, который запускается вдоль волновода, образуемого двумя погруженными в почву параллельными стержнями. Этот импульс отражается в конце волновода, и скорость его распространения, которая является обратно пропорциональной квадратному корню из диэлектрической постоянной, может точно измеряться существующими электронными приборами.

Наиболее широко используемое соотношение между диэлектрическими свойствами почвы и содержанием влаги в почве было представлено в компактной форме на основе экспериментальных данных авторами Topp et al. (1980) в виде следующей формулы:

$$\theta_{\mathrm{v}} = -0,053 + 0,029\varepsilon - 5,5\cdot 10^{-4}\varepsilon^{2} + 4,3\cdot 10^{-6}\varepsilon^{3} \qquad (11.8)$$

где ε — диэлектрическая постоянная системы почва-вода. Эта эмпирическая зависимость доказала свою применимость для многих видов почвы и в целом не зависит от текстуры почвы и содержания в ней гравия (Drungil et al., 1989). В то же время калибровка применительно к конкретному виду почвы является желательной для почв с низкой плотностью или с высоким содержанием органических веществ. Для сложных почвенных смесей в качестве полезного зарекомендовало себя уравнение Де Лоора (Dirksen и Dasberg, 1993).

Обычно расстояние между параллельными датчиками составляет 5 см, а их длина колеблется от 10 до 50 см; стержни зонда могут быть изготовлены из любого металла. Объем образца представляет собой, главным образом, цилиндр с радиусом в несколько сантиметров вокруг параллельных датчиков (Knight, 1992). Длина коаксиального кабеля от датчика до прибора для обработки сигнала не должна превышать 30 м. Характеристики почвенной влаги могут быть получены при помощи погруженного в почву комплекта датчиков, при этом каждый из них размещен горизонтально на разной глубине и подсоединен к полевому регистратору данных при помощи мультиплексора.

11.3.2.2 ***Измерение частотного диапазона***

В то время как динамическая рефлектометрия использует микроволновый поддиапазон гигагерцового диапазона, датчики на одночастотном методе измеряют диэлектрическую постоянную на единственной частоте мегагерцового диапазона. При измерениях с помощью микроволнового диэлектрического датчика используются открытый коаксиальный кабель и один рефлектометр, установленный на конце датчика для измерения амплитуды и фазы на конкретной частоте. Результаты измерений в почве сравниваются с результатами измерений в воздухе и обычно калибруются с помощью диэлектрических блоков и/или жидкостей с известными диэлектрическими свойствами. Одним из преимуществ использования жидкостей для калибровки является идеальный электрический контакт между наконечником датчика и данным материалом (Jackson, 1990).

Поскольку используется один наконечник датчика малого размера, оценивается только небольшой объем почвы и поэтому исключительно важное значение имеет контакт с почвой. В связи с этим такой метод прекрасно подходит для лабораторных измерений

или точечных измерений, но подвержен, вероятно, погрешностям, обусловленным пространственной изменчивостью измеряемой величины, если он используется в полевых условиях (Dirksen, 1999).

11.4 ПРИБОРЫ ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ПОТЕНЦИАЛА ВЛАЖНОСТИ ПОЧВЫ

Основные приборы, позволяющие измерять матричный потенциал, являются относительно недорогими и надежными, для того чтобы использоваться в программах мониторинга полевого масштаба. Однако каждый прибор имеет ограниченный доступный диапазон потенциала влажности. Например, тензиометры хорошо работают только во влажной почве, в то время как блоки электрического сопротивления лучше действуют в умеренно сухой почве.

11.4.1 Тензиометры

Наиболее широко используемым и наименее дорогостоящим устройством для измерения потенциала почвенной влаги является тензиометр. Тензиометры являются простыми приборами, как правило, состоящими из пористой керамической чашки и герметической пластмассовой цилиндрической трубы, соединяющей пористую чашку с определенным регистрирующим давление устройством в верхней части цилиндра. Они измеряют матричный потенциал, поскольку растворенные вещества могут свободно проходить через пористую чашку.

При функционировании тензиометра устанавливается условие его квазиравновесия с системой почва-вода. Пористая керамическая чашка служит в качестве мембраны, через которую протекает вода, и поэтому для правильного функционирования чашка всегда должна оставаться насыщенной. Следовательно, все поры керамической чашки и цилиндрической трубы первоначально заполняются водой, из которой удален воздух. Помещенный в почву тензиометр будет подвергаться воздействию отрицательных потенциалов почва–вода, вызывая движение воды из тензиометра в окружающую его почвенную матрицу. Движение воды из тензиометра создаст отрицательный потенциал или всасывание в цилиндре тензиометра, который будет фиксироваться регистрирующим устройством. Для целей регистрации подходит простая U-образная трубка, наполненная водой или ртутью, вакуумный манометр Бурдона или преобразователь давления (Marthaler et al., 1983).

Если потенциал почвенной влаги увеличивается, то вода перемещается из почвы обратно в тензиометр, результатом чего является уменьшение регистрируемого отрицательного потенциала почвенной влаги. Этот обмен водой между почвой и тензиометром, а также подверженность тензиометра отрицательным потенциалам приведет к тому, что растворенные газы освобождаются из раствора, создавая воздушные пузырьки. Образование воздушных пузырьков изменит показатели давления в цилиндре тензиометра и приведет к ошибочным показаниям. Другое ограничение заключается в том, что тензиометр имеет практический рабочий предел $\psi \approx -85$ кПа. При давлении за пределами –100 кПа (≈ 1 атм.) вода будет кипеть при температуре окружающей среды, образуя пузырьки водяного пара, которые нарушают вакуум внутри цилиндра тензиометра. Соответственно, из цилиндров необходимо время от времени удалять воздух при помощи насоса с ручным приводом, а затем вновь наполнять их водой.

В условиях засухи существенное количество воды может перемещаться из тензиометра в почву. Таким образом, наличие тензиометров может изменить то самое состояние, которое они призваны измерять. Дополнительным подтверждением этого процесса является то, что извлеченные из почвы тензиометры часто содержали вблизи керамических чашек большое число собранных корней. Как правило, в тех случаях, когда тензиометры действуют в качестве «ирригатора», через керамические чашки теряется так много воды, что становится невозможным поддерживать вакуум в цилиндре, и тензиометр перестанет работать.

Перед установкой, но после того как тензиометр был наполнен водой и была произведена дегазация, керамическая чашка должна оставаться влажной. Если керамическую чашку обернуть во влажную ткань и поместить в контейнер с водой, то она будет оставаться влажной во время перевозки прибора из лаборатории в поле. В поле готовится скважина соответствующего размера и глубины. Скважина должна быть достаточно большой, чтобы плотно прилегать ко всем сторонам цилиндра, и достаточно глубокой, для того чтобы тензиометр достаточно выступал над поверхностью почвы для удаления воздуха и обеспечения повторного наполнения. Поскольку керамическая чашка должна оставаться в контакте с почвой, в случае каменистой почвы полезным может оказаться подготовка жидкого раствора из выкопанной на площадке земли и его заливка в скважину до помещения в нее тензиометра. Следует также соблюдать осторожность и обеспечить, чтобы скважина была должным образом засыпана, исключив таким образом любое уменьшение давления, которое может привести к заполнению водой пространства вокруг тензиометра. Эта предосторожность сведет к минимуму любое движение воды вниз по стенкам цилиндра, которое привело бы к созданию нерепрезентативных условий в системе почва-вода.

Воздействию окружающей среды подвержена лишь незначительная часть тензиометра, однако попадание на нее солнечной радиации может вызвать тепловое расширение верхнего конца цилиндра тензиометра. Аналогичным образом, наличие градиентов температуры между поверхностью почвы и керамической чашкой может привести к тепловому расширению или сжатию нижнего конца цилиндра. Для сведения к минимуму риска того, что температура вызовет ложные показания потенциала влажности, цилиндр тензиометра следует помещать в тени и изготовлять его из непроводящих материалов, а также снимать показания ежедневно в одно и то же время, предпочтительно рано утром.

Новой разработкой является осмотический тензиометр, в котором трубка измерителя заполняется полимерным раствором для лучшего функционирования в сухой почве. Дополнительную информацию о тензиометрах см. в работах Dirksen (1999) и Mullins (2001).

11.4.2 **Блоки электрического сопротивления**

Блоки электрического сопротивления, несмотря на их нечувствительность к потенциалам влажности почвы в определенном диапазоне влажности, являются прекрасным дополнением тензиометров. Они состоят из электродов, заключенных в определенный пористый материал, который в течение порядка двух дней достигнет состояния квазиравновесия с почвой. В качестве материалов для изготовления блоков обычно используются нейлоновая ткань, стекловолокно и гипс с рабочим диапазоном порядка –50 кПа (для нейлона) или –100 кПа (для гипса) и до –1500 кПа. Типичные размеры блока составляют 4 см × 4 см × 1 см. Срок службы гипсовых блоков равен нескольким годам, однако уменьшается в почве с высокой влажностью или соленостью (Perrier и Marsh, 1958).

При помощи этого метода определяется потенциал влажности в качестве функции электрического сопротивления, которая измеряется мостом переменного тока (обычно ≈ 1 000 Гц), поскольку постоянный ток вызывает эффекты поляризации. В то же время сопротивление уменьшается в случае засоленной почвы, давая при этом ложные показания о завышенной влажности почвы. Гипсовые блоки менее чувствительны к воздействию солености почвы, поскольку электроды постоянно находятся под воздействием насыщенного раствора сульфата кальция. В показания гипсовых блоков необходимо вносить поправки на температуру (Aggelides и Londra, 1998).

Благодаря тому, что блоки электрического сопротивления не выделяются над поверхностью земли, они прекрасно подходят для полустационарных сельскохозяйственных сетей для измерения характеристик потенциала влаги, в том случае если их установка осуществляется тщательным и систематическим образом (WMO, 2001). При установке блоков электрического сопротивления лучше всего вырыть небольшую траншею для подводящих проводов, прежде чем готовить скважину для блоков, с

тем чтобы свести к минимуму движение воды вдоль проводов к блокам. Возможной проблемой в полевых условиях является то, что в результате усыхания и разбухания почвы может быть нарушен контакт с блоками. С другой стороны, блоки электрического сопротивления не затрагивают расположение корней растений.

Блоки электрического сопротивления относительно недороги, однако они нуждаются в индивидуальной калибровке. Это обычно осуществляется перед установкой в поле путем насыщения блоков дистиллированной водой и последующего их помещения под пресс с заранее заданным давлением (Wellings et al., 1985), при этом используются как минимум пять различных значений давления. К сожалению, сопротивление меньше на кривой усыхания почвы по сравнению с кривой ее увлажнения, в результате чего при измерении в поле появляются ошибки, связанные с явлением гистерезиса, т. к. блоки сопротивления медленно достигают равновесия с меняющейся влажностью почвы (Tanner и Hanks, 1952). Поскольку кривые калибровки блоков сопротивления со временем изменяются, то блоки необходимо калибровать до установки, а затем регулярно проверять либо в лаборатории, либо в полевых условиях.

11.4.3 **Психрометры**

Психрометры используются в лабораторных исследованиях образцов почвы в качестве эталона для других методов (Mullins, 2001), однако имеется также модель для работы в полевых условиях, именуемая психрометром Спаннера (Rawlins и Campbell, 1986). Психрометр представляет собой миниатюрную термопару, помещенную внутри небольшой камеры с пористой стенкой. Термопара охлаждается благодаря эффекту Пельтье, при этом на спае термопары конденсируется влага. При испарении влаги со спая его температура уменьшается и возникает ток, который измеряется амперметром. Эти измерения быстро реагируют на изменения потенциала почвенной влаги, но весьма чувствительны к температуре и солености (Merrill и Rawlins, 1972).

Наиболее низкий потенциал влаги, обычно связанный с активным забором воды растениями, соответствует относительной влажности от 98 % до 100 %. Это означает, что для точного измерения потенциала влажности почвы в пределах 10 кПа температура должна будет контролироваться с точностью более 0,001 K. Отсюда следует, что полевые психрометры лучше всего использовать для измерения низких матричных потенциалов, составляющих менее –300 кПа. Кроме того, компоненты прибора отличаются по своим характеристикам теплоемкости, и поэтому суточные колебания температуры почвы могут привести к образованию градиентов температуры в психрометре (Brunini и Thurtell, 1982). В этой связи психрометры Спаннера не следует использовать на глубинах менее 0,3 м, а показания следует снимать ежедневно в одно и то же время, предпочтительно ранним утром. Таким образом, почвенный психрометр представляет собой сложный и требовательный метод даже для специалистов.

11.5 **ВЫБОР МЕСТА И РАЗМЕР ПРОБЫ**

При проведении наблюдений за влажностью почвы не существует эталонной глубины или интервала измерений, в связи с тем, что это существенно зависит от задач исследований, для решения которых устанавливаются датчики. Международная сеть наблюдений за влажностью почвы (МСНВП; Dorigo et al., 2011) предоставляет обширную базу данных с гармонизированными временными рядами измерений влажности почвы *in situ*, полученными с сетей по всему миру. Здесь данные по возможности увязаны с получасовым интервалом измерений. Большинство сетей и станций МСНВП измеряют влажность почвы на нескольких глубинах от 0,05 м до 0,50 м или до 1 м. В результате, характеристики влажности почвы на различных глубинах можно сравнить и использовать для проверки достоверности данных измерений. Измерения других метеорологических параметров представляют большую ценность для определения влажности почвы. Например, данные по атмосферным осадкам на месте измерений могут помочь в определении достоверности данных о влажности почвы.

Репрезентативность любой точки наблюдения за влажностью почвы является ограниченной ввиду вероятности существования значительных разновидностей почвенной структуры как в горизонтальном, так и вертикальном направлениях (пористость, плотность, химический состав), почвенно-растительного покрова и рельефа. Важнейшим фактором является определение влажности почвы и ее изменчивости в масштабе, необходимом для проведения исследований гидрологических процессов и проверки достоверности спутниковых данных. Определение гравиметрического содержания влаги или непрямые измерения влажности почвы являются достоверными только в точке измерения, что вызывает необходимость взятия большого количества проб для адекватного описания состояния влажности почвы в данном месте. При расчете числа проб n, необходимых для определения содержания влаги в почве в локальной зоне при соблюдаемом уровне точности (L), можно использовать следующее уравнение:

$$n = 4\left(\sigma^2 / L^2\right) \tag{11.9}$$

где σ^2 — дисперсия между пробами, полученная на основе предварительного эксперимента по взятию проб. Например, предположим, что в результате предварительного взятия проб было получено (типичное) значение σ^2, равное 25 %, а необходимый уровень точности находится в пределах 3 %. В таком случае понадобится 12 проб из этого места (если можно допустить, что содержание влаги в почве равномерно распределяется по данному месту). Исследование, выполненное Brocca et al. (2007), показало, что минимальное количество проб в точках, необходимое для района в центральной части Италии, протяженностью примерно от 9 до 8 800 м^2, изменялось от 15 до 35. Большее количество проб было необходимо для площадок с более значительным рельефом. Famiglietti et al. (2008) пришли к выводу, что 30 проб достаточно для покрытия территории площадью 50 км^2, предполагая, что данные получены из независимого источника и неоткоррелированы в пространственном отношении.

Масштабирование точечных измерений, полученных посредством гравиметрического определения содержания влаги или косвенных измерений датчиками in situ, являлось предметом многих исследований. Методы масштабирования меняются от относительно прямой интерполяции и способов временной/ранговой устойчивости до более сложных методов, таких как статистические преобразования и моделирование земной поверхности. С помощью широко используемого анализа временной/ранговой устойчивости, разработанного Vachaud et al. (1985) выполняется оценка возможности использования одного места расположения датчика влажности почвы для оценки среднего значения по всей площадке. Friesen et al. (2008) представили новый метод, который был применен Bircher et al. (2011), где отбор проб для определения влажности почвы был основан на ландшафтных зонах с внутренними согласованными гидрологическими параметрами. Этот метод обеспечивает статистически надежную обоснованность посредством сокращения разброса охвата и уменьшения возможности ошибки при нерепрезентативном отборе проб.

11.6 ДИСТАНЦИОННОЕ ЗОНДИРОВАНИЕ ВЛАЖНОСТИ ПОЧВЫ

Ранее в этой главе упоминалось о том, что единственное место для проведения наблюдений не может обеспечить получение полной информации о влажности почвы в регионе. Влажность почвы имеет большую изменчивость в пространстве и времени, что затрудняет измерения в масштабе континента или в глобальном масштабе, необходимые исследователям (Senevirante et al., 2010). Дистанционные измерения влажности почвы со спутников решают эти проблемы, предоставляя данные наблюдений за влажностью почвы в верхнем слое в глобальном масштабе в течение 1–2 дней при всем многообразии условий.

В целом, дистанционное зондирование направлено на измерение характеристик поверхности Земли посредством анализа взаимодействий между поверхностью земли и электромагнитным излучением (ЭМИ). Это может быть выполнено с помощью регистрации естественно излучаемой радиации (пассивные системы) или методом подсветки земной поверхности и регистрации отраженного сигнала

(активные системы). Влажность почвы обычно оценивается посредством результатов ее влияния на электрические или тепловые свойства почвенного слоя. Несмотря на то, что дистанционные наблюдения в микроволновом диапазоне чувствительны к диэлектрической постоянной почвы, системы дистанционного зондирования в ИК-диапазоне чувствительны к ее тепловым условиям. Информация о спутниковых наблюдениях приводится в томе IV, глава 5, 5.6.2 и 5.6.3 настоящего Руководства, где рассматриваются основные принципы наблюдений за влажностью почвы в контексте многих наблюдаемых геофизических переменных. В настоящем разделе представлена дополнительная детализированная и практическая информация.

В течение последних десятилетий было подготовлено много комплектов данных о влажности почвы, полученных при помощи различных находящихся в космосе приборов с использованием разных алгоритмов выборки (Owe et al., 2001; Njoku et al., 2003; Naeimi et al., 2009). Недавно некоторые из этих комплектов данных, полученных как методами наблюдений активного, так и пассивного микроволнового дистанционного зондирования, были объединены (Liu et al., 2011), образуя глобальный комплект данных о влажности почвы, который охватывает последние 30 лет (Liu et al., 2012).

Несмотря на то, что дистанционное зондирование оказалось ценным инструментом для измерения влажности почвы в глобальном масштабе, измерения *in situ* являются настоятельной необходимостью для калибровки и проверки достоверности полученных спутниковых данных о влажности почвы. Международная сеть наблюдений за влажностью почвы (МСНВП), являющаяся глобальной базой данных измерений *in situ* о влажности почв, была в основном разработана для проверки достоверности спутниковой продукции. Было предпринято много усилий по проверке качества продукции дистанционного зондирования с использованием измерений *in situ* (Albergel et al., 2012; Pathe et al., 2009; Su et al., 2013; Wagner et al., 2008). Кроме того, многие исследования были сосредоточены на характеристике ошибок различных видов продукции по влажности почвы (Dorigo et al., 2010; Draper et al., 2013). Эти исследования показывают, что большая часть продукции, полученной с помощью дистанционного зондирования, способна достаточно хорошо отображать сезонные и краткосрочные изменения влажности почвы. Тем не менее, погрешности абсолютной величины и динамического диапазона могут быть значительными при сравнении с данными о влажности почв *in situ* и данными моделей.

В нижеследующих пунктах будет проведен обзор теоретических основ различных используемых методов дистанционного зондирования, спутниковых приборов и алгоритмов.

11.6.1 Микроволновое дистанционное зондирование

11.6.1.1 *Введение*

При дистанционном зондировании в микроволновом диапазоне используются электромагнитные волны с длинами волн от 1 м до 1 см, что соответствует частотам от 0,3 до 300 ГГц. Важным свойством этих микроволн является то, что они могут распространяться в атмосфере Земли невозмущенными, и тем самым позволяют проводить наблюдения независимо от облачного покрова. Кроме того, так как они не связаны с солнечным освещением, микроволновые измерения можно выполнять в течение всего дня.

При применении к дистанционному зондированию поверхности Земли, закон излучения Киргхофа констатирует, что излучение тела равно единице минус его отражательную способность. Это означает, что излучение и отражение являются взаимодополняющими, и, таким образом, поверхности, которые хорошо рассеивают, являются слабыми излучателями и наоборот. В результате, одни и те же физические явления на земной поверхности оказывают влияние в обратном порядке на активные и пассивные микроволновые системы. Закон отражения Френеля описывает взаимосвязь между диэлектрической постоянной и отражательной способностью (и таким образом, излучательной способностью), где более высокая диэлектрическая постоянная дает

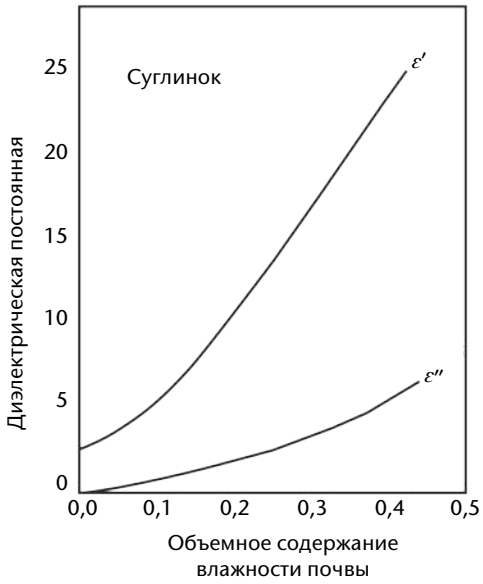


Рисунок 11.1. Взаимосвязь между комплексной диэлектрической постоянной (ε' и ε'' — величины реальной и мнимой частей соответственно) и объемным содержанием влажности почвы для суглинистых почв при частоте 5 ГГц (Hallikainen et al., 1985).

большую степень отражения (и меньшую излучательную способность). Диэлектрическая постоянная воды на порядок величины превышает диэлектрическую постоянную сухих почв в микроволновом диапазоне. Поэтому диэлектрическая постоянная почв повышается с увеличением влажности почвы (см. рисунок 11.1). При таких физических взаимосвязях возможно получить влажность почвы поверхности Земли с помощью как систем пассивного, так и активного дистанционного зондирования в микроволновом диапазоне.

Микроволновые лучи способны взаимодействовать в некоторой степени с объемным содержанием целей, так как их волны обладают большей длиной и не сразу отражаются от поверхности. Таким образом, можно получить информацию, к примеру, о внутреннем состоянии растительного покрова или почв. Как показывает опыт, чем больше длина волны, тем глубже проникновение излучения в объемное содержание. В то же время оптические волны только взаимодействуют с поверхностями и дают информацию о видимом цвете и яркости.

При наблюдении сверху растительного полога зеленые насаждения воздействуют на микроволновое излучение двумя способами: прежде всего растительность поглощает или рассеивает излучение, испускаемое почвой; и во-вторых, растительность также испускает свое собственное излучение. Под достаточно плотным пологом, испускаемое почвой излучение становится полностью скрытым, и наблюдаемое излучение будет, в основном, за счет растительности. В целом, все полосы частот, используемые в дистанционном зондировании влажности почвы в микроволновом диапазоне, реагируют на растительность и требуют некоторых соответствующих поправок данных. Высокочастотные полосы более восприимчивы к влиянию растительности.

11.6.1.2 ***Многочастотные радиометры***

Пассивные системы, такие как радиометры, регистрируют яркостную температуру поверхности Земли. Яркостные температуры связаны с величиной излучательной способности (и таким образом отражения), описанной аппроксимацией Релея-Джинса закона Планка. Этот закон гласит, что яркостные температуры являются функцией

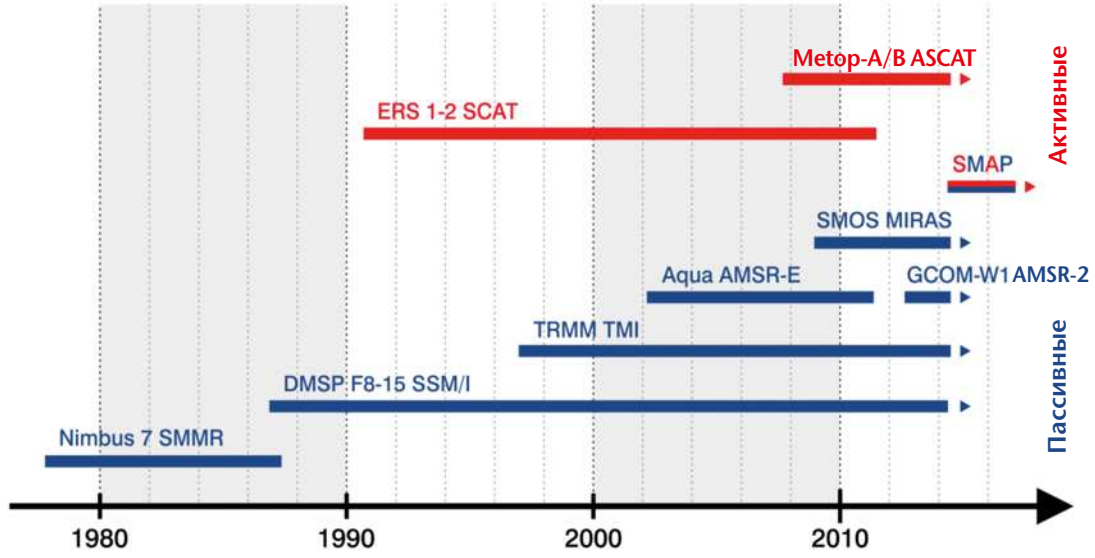


Рисунок 11.2. Активные и пассивные микроволновые датчики, используемые для получения данных о влажности почвы

физической температуры и излучательной способности. Величина излучения зависит от диэлектрической постоянной излучающего тела, как это описано в законе отражения Френеля.

С 1978 г. приборы предоставляют глобальные данные пассивного зондирования над сушей и океанами (рисунок 11.2), начиная с использования сканирующего многоканального микроволнового радиометра (1978–1987 гг.), устройства для получения изображений с помощью специального микроволнового датчика (с 1987 г.), Проекта по измерению осадков в тропиках (с 1997 г.), и с недавнего времени современных радиометров микроволнового сканирования (AMCP-E, 2002–2011 гг. и AMCP-2 с 2012 г.), спутника Кориолис ВиндСат (с 2003 г.) и китайских спутников серии Фен-Юн-3 (с 2010 г.). Первоначально эти приборы были предназначены для наблюдений за атмосферными осадками, испарением, температурами поверхности моря и криосферными параметрами, а не за влажностью почвы. Тем не менее, исследования в 1970-х гг. уже показали потенциальную возможность выделения данных о влажности почвы с помощью яркостных температур на этих частотах (Schmugge, 1976). Большое преимущество радиометров в том, что данные множественных многочастотных микроволновых радиометров имеются с 1978 г., обеспечивая получение долгосрочного комплекта данных для изучения трендов и аномалий.

Приборы, используемые для дистанционного зондирования влажности почвы, имеют частоты от 6,6 до 10,7 ГГц. Необходимо принимать во внимание, что более высокая микроволновая частота ведет к менее точным оценкам влажности почвы, так как затухание вследствие растительности повышается, а способность проникновения понижается. Поэтому выборки со сканирующего многоканального микроволнового радиометра (6,6 ГГц), AMCP-E (6,9 ГГц), Виндсат (6,8 ГГц) и AMCP-2 (6,9 ГГц) имеют более высокую точность. Другим преимуществом этих датчиков является значительное улучшение пространственного разрешения и радиометрической точности. Пространственное разрешение AMCP-E составляет 56 км, при этом продукция о влажности почвы предоставляется при пространственном разрешении 0,25°.

11.6.1.3 *Скаттерометры*

Скаттерометр представляет собой активный микроволновый прибор, который непрерывно передает короткие направленные импульсы энергии к поверхности Земли и обнаруживает отраженную энергию. Количество энергии, возвращенное прибору, зависит от геометрических и диэлектрических свойств поверхности, часто называемое нормированной эффективной площадью рассеяния или обратным рассеянием (сигма нулевая σ^0). Жертвуя диапазоном и пространственным разрешением, скаттерометры превосходят другие типы радиолокаторов по точности и стабильности в целях измерения эффективной площади отражения цели. Скаттерометры на космических аппаратах были первоначально разработаны и спроектированы для получения данных о скорости и направлении ветра над океанами. Тем не менее, в ряде исследований признается возможность использования скаттерометров для таких наземных применений, как мониторинг влажности почвы (Magagi и Kerr, 1997; Pulliainen et al., 1998; Wagner et al., 1999). Так как европейские скаттерометры работают на больших длинах волн (5,3 ГГц), чем скаттерометры США (14 ГГц), они больше подходят для выборки данных о влажности почвы.

Уникальная приборная конструкция европейских скаттерометров на борту европейских спутников дистанционного зондирования (ERC) и метеорологических оперативных спутников (Метоп) позволяют получать данные о влажности почвы в глобальном масштабе с практически суточным покрытием. Оба скаттерометра, активный микроволновый прибор (АМИ)) в режиме измерения ветра на борту ERC (Attema, 1991) и усовершенствованный скаттерометр (ASKAT) на борту спутника Метоп (Figa-Saldana et al., 2002), работают в полосе частот C (5,3 ГГц) с длиной волны примерно 5,6 см. Основными отличиями между этими двумя скаттерометрами являются количество антенн бокового обзора и диапазон наблюдаемых углов падения. Пространственное разрешение АМИ составляет примерно 60 км, тогда как продукция ASKAT обеспечивается при пространственном разрешении 25 км и 50 км.

11.6.1.4 *Радиолокаторы с синтезированной апертурой*

Спутниковые или самолетные радиолокаторы с синтезированной апертурой (РСА) являются системами активных микроволновых датчиков, которые предлагают более высокую разрешающую способность, нежели скаттерометры, благодаря усовершенствованной обработке сигнала. В качестве радиолокаторов бокового обзора, формирующих изображение, они действуют подобно скаттерометрам и используют ту же область частот. Кроме применений в гидрологии, системы РСА могут использоваться для точного получения трехмерного геометрического изображения, так как они дают возможность интерферометрии.

По мере прохождения радиолокатора бокового обзора, формирующего изображение вдоль своего пути на земле, он накапливает данные. Пространственное разрешение радиолокаторов зависит от (ограниченного) физического размера его антенны и апертуры. Используя движение носителя вдоль траектории, система РСА имитирует большую синтезированную апертуру по мере непрерывной регистрации амплитуды и фазы наземных целей, пока они видимы для РСА. Эти множественные измерения каждой цели затем суммируются когерентным образом. Небольшие объекты соответственно анализируются на земле. Однако более высокое потребление энергии и меньшая зона обслуживания приводят к более продолжительному повторному циклу в отдельных местах, и таким образом пространственное разрешение РСА уступает другим микроволновым системам в наши дни.

Более высокая сложность почвы и свойств поверхности в масштабе ниже 10 км вносит дополнительную погрешность и источники неопределенности. В результате, системы РСА пока еще не используются в оперативном обслуживании в области определения влажности почв, однако они применяются для предоперативного обслуживания и получения научной продукции (Doubkova et al., 2009; Pathe et al., 2009). Тем не менее, предстоящие запуски спутников с РСА, такие как программа Сентинел-1 Европейского

космического агентства (ЕКА) (Attema et al., 2007), перспективны в плане улучшения временного и радиометрического разрешения, и было предложено использовать РСА для оперативного обслуживания в области определения влажности почв в локальном масштабе (Hornacek et al., 2012).

11.6.1.5 *Специализированные спутники с использованием L-полосы частот*

Как отмечалось выше, более низкие частоты менее чувствительны к взаимодействию с растительным покровом, и поэтому они считаются более подходящими для получения данных о влажности почв. В связи с этим, первые два запущенные спутники, специально спроектированные для получения данных о влажности почв, работают в канале L-полосы частот (1,4 ГГц). Цель спутников для наблюдений за почвенной влагой и соленостью океана (ПВСО) и измерения влажности почвы активными и пассивными приборами (СМАП) заключается в предоставлении данных об абсолютной влажности почв с максимальной среднеквадратической ошибкой (СКО) 0,04 $м^3/м^3$.

Запуск спутника Европейского космического агентства (ЕКА) с прибором для наблюдений за влажностью почвы и соленостью океана (ПВСО) был успешно осуществлен 2 ноября 2009 г. Прибор на борту спутника ПВСО имеет уникальную конструкцию для обеспечения пространственного разрешения, необходимого для измерения влажности почвы. Так называемый сверхвысокочастотный радиометр для получения изображений с синтезированной апертурой (МИРАС) представляет двухмерный интерферометрический радиометр, на котором размер антенны, необходимой для измерения при требуемом пространственном разрешении, воспроизводится посредством 69 небольших антенн. МИРАС обеспечивает яркостные температуры с пространственным разрешением от 30 км до 50 км. Глобальное покрытие достигается каждые 2–3 дня.

Запуск спутника для измерения влажности почвы активными и пассивными приборами (СМАП) Национального управления по аэронавтике и исследованию космического пространства США (НАСА) был запланирован на 31 января 2015 г. Как и СМОС, пассивный микроволновый прибор работает в L-диапазоне частот для повышения чувствительности к влажности почвы. Однако конструкция прибора для СМАП существенно отличается от СМОС. СМАП использует антенну с реальной апертурой в форме большого (6 м) параболического вращающегося отражателя. Измерения производятся с пространственным разрешением 40 км. В дополнение к пассивным измерениям, СМАП также несет радиолокатор, который выполняет сопутствующие измерения с пространственным разрешением 1–3 км. Объединив активные и пассивные измерения, СМАП предоставляет продукцию о влажности почвы с пространственным разрешением 10 км.

11.6.1.6 *Получение данных о влажности почвы*

Для выборки данных о влажности почвы необходимы модели, которые способны объяснить влияние растительности и шероховатости поверхности на микроволновый сигнал и затем преобразовать полученную интенсивность в значения влажности почвы. Следует вновь отметить, что более короткие длины волн ведут к худшим показателям, вследствие разброса растительности и меньшей глубины проникновения. Получение данных о влажности почвы невозможно над районами густой растительности, такими как тропические влажные джунгли вследствие отсутствия проникновения волн L- и C-полосы частот через растительный полог. Кроме того, полученные оценки влажности почв справедливы только для незамерзших почв и без снежного покрова.

Пассивные системы измеряют микроволновую яркостную температуру и получают косвенным образом излучательную способность, которая затем вводится в модель излучательного переноса. Данные о температуре почвы, шероховатости, текстуре и других параметрах наблюдавшегося района являются необходимой вспомогательной информацией. Данные пассивных микроволновых наблюдений AMSR-E доступны, используя либо алгоритм поиска ВУА-НАСА (VUA-NASA), разработанный Университетом

Врийе, Амстердам (ВУА) и НАСА и основанный на модели поиска наземных параметров, как описано в работе Owe et al. (2001), официальной продукции AMCP-E, НАСА (Njoku et al., 2003; Njoku, 2004), либо алгоритм поиска Университета Монтаны (Jones et al., 2009; Jones and Kimbal. 2010). Все эти алгоритмы поиска основаны на уравнениях излучательного переноса. Однако алгоритмы поиска существенно различаются и дают совершенно разные значения влажности почвы. Алгоритм поиска ВУА-НАСА одновременно определяет оптическую глубину растительности и диэлектрическую постоянную почвы. Влажность почвы рассчитывается с использованием смешанной модели Ванга и Шмугге (Wang and Schmugge, 1980).

Прибор СМОС предоставляет оперативную продукцию по влажности почвы (Kerr et al., 2012). Алгоритм поиска СМОС использует итеративный подход для минимизации функции затрат между смоделированными яркостными температурами и прямыми измерениями. Таким образом, найден наилучший набор параметров, включая влажность почв и растительность. Уровень 2 данных СМОС по влажности почвы может загружаться в режиме онлайн через Earthnet EKA (https://earth.esa.int/web/guest/-/how-to-obtain-data-7329).

Активные приборы измеряют интенсивность обратного рассеяния, являющуюся функцией шероховатости, угла падения и диэлектрических свойств поверхности. Растительность и другие виды влияния вносят вклад в сигнал, который используется для определения коэффициента обратного рассеяния. Получение данных о влажности почвы, предоставляемых в качестве оперативной продукции с прибора ACKAT и научной продукции АМИ в режиме измерения ветра, основывается на полуэмпирическом методе обнаружения изменения. Этот метод, алгоритм обнаружения изменения TU Wien, разработанный в Техническом университете Вены, создан специально для уникальной конструкции прибора. Принимая линейную связь между радиолокационным рассеянием и влажностью почвы в области измерения в децибелах, можно получить относительную меру влажности в первых нескольких сантиметрах почвы, представляющую степень насыщения (0–100 %). В очень сухих регионах, в особенности в песчаных пустынях, подход извлечения данных не подходит, по-видимому, вследствие сложного механизма поверхности, объема и подповерхностного рассеяния. Данные о влажности почвы, полученные с помощью алгоритма обнаружения изменения TU Wien, находятся в свободном доступе на веб-сайте Технического университета Вены (http://rs.geo.tuwien.ac.at/products/) или Европейской организации по эксплуатации метеорологических спутников (EBMETCAT; http://www.eumetsat.int/website/home/Data/Products/Land/index.html).

Обзор оперативной продукции, касающейся влажности почвы, представлен в таблице ниже.

Оперативная продукция, касающаяся влажности почвы, и ее характеристики

Ссылка на продукцию	*CMOC (SMOS)*	*AMCP-E (AMSR-E)*	*ACKAT (ASCAT)*
Спутник			
Название	CMOC (SMOS)	Аква (Aqua)	Метоп-A/B (Metop-A/B)
Агентства	EKA/КНЕС[a]/СДТИ[b] (ESA/CNES[a]/CDTI[b])	НАСА	EBMETCAT/EKA (EUMETSAT/ESA)
Срок службы	С 2.11.09	4.5.02–4.10.11	С 19.10.06
Орбита	Полярная	Полярная	Полярная
Высота	758 км	705 км	837 км
Период	100 мин	99 мин	100 мин
Время пересечения экватора	06:00 (восходящая) 18:00 (нисходящая)	13:30 (восходящая) 01:30 (нисходящая)	21:30 (восходящая) 09:30 (нисходящая)

Ссылка на продукцию	*СМОС (SMOS)*	*АМСР-Е (AMSR-E)*	*АСКАТ (ASCAT)*
Тип	Научно-исследовательский спутник	Научно-исследовательский спутник	Оперативный (3 спутника)
Датчик			
Название	МИРАС (MIRAS)	АМСР-Е (AMSR-E)	АСКАТ (ASCAT)
Тип	Радиометр с синтезированной апертурой	Многочастотный радиометр с реальной апертурой	Скаттерометр с реальной апертурой
Полоса обзора	1 000 км	1 450 км	2 x 550 км
Принцип сканирования	Двухмерный интерферометр переднего обзора	Вращающийся параболический отражатель	6 антенн бокового обзора с веерным лучом
Диапазон угла падения	0–55°	55°	25–53° (средний луч); 34–64° (передний и задний лучи)
Частота	1,4 ГГц	6,9; 10,7; 18,7; 23,8; 36,5 и 89 ГГц	5,3 ГГц
Поляризация	H и V (поляриметрический режим, по выбору)	H и V	VV
Пространственное разрешение	30–50 км	75 x 43 км при 6,9 ГГц	25/50 км
Суточный глобальный охват	~82 %	~90 %	~82 %
Поиск и извлечение			
Название модели	Л-МЕБ (L-MEB)	Модель поиска наземных параметров	ВАРП (WARP)
Форвардная модель	Модель переноса излучения	Модель переноса излучения	Полуэмпирическое обнаружение изменения
Сложность модели	Высокая	Средняя	Низкая
Инверсионный подход	Итерационная подгонка методом наименьших квадратов	Итерационная подгонка методом наименьших квадратов	Прямая инверсия
Сопутствующие поиски информации	Температура почвы, оптическая глубина растительности, шероховатость	Температура почвы, оптическая глубина растительности	Нет
Калибровка модели	Нет	Нет	На основе долгосрочного временного ряда
Необходимость дополнительных данных	Высокая	Средняя	Низкая
Оценки распространения ошибок	Не имеются	Имеются	Имеются

Ссылка на продукцию	*СМОС (SMOS)*	*АМСР-Е (AMSR-E)*	*АСКАТ (ASCAT)*
Продукция			
Количество целей	Объемное содержание влажности почвы	Объемное содержание влажности почвы	Степень насыщения
Единицы измерения	$м^3 \cdot м^{-3}$	$м^3 \cdot м^{-3}$	0–1 или %
Сетка	Фиксированная дискретная глобальная сетка ISEA4-9	Регулярная сетка	Геометрия полосы обзора
Распределение пикселей	15 км	0,25°	12,5 км
Ожидание данных	В течение нескольких дней после зондирования	Нерегулярные обновления	В течение 130 мин после зондирования

Примечания:
a Национальный центр космических исследований (Франция)
b Centro para el Desarrollo Tecnológico Industrial (Испания)

11.6.2 Дистанционное зондирование в тепловом инфракрасном диапазоне

Все тела с температурой выше абсолютного нуля испускают электромагнитную энергию в тепловой ИК-области. Посредством обнаружения тепловых свойств поверхности Земли можно получить влажность почвы на основе явных различий в тепловых свойствах почвы и воды (Idso et al., 1975; Van de Griend et al., 1985). Дистанционное зондирование в тепловом ИК-диапазоне используется во все большем количестве исследований для получения влажности почвы. Преимущество дистанционного зондирования в тепловом ИК-диапазоне состоит в том, что оно может предоставить информацию о влажности почвы с пространственным разрешением до нескольких метров. Далее, оно может дать информацию о влажности почвы через плотную растительность, которая является одним из ограничений микроволнового дистанционного зондирования. Недостатки дистанционного зондирования в тепловом ИК-диапазоне заключаются в невозможности измерения влажности почвы при наличии облачного покрова и в значительной подверженности воздействию атмосферных явлений. Поэтому в большинстве случае необходимы сложные механизмы для удаления помех. Дистанционное зондирование в тепловом ИК-диапазоне, касающееся влажности почвы, не является таким прямым, как микроволновое дистанционное зондирование, так как нет прямой связи между данными о температуре и влажности почвы. Тем не менее, существует несколько подходов для непрямого извлечения данных о влажности почвы, используя тепловые инфракрасные наблюдения геостационарного оперативного спутника для исследования окружающей среды (ГОЕС), усовершенствованного радиометра очень высокого разрешения (УРОВР), спектрорадиометра для получения изображений среднего разрешения, Лэндсат и др.

Первый подход называется подходом треугольника и основывается на эмпирической взаимосвязи между влажностью почвы, температурой почвы и фрагментарным растительным покровом. Эта взаимосвязь была продемонстрирована Price (1990) и привела к треугольному графику рассеяния приземных температур и дистанционно зондируемому нормализованному дифференциальному индексу растительного покрова. Подход треугольника был позднее использован в нескольких исследованиях для оценки влажности почвы, а именно Sandholt et al. (2002) и Carlson et al. (1994) среди прочих.

Во втором подходе используются различия тепловых свойств воды и почв. Вода отличается от многих других веществ своей относительно большой теплоемкостью и тепловой инерцией. Тепловая инерция определяется как сопротивление объекта его нагреванию на 1 K. Тепловая инерция воды относительно высокая, что означает высокое сопротивление изменениям температуры. Было показано, что характеристики температуры поверхности суши утром существенно зависят от почвенной влаги в почве,

так как вода нагревается более медленно. Одним из подходов, в котором используется эта характеристика, является расчет очевидной тепловой инерции (ОТИ), который может быть выполнен при измерении разницы между максимальной и минимальной температурами на протяжении одного дня. Он описывается как:

$$\mathrm{ATI} = (1 - A) / \Delta T \tag{11.10}$$

где A — альбедо пикселя в видимом диапазоне и ΔT — разница между минимальной и максимальной температурами. Во многих исследованиях потенциал ОТИ для описания влажности почвы и ее пространственной и временной изменчивости уже оценивался (например, Verstraeten et al., 2006; Van doninck et al., 2011).

Другой метод получения данных о влажности почвы, используя дистанционное зондирование в тепловой ИК-области, заключается в интегрировании данных в моделях земной поверхности. Влажность почвы контролирует потоки скрытого тепла посредством как испарения, так и транспирации, где условия влажной почвы приводят к повышению испарения и транспирации. В инверсионной модели обмена между атмосферой и сушей (Atmosphere-Land Exchange Inversion Model — ALEXI) используется взаимосвязь между испарением, транспирацией и влажностью почвы для получения данных о влажности почвы. Все основные компоненты энергетического баланса, включая поток скрытого тепла, оцениваются из радиационного баланса и параметров растительности, полученных через УРОВР и ГОЕС. Соответственно, влажность почвы можно получить из потоков скрытого тепла, используя функцию напряжения почвенной влаги (Anderson et al., 1997; Anderson et al., 2007; Hain et al., 2011). Взаимное сравнение данных о влажности почвы, полученных с помощью дистанционного зондирования в микроволновом диапазоне, и ALEXI, показало, что оба комплекта данных дополняют друг друга: ALEXI при оценке влажности почвы над плотной растительностью, а дистанционное зондирование в микроволновом диапазоне показывает более надежные результаты над низкой–умеренной растительностью (Hain et al., 2011).

СПРАВОЧНАЯ И ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ЛИТЕРАТУРА

Aggelides, S.M. and P.A. Londra, 1998: Comparison of empirical equations for temperature correction of gypsum sensors. *Agronomy Journal*, 90:441–443.

Albergel, C., P. de Rosnay, C. Gruhier, J. Muñoz-Sabater, S. Hasenauer, L. Isaksen, Y. Kerr and W. Wagner, 2012: Evaluation of remotely sensed and modelled soil moisture products using global ground-based in situ observations. *Remote Sensing of Environment*, 118:215–226.

Anderson, M.C., J.M. Norman, G.R. Diak, W.P. Kustas and J.R. Mecikalski, 1997: A two-source time-integrated model for estimating surface fluxes using thermal infrared remote sensing. *Remote Sensing of Environment*, 60:195–216.

Anderson, M.C., J.M. Norman, J.R. Mecikalski, J.A. Otkin and W.P. Kustas, 2007: A climatological study of evapotranspiration and moisture stress across the continental United States based on thermal remote sensing: 1. Model formulation. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 112(D10117).

Attema, E.P.W., 1991: The Active Microwave Instrument on-board the ERS-1 satellite. *Proceedings of the IEEE*, 79(6):791–799.

Attema, E., P. Bargellini, P. Edwards, G. Levrini, S. Lokas, L. Moeller, B. Rosich-Tell, P. Secchi, R. Torres, M. Davidson and P. Snoeij, 2007: Sentinel-1: The radar mission for GMES operational land and sea services. *ESA Bulletin*, 131:10–17.

Bircher, S., N. Skou, K.H. Jensen, J.P. Walker and L. Rasmussen, 2011: A soil moisture and temperature network for SMOS validation in Western Denmark. *Hydrol. Earth Syst. Sci. Discuss.*, 8:9961–10006.

Brocca, L., R. Morbidelli, F. Melone and T. Moramarco, 2007: Soil moisture spatial variability in experimental areas of central Italy. *Journal of Hydrology*, 333(2–4):356–373.

Brunini, O. and G.W. Thurtell, 1982: An improved thermocouple hygrometer for in situ measurements of soil water potential. *Soil Science Society of America Journal*, 46:900–904.

Campbell, D.J. and J.K. Henshall, 2001: Bulk density. In: *Soil and Environmental Analysis: Physical Methods* (K.A. Smith and C.E. Mullins, eds.), Marcel Dekker, New York, pp. 315–348.

Carlson, T.N., R.R. Gillies and E.M. Perry, 1994: A method to make use of thermal infrared temperature and NDVI measurements to infer surface soil water content and fractional vegetation cover. *Remote Sensing Reviews*, 9:161–173.

Deardorff, J.W., 1978: Efficient prediction of ground surface temperature and moisture, with inclusion of a layer of vegetation. *Journal of Geophysical Research*, 83:1889–1904.

De Jeu, R.A.M., 2003: Retrieval of land surface parameters using passive microwave remote sensing. PhD Thesis, VU Amsterdam.

Dirksen, C., 1999: *Soil Physics Measurements*. Catena Verlag, Reiskirchen, Germany.

Dirksen, C. and S. Dasberg, 1993: Improved calibration of time domain reflectometry soil water content measurements. *Soil Science Society of America Journal*, 57:660–667.

Dorigo, W.A., K. Scipal, R.M. Parinussa, Y.Y. Liu, W. Wagner, R.A.M. de Jeu and V. Naeimi, 2010: Error characterisation of global active and passive microwave soil moisture datasets. *Hydrology and Earth System Sciences*, 14:2605–2616.

Dorigo, W.A., W. Wagner, R. Hohensinn, S. Hahn, C. Paulik, A. Xaver, A. Gruber, M. Drusch, S. Mecklenburg, P. van Oevelen, A. Robock and T. Jackson, 2011: The International Soil Moisture Network: a data hosting facility for global in situ soil moisture measurements. *Hydrology and Earth System Sciences*, 15:1675–1698.

Doubkova, M., A. Bartsch, C. Pathe, D. Sabel and W. Wagner, 2009: The medium resolution soil moisture dataset: Overview of the SHARE ESA DUE TIGER project. *2009 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium: Proceedings*, I:116–119.

Draper, C., R. Reichle, R. de Jeu, V. Naeimi, R. Parinussa and W. Wagner, 2013: Estimating root mean square errors in remotely sensed soil moisture over continental scale domains. *Remote Sensing of Environment*, 137:288–298.

Drungil, C.E.C., K. Abt and T.J. Gish, 1989: Soil moisture determination in gravelly soils with time domain reflectometry. *Transactions of the American Society of Agricultural Engineering*, 32:177–180.

Famiglietti, J.S., D. Ryu, A.A. Berg, M. Rodell and T.J. Jackson, 2008: Field observations of soil moisture variability across scales. *Water Resources Research*, 44(1).

Figa-Saldaña, J., J.J.W. Wilson, E. Attema, R. Gelsthorpe, M.R. Drinkwater and A. Stoffelen, 2002: The advanced scatterometer (ASCAT) on the meteorological operational (MetOp) platform: A follow on for European wind scatterometers. *Canadian Journal of Remote Sensing*, 28(3):404–412.

Friesen, J., C. Rodgers, P.G. Oguntunde, J.M.H. Hendrickx and N. Van de Giesen, 2008: Hydrotope-based protocol to determine average soil moisture over large areas for satellite calibration and validation – with results from an observation campaign in the Volta Basin, West Africa. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 46(7):1995–2004.

Gardner, C.M.K., D.A. Robinson, K. Blyth and J.D. Cooper, 2001: Soil water content. In: *Soil and Environmental Analysis: Physical Methods* (K.A. Smith and C.E. Mullins, eds.), Marcel Dekker, New York, pp. 1–64.

Gardner, W.H. and C. Calissendorff, 1967: Gamma-ray and neutron attenuation measurement of soil bulk density and water content. *Proceedings of the Symposium on the Use of Isotope and Radiation Techniques in Soil Physics and Irrigation Studies* (Istanbul, 12–16 June 1967). International Atomic Energy Agency, Vienna, pp. 101–112.

Gee, G.W. and M.E. Dodson, 1981: Soil water content by microwave drying: A routine procedure. *Soil Science Society of America Journal*, 45:1234–1237.

Greacen, E.L., 1981: *Soil Water Assessment by the Neutron Method*. CSIRO, Australia.

Hain, C.R., W.T. Crow, J.R. Mecikalski, M.C. Anderson and T. Holmes, 2011: An intercomparison of available soil moisture estimates from thermal infrared and passive microwave remote sensing and land surface modeling. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 116(D15107).

Hallikainen, M., F. Ulaby, M. Dobson, M. El-Rayes and L.K. Wu, 1985: Microwave dielectric behavior of wet soil – Part 1: Empirical models and experimental observations. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 23:25–34.

Hasenauer, S., W. Wagner, K. Scipal, V. Naeimi and Z. Bartalis, 2006: Implementation of near real-time soil moisture products in the SAF network based on MetOp ASCAT data. *EUMETSAT Meteorological Satellite Conference*, 12–16 June 2006, Helsinki.

Hornacek, M., W. Wagner, D. Sabel, H.-L. Truong, P. Snoeij, T. Hahmann, E. Diedrich and M. Doubkova, 2012: Potential for high resolution systematic global surface soil moisture retrieval via change detection using Sentinel-1. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observation and Remote Sensing*, 5(4):1303–1311.

Idso, S.B., R.D. Jackson, R.J. Reginato and T.J. Schmugge, 1975: The utility of surface temperature measurements for the remote sensing of sun for soil water status. *Journal of Geophysical Research*, 80:3044–3049.

Jackson, T.J., 1990: Laboratory evaluation of a field-portable dielectric/soil moisture probe. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 28:241–245.

Jackson, T.J. and T.J. Schmugge, 1989: Passive microwave remote sensing system for soil moisture: Some supporting research. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 27:225–235.

Jones, L.A. and J.S. Kimball, 2010: *Daily Global Land Surface Parameters Derived from AMSR-E*. Boulder, Colorado: NASA National Snow and Ice Data Center Distributed Active Archive Center (available from http://nsidc.org/data/nsidc-0451.html).

Jones, L.A., J.S. Kimball, E. Podest, K.C. McDonald, S.K. Chan and E.G. Njoku, 2009: A method for deriving land surface moisture, vegetation optical depth, and open water fraction from AMSR-E. *2009 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium: Proceedings*, III:916–919.

Kerr, Y.H., P. Waldteufel, P. Richaume, J.P. Wigneron, P. Ferrazzoli, A. Mahmoodi, A. Al Bitar, F. Cabot, C. Gruhier, S.E. Juglea, D. Leroux, A. Mialon and S. Delwart, 2012: The SMOS soil moisture retrieval algorithm. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 50(5):1384–1403.

Klute, A. (ed.), 1986: *Methods of Soil Analysis, Part 1: Physical and Mineralogical Methods*. American Society of Agronomy, Madison, Wisconsin, United States.

Knight, J.H., 1992: Sensitivity of time domain reflectometry measurements to lateral variations in soil water content. *Water Resources Research*, 28:2345–2352.

Liu, Y.Y., W.A. Dorigo, R.M. Parinussa, R.A.M. De Jeu, W. Wagner, M.F. McCabe, J.P. Evans and A.I.J.M van Dijk, 2012: Trend-preserving blending of passive and active microwave soil moisture retrievals. *Remote Sensing of Environment*, 123:280–297.

Liu, Y.Y., R.M. Parinussa, W.A. Dorigo, R.A.M. De Jeu, W. Wagner, A.I.J.M van Dijk, M.F. McCabe and J.P. Evans, 2011: Developing an improved soil moisture dataset by blending passive and active microwave satellite-based retrievals. *Hydrology and Earth System Sciences*, 15:425–436.

Magagi, R.D. and Y.H. Kerr, 1997: Retrieval of soil moisture and vegetation characteristics by use of ERS-1 wind scatterometer over arid and semi-arid areas. *Journal of Hydrology*, 188–189:361–384.

Marthaler, H.P., W. Vogelsanger, F. Richard and J.P. Wierenga, 1983: A pressure transducer for field tensiometers. *Soil Science Society of America Journal*, 47:624–627.

Matgen, P., S. Heitz, S. Hasenauer, C. Hissler, L. Brocca, L. Hoffmann, W. Wagner and H.H.G. Savenije, 2012: On the potential of MetOp ASCAT-derived soil wetness indices as a new aperture for hydrological monitoring and prediction: a field evaluation over Luxembourg. *Hydrological Processes*, 26(15):2346–2359.

Merrill, S.D. and S.L. Rawlins, 1972: Field measurement of soil water potential with thermocouple psychrometers. *Soil Science*, 113:102–109.

Mullins, C.E., 2001: Matric potential. In: *Soil and Environmental Analysis: Physical Methods* (K.A. Smith and C.E. Mullins, eds.), Marcel Dekker, New York, pp. 65–93.

Naeimi, V., K. Scipal, Z. Bartalis, S. Hasenauer and W. Wagner, 2009: An improved soil moisture retrieval algorithm for ERS and MetOp scatterometer observations. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 47(7):1999–2013.

Njoku, E.G., 2004: *AMSR-E/Aqua L2B Surface Soil Moisture, Ancillary Parms, & QC EASE-Grids, Version 2*. Boulder, Colorado: NASA National Snow and Ice Data Center Distributed Active Archive Center (available from http://nsidc.org/data/ae_land.html).

Njoku, E.G., T.J. Jackson, V. Lakshmi, T.K. Chan and S.V. Nghiem, 2003: Soil moisture retrieval from AMSR-E. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 41(2):215–229.

Owe, M., R. de Jeu and T. Holmes, 2008: Multisensor historical climatology of satellite-derived global land surface moisture. *Journal of Geophysical Research*, 113(F01002).

Owe, M., R. de Jeu and J. Walker, 2001: A methodology for surface soil moisture and vegetation optical depth retrieval using the microwave polarization difference index. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 39(8):1643–1654.

Pathe, C., W. Wagner, D. Sabel, M. Doubkova and J. B. Basara, 2009: Using ENVISAT ASAR global mode data for surface soil moisture retrieval over Oklahoma, USA. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 47(2):468–480.

Perrier, E.R. and A.W. Marsh, 1958: Performance characteristics of various electrical resistance units and gypsum materials. *Soil Science*, 86:140–147.

Price, J.C., 1990: Using spatial context in satellite data to infer regional scale evapotranspiration. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 28(5):940–948.

Pulliainen, J.T., T. Manninen and M.T. Hallikainen, 1998: Application of ERS-1 wind scatterometer data to soil frost and soil moisture monitoring in boreal forest zone. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 36(3):849–863.

Rawlins, S.L. and G.S. Campbell, 1986: Water potential: Thermocouple psychrometry. In: *Methods of Soil Analysis – Part 1: Physical and Mineralogical Methods* (A. Klute, ed.), American Society of Agronomy, Madison, Wisconsin, United States, pp. 597–618.

Sandholt, I., K. Rasmussen and J. Andersen, 2002: A simple interpretation of the surface temperature/ vegetation index space for assessment of surface moisture status. *Remote Sensing of Environment*, 79(2–3):213–224.

Schmugge, T.J., 1976: *Remote Sensing of Soil Moisture*. Doc. X-913-76-118, NASA Goddard Space Flight Center, Greenbelt, Maryland.

Schmugge, T.J., T.J. Jackson and H.L. McKim, 1980: Survey of methods for soil moisture determination. *Water Resources Research*, 16:961–979.

Seneviratne, S.I., T. Corti, E.L. Davin, M. Hirschi, E.B. Jaeger, I. Lehner, B. Orlowsky and A.J. Teuling, 2010: Investigating soil moisture–climate interactions in a changing climate: A review. *Earth-Science Reviews*, 99(3–4):125–161.

Su, C.-H., D. Ryu, R.I. Young, A.W. Western and W. Wagner, 2013: Inter-comparison of microwave satellite soil moisture retrievals over the Murrumbidgee Basin, southeast Australia. *Remote Sensing of Environment*, 134:1–11.

Tanner, C.B. and R.J. Hanks, 1952: Moisture hysteresis in gypsum moisture blocks. *Soil Science Society of America Proceedings*, 16:48–51.

Topp, G.C., J.L. Davis and A.P. Annan, 1980: Electromagnetic determination of soil water content: Measurement in coaxial transmission lines. *Water Resources Research*, 16:574–582.

Ulaby, F.T., R.K. Moore and A.K. Fung, 1986: *Microwave Remote Sensing: Active and Passive*, Volume III. Artech House, Norwood, Massachusetts.

Vachaud, G., A. Passerat De Silans, P. Balabanis and M. Vauclin, 1985: Temporal stability of spatially measured soil water probability density function. *Soil Science Society of America Journal*, 49(4):822–828.

Van de Griend, A.A., P.J. Camillo and R.J. Gurney, 1985: Discrimination of soil physical parameters, thermal inertia and soil moisture from diurnal surface temperature fluctuations. *Water Resources Research*, 21:997–1009.

Van doninck, J., J. Peters, B. De Baets, E. De Clercq, E. Ducheyne and N. Verhoest, 2011: The potential of multitemporal Aqua and Terra MODIS apparent thermal inertia as a soil moisture indicator. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 13(6):934–941.

Verstraeten, W.W., F. Veroustraete, C.J. van der Sande, I. Grootaers and J. Feyen, 2006: Soil moisture retrieval using thermal inertia, determined with visible and thermal spaceborne data, validated for European forests. *Remote Sensing of Environment*, 101(3):299–314.

Visvalingam, M. and J.D. Tandy, 1972: The neutron method for measuring soil moisture content: A review. *European Journal of Soil Science*, 23:499–511.

Wagner, W., G. Lemoine and H. Rott, 1999: A method for estimating soil moisture from ERS scatterometer and soil data. *Remote Sensing of Environment*, 70(2):191–207.

Wagner, W., C. Pathe, M. Doubkova, D. Sabel, A. Bartsch, S. Hasenauer, G. Blöschl, K. Scipal, J. Martínez-Fernández and A. Löw, 2008: Temporal stability of soil moisture and radar backscatter observed by the Advanced Synthetic Aperture Radar (ASAR). *Sensors*, 8(2):1174–1197.

Wang, J.R. and T.J. Schmugge, 1980: An empirical model for the complex dielectric permittivity of soils as a function of water content. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, GE-18(4): 288–295.

Wellings, S.R., J.P. Bell and R.J. Raynor, 1985: *The Use of Gypsum Resistance Blocks for Measuring Soil Water Potential in the Field*. Report No. 92, Institute of Hydrology, Wallingford, United Kingdom.

World Meteorological Organization, 1968: *Practical Soil Moisture Problems in Agriculture*. Technical Note No. 97 (WMO-No. 235, TP.128). Geneva.

———, 1989: *Land Management in Arid and Semi-arid Areas*. Technical Note No. 186 (WMO-No. 662). Geneva.

———, 2001: *Lecture Notes for Training Agricultural Meteorological Personnel* (J. Wieringa and J. Lomas) (WMO-No. 551). Geneva.

ГЛАВА 12. АЭРОЛОГИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ ДАВЛЕНИЯ, ТЕМПЕРАТУРЫ И ВЛАЖНОСТИ

12.1 ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

12.1.1 Определения

Приведенные ниже определения, основанные на публикациях ВМО (1992; 2015*a*) относятся к аэрологическим измерениям с использованием радиозонда.

Радиозонд. Прибор, поднимаемый на газонаполненной оболочке в атмосферу и снабженный устройствами для измерения одного или нескольких метеорологических параметров (такие как давление, температура, влажность), а также радиопередатчиком для передачи информации о результатах измерений на станцию наблюдения.

Радиозондовое наблюдение. Наблюдение с помощью радиозонда за метеорологическими параметрами в верхних слоях атмосферы, как правило, за атмосферным давлением, температурой, влажностью и во многих случаях за горизонтальным ветром.

Примечание: радиозонд может прикрепляться к газонаполненной оболочке (либо к другому медленно движущемуся беспилотному летательному аппарату), или конструкция может быть приспособлена к тому, чтобы сбрасываться (например, сбрасываемый зонд) с воздушного судна или ракеты.

Станция радиозондирования. Станция, на которой с помощью электронных средств проводятся наблюдения за атмосферным давлением, температурой, влажностью и, как правило, горизонтальным ветром на высотах.

Аэрологическое наблюдение. Метеорологическое наблюдение, производимое в свободной атмосфере прямыми или косвенными методами измерения.

Аэрологическая станция. Аэрологическая синоптическая станция, станция *температурно-ветрового радиозондирования*: станция на поверхности земли, с которой проводятся аэрологические наблюдения.

Зондирование. Определение одного или нескольких метеорологических параметров на высотах с помощью приборов, поднимаемых газонаполненной оболочкой, самолетом, змеем, планером, ракетой и т. п.

В настоящей главе рассматриваются радиозондовые системы. Измерения, осуществляемые с использованием специальных платформ, специализированного оборудования и самолетов, или косвенным образом с применением средств дистанционного зондирования, таких как микроволновые радиометры и рамановские лидары для измерения содержания водяного пара в пограничном слое и тропосфере, рассматриваются в других главах тома III настоящего Руководства. Радиозондовые системы обычно используются для измерения давления, температуры и относительной влажности. В большинстве оперативных пунктов радиозондовые системы используются также для определения ветра на высотах (см. настоящий том, глава 13). Кроме того, на некоторых радиозондах установлены системы датчиков для определения таких характеристик атмосферы, как содержание озона или радиоактивность. В настоящей главе эти дополнительные измерения подробно не рассматриваются.

12.1.2 Единицы, используемые при аэрологических измерениях

Единицами измерения метеорологических параметров при радиозондовых наблюдениях являются гектопаскаль для давления, градус Цельсия для температуры и процент для относительной влажности. Данные об относительной влажности сообщаются по отношению к давлению насыщенного пара над поверхностью воды даже при температурах ниже 0 °C.

Единицей геопотенциальной высоты, используемой при аэрологических наблюдениях, является стандартный геопотенциальный метр (гп. м), определяемый как 0,980 665 динамического метра. Отношение между геопотенциальной высотой и геометрической высотой представлено в 12.3.6.2. Различия в нижней тропосфере не столь велики, однако с увеличением высоты они увеличиваются.

При расчетах данных, полученных с помощью радиозондов, следует использовать значения физических функций и постоянных, принятые ВМО (2011*a*).

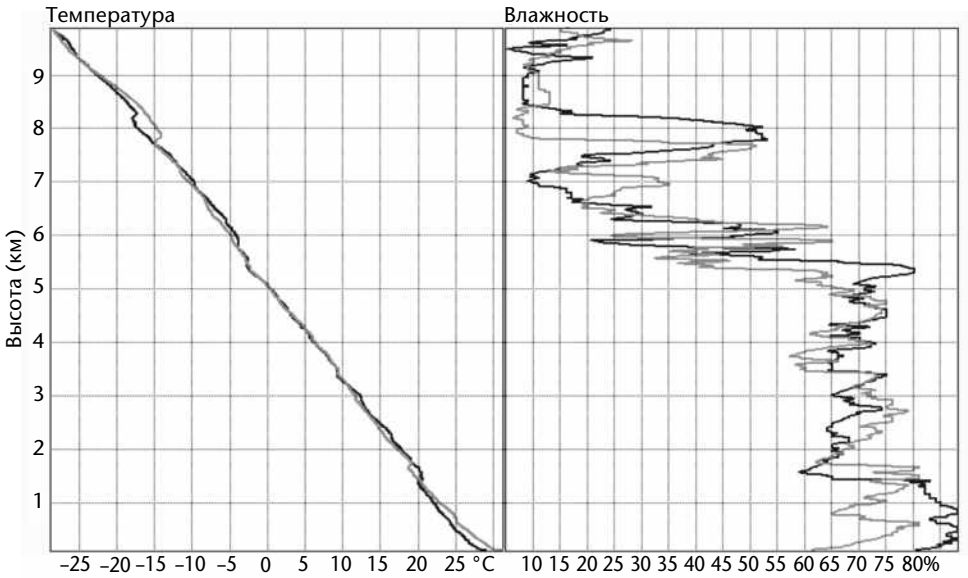
12.1.3 Метеорологические требования

12.1.3.1 *Радиозондовые данные для метеорологического обеспечения*

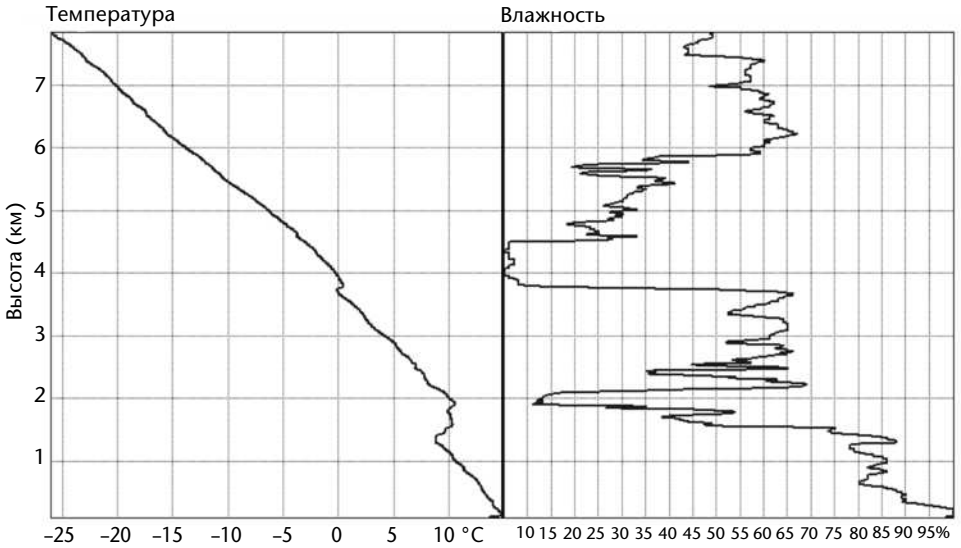
Аэрологические измерения температуры, относительной влажности и ветра — три вида основных измерений, данные которых используются при инициализации анализов моделей численных прогнозов погоды (ЧПП) для оперативного прогнозирования погоды. Радиозонды обеспечивают большую часть измерений температуры и относительной влажности в точках над сушей, в то время как радиозонды, запускаемые с отдаленных островов или морских судов, могут практически обеспечивать очень ограниченный, но важный охват такими данными над океанами. Измерения температуры с разрешением по вертикали, аналогичным разрешению при радиозондовых измерениях, могут проводиться с самолета либо во время набора высоты и снижения, либо при полете на крейсерских эшелонах. Самолетные наблюдения во время набора высоты и снижения используются для дополнения радиозондовых наблюдений над сушей и в некоторых случаях могут использоваться вместо радиозондов в отдельно взятой местности. Самолетные наблюдения на крейсерских эшелонах обеспечивают измерения как над сушей, так и над океанами. Наблюдения со спутников, находящихся в надире, за распределением температуры и водяного пара обеспечивают более низкое вертикальное разрешение, чем измерения с помощью радиозондов или воздушных судов. Спутниковые наблюдения особенно важны для полей анализа ЧПП над океанами и в других районах земного шара, где данных радиозондовых и самолетных наблюдений недостаточно или где они отсутствуют совсем.

Точные измерения вертикальной структуры полей температуры и водяного пара в тропосфере чрезвычайно важны для всех видов прогнозирования, особенно для регионального и местного прогнозирования, а также прогноза текущей погоды. Профили температуры атмосферы характеризуются резкими изменениями по вертикали, и изменения относительной влажности, связанные с резким изменением температуры, обычно бывают достаточно резко выраженными (см. рисунок 12.1). Измерения позволяют построить типичный вертикальный разрез слоев облаков или тумана. Такая вертикальная структура температуры и водяного пара обусловливает устойчивость атмосферы и, следовательно, количество и формы облаков, которые должны прогнозироваться. Радиозондовые измерения вертикальной структуры могут, как правило, производиться с точностью, достаточной для удовлетворения большинства потребностей пользователей.

Данные измерений вертикальной структуры полей температуры и относительной влажности с высоким разрешением имеют большое значение для исследований загрязнения окружающей среды (например, для определения толщины пограничного слоя атмосферы). Такое высокое разрешение при измерениях вертикальной структуры необходимо также для вычисления влияния рефракции атмосферы на распространение электромагнитного излучения (ЭМИ) или звуковых волн. Разрешение по времени должно



a) пример профилей дневной температуры и влажности, полученных в ходе взаимного сравнения высококачественных систем радиозондирования ВМО в Янцзяне, Китай (22° с. ш.). Зондирование, представленное серым цветом, было осуществлено через 8 часов после зондирования, которое изображено черным цветом. Относительно небольшие сдвиги в скорости изменения температуры по вертикали были связаны с быстрым падением относительной влажности (в районе 0,7, 1,6, 3,5, 5,5 и 8 км).



b) пример температуры и относительной влажности летом в 0600 ВСВ в Соединенном Королевстве (50° с. ш.), демонстрирующий неглубокий слой 100-процентной относительной влажности в тумане вблизи поверхности земли и очень резкое падение относительной влажности в слоях температурной инверсии между 1,5 и 2 км и на высоте 3,8 км.

Рисунок 12.1. Примеры профилей температуры и относительной влажности в нижней и средней тропосфере.

быть как можно больше, например, 1 с, но не более 5 с. Помимо этого, для получения корректного описания атмосферы требуется информация о времени и положении радиозонда на каждом уровне.

Для гражданской авиации, артиллерии и других баллистических областей применения, таких как запуски космических аппаратов, предъявляются эксплуатационные требования к детализированным измерениям плотности воздуха при заданных значениях давления (рассчитанных на основе данных радиозондовых измерений температуры и относительной влажности).

Радиозондовые наблюдения также важны для исследований изменения климата в верхних слоях атмосферы. При этом необходимо надлежащим образом вести регистрацию систем, которые используются для измерений, включая информацию о версии программного обеспечения и корректировках и о расходных материалах, а также о методах наблюдений (например, длине подвески радиозонда), применяемых наряду с системами. Климатологи предпочли бы, чтобы необработанные данные архивировались дополнительно к обработанным данным и были доступны для последующих климатологических исследований. Исключительно важно регистрировать любые изменения в методах наблюдения, внедряемых с течением времени. В этом контексте было сочтено исключительно важным установить все те изменения в радиозондовых приборах и практических процедурах, которые имели место с момента начала использования радиозондов на регулярной основе (см., например, WMO, 1993*a*). Для исследований изменения климата, основанных на радиозондовых измерениях, требуется чрезвычайно высокая стабильность систематических погрешностей в данных радиозондовых измерений. Однако погрешности в более ранних радиозондовых измерениях некоторых метеорологических параметров, в частности относительной влажности и давления, были слишком высоки и сложны для того, чтобы произвести осмысленные корректировки на всех уровнях, которые требуются для исследований изменений климата. В связи с этим понадобились усовершенствования и изменения в конструкциях радиозондов. Кроме того, учитывая ограниченность средств, направляемых на метеорологические наблюдения, и желание продолжать широкомасштабное использование радиозондов, необходимо, чтобы расходные материалы для радиозондов оставались низкозатратными.

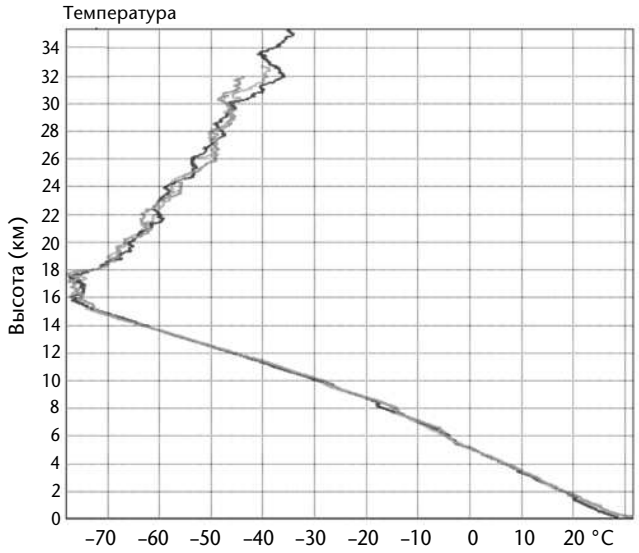
При внедрении новых конструкций радиозондов, чрезвычайно важно, чтобы было проведено достаточное тестирование характеристик нового радиозонда по сравнению со старым, чтобы временные ряды наблюдений на станции могли быть согласованы на основе данных сравнения. Такая гармонизация не должна приводить к ухудшению качества измерений, полученных с помощью усовершенствованного радиозонда, с тем чтобы обеспечить их сопоставимость с измерениями более низкого качества радиозондами более ранней конструкции. Следует также признать, что в некоторых случаях погрешности в более ранних измерениях были слишком велики для использования в климатологических исследованиях (это особенно верно в отношении недавних измерений относительной влажности, см. 12.5.7).

Пользователям следует пойти на определенный компромисс в отношении точности систем измерений с учетом того, что изготовители радиозондов производят системы, которые должны работать в чрезвычайно широком спектре метеорологических условий:

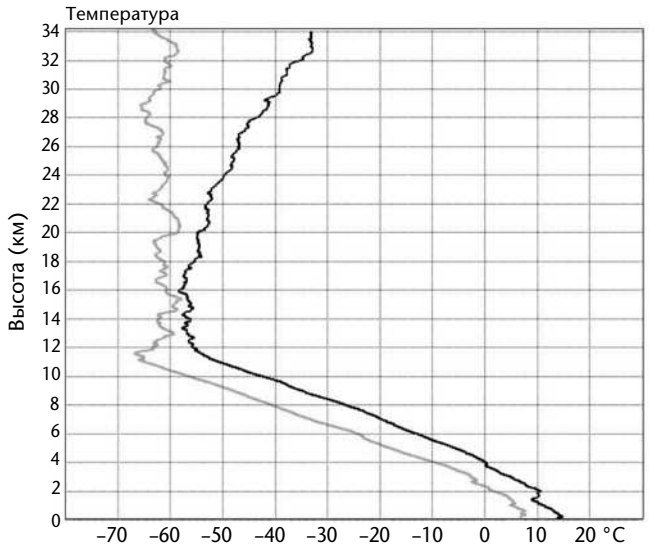
– давление от 1 050 до 5 гПа
– температура от 50 °C до –95 °C
– относительная влажность от 100 % до 1 %
– 30 гПа на поверхности до 10^{-4} гПа для давления водного пара в тропопаузе для тропиков

Системы также должны быть способны поддерживать непрерывную и надежную работу при сильном дожде, в непосредственной близости от грозы и в тяжелых условиях обледенения.

Самые низкие температуры чаще всего встречаются вблизи тропической и субтропической тропопаузы, хотя зимой очень низкие температуры могут также наблюдаться на более высоких уровнях в стратосферном полярном вихре. На рисунке 12.2 показаны примеры профилей для субтропиков: к примеру, a) в Янцзяне, Китай (22° с. ш.) летом и b) на 50° с. ш. летом и зимой в Соединенном Королевстве. Более низкие температуры вблизи тропопаузы в тропиках представляют основную трудность для оперативных измерений с использованием датчиков относительной влажности, поскольку на сегодняшний день лишь немногие из них быстро реагируют на температуру ниже –70 °C (см. 12.5.7.6 и 12.5.7.7). Таким образом радиозонды, которые успешно функционируют по всей тропопаузе на средних широтах, по-видимому, обеспечивают менее надежные измерения относительной влажности в верхней тропосфере в тропиках.



a) июль, Янцзян, Китай (3 подъема за 8 ч)



b) Соединенное Королевство, лето (черный профиль) и зима (серый профиль)

Рисунок 12.2. Примеры отдельных полных профилей температуры, полученные при помощи шаров-зондов большого размера, пригодных для климатических наблюдений.

Радиозондовое измерение напоминает моментальную выборку отдельного слоя атмосферы (радиозонд обычно поднимается на 300 м в минуту). Когда краткосрочные флуктуации температуры атмосферы от гравитационных волн и турбулентности невелики, радиозондовое измерение может отображать ситуацию над местностью достаточно эффективно на протяжении многих часов. С другой стороны, когда атмосфера очень изменчива (например, конвективный пограничный слой атмосферы), моментальная выборка может быть действительна не более минуты и может не соответствовать реальному среднему значению над местностью даже в течение часа. На рисунке 12.2 (a) полученные радиозондом температуры в тропосфере были более воспроизводимы со временем, чем в стратосфере, вследствие существенного влияния гравитационных волн в стратосфере. Такие более существенные расхождения на высотах не были результатом погрешности прибора. Аналогично, колебания температуры по вертикали в стратосфере, приведенные на рисунке 12.2 (b), не являются результатом погрешности прибора, поскольку во время испытательных полетов одна и та же структура была получена измерениями при помощи двух радиозондов различного типа.

12.1.3.2 *Взаимосвязь между спутниковыми и радиозондовыми аэрологическими измерениями*

Наблюдения со спутниковых систем, находящихся в надире (в самой нижней точке горизонта), не дают представления о вертикальной структуре с той же точностью или степенью доверия, как системы, установленные на радиозондах или воздушных судах. Современные спутниковые системы зондирования температуры и водяного пара обеспечивают наблюдение либо за восходящими потоками излучения в инфракрасной области от эмиссии двуокиси углерода или водяного пара, либо, в качестве альтернативы, — эмиссии кислорода или водяного пара в микроволновом диапазоне (см. том IV, глава 3 настоящего Руководства). Зондирование как в инфракрасной области, так и в микроволновом диапазоне имеет исключительно важное значение для текущего оперативного ЧПП. Излучение, за которым ведется наблюдение со спутника, представляет собой интегрированное излучение в атмосфере на разных уровнях. Диапазон уровней определяется распределением излучающих газов по вертикали и поглощением со стороны атмосферы на частотах спутникового канала. Данные о большинстве излучений, полученные по одному спутниковому каналу измерения температуры, приблизительно соответствуют средней температуре слоя, толщина которого составляет, по меньшей мере, 10 км. Однако современным интерферометрам с преобразованием Фурье, функционирующим в инфракрасной области, удалось достичь гораздо более высокого разрешения по вертикали, используя информацию от гораздо большего числа каналов с несколько отличающимися характеристиками абсорбции. Распределение по высоте (весовая функция) наблюдаемого излучения в канале для измерения температуры изменяется в определенной степени в зависимости от географического местоположения. Это происходит потому, что способность атмосферы переносить излучение незначительно зависит от температуры. Концентрация излучающих газов может слегка колебаться в зависимости от географического местоположения и наличия облачности; на обмен радиационным теплом могут также оказывать влияние аэрозоли и вулканическая пыль. Таким образом, основные спутниковые наблюдения за температурой путем зондирования обеспечивают хорошее горизонтальное разрешение и пространственный охват по всему земному шару для сравнительно толстых слоев по вертикали, однако точное распределение наблюдаемого атмосферного излучения по вертикали в какой-либо заданной точке определить труднее.

Большая часть данных об излучении, получаемых при наблюдениях в надире по спутниковым каналам для измерения содержания водяного пара в тропосфере, относится к слоям атмосферы толщиной примерно от 4 до 5 км. Давление в атмосферных слоях, за излучением которых наблюдают при помощи канала для измерения водяного пара, колеблется в зависимости от географического местоположения в гораздо большей степени, чем в случае каналов для измерения температуры. Это связано с тем, что толщина слоя и давление в середине слоя, за которым ведется наблюдение, в значительной степени зависят от распределения водяного пара по вертикали. Например, слои, за которыми ведется наблюдение с помощью определенного канала для измерения водяного пара, будут располагаться ближе к земной поверхности в случае, когда верхняя тропосфера очень сухая. Показатели излучения, за которыми ведется наблюдение при помощи канала для измерения водяного пара, зависят от температуры водяного пара. Поэтому рассчитать распределение водяного пара по вертикали можно лишь в том случае, если имеются приемлемые данные о вертикальной структуре поля температуры.

Спутниковые системы лимбовых наблюдений могут обеспечивать измерения структуры атмосферы с более высоким вертикальным разрешением по сравнению со спутниковыми системами надирных наблюдений; примером системы такого типа является измерение температуры и водяного пара, рассчитанных для случаев исчезновения радиосигнала глобальной системы определения местоположения (ГСОМ). По этой методике вертикальная структура измеряется вдоль горизонтали по крайней мере на удаленность 200 км (Kursinski et al., 1997). Эта методика широко используется в настоящее время, поскольку позволяет проводить более совершенные измерения вертикальной структуры температуры, особенно в районе тропопаузы, где радиозонды не используются.

Таким образом, методы, разработанные для использования информации, полученной при помощи зондирования со спутников, в моделях ЧПП, включают в себя информацию, полученную с помощью других систем наблюдения, главным образом радиозондов и воздушных судов, или непосредственно из полей модели ЧПП. Радиозондовая информация может содержаться в первоначальной оценке вертикальной структуры в какой-либо заданной географической точке; эта оценка, в свою очередь, рассчитывается на основе полей прогностической модели или берется из справочников, в которых данные о возможной вертикальной структуре основаны на типичных радиозондовых измерениях в данной географической точке или в зависимости от типа воздушной массы. Кроме того, данные радиозондовых измерений используются в качестве опорных данных для взаимного сравнения данных наблюдений с различных спутников или данных наблюдений под различными углами зрения с определенного спутникового канала. При этом можно провести сравнения напрямую с данными радиозондовых наблюдений, либо косвенным путем, учитывая влияние радиозондовых измерений на вертикальную структуру полей численных прогнозов погоды.

Следовательно, радиозондовые и спутниковые системы зондирования, наряду с воздушными судами, являются взаимодополняющими системами наблюдения и обеспечивают при совместном использовании наиболее надежную глобальную систему наблюдения. Наблюдения при помощи радиозондов и с воздушных судов улучшают ЧПП даже в условиях, когда доступны гораздо большие объемы данных спутниковых измерений.

12.1.3.3 *Максимальная высота радиозондовых наблюдений*

Наблюдения при помощи радиозондов проводятся на регулярной основе для измерений вплоть до высоты около 35 км (см., например, рисунок 12.2). Однако большая часть наблюдений по всему земному шару проводится до высоты не более 25 км, что связано с более высокой стоимостью оболочек и газа, необходимых для подъема оборудования на высоты с очень низким давлением. Погрешности измерения температуры имеют тенденцию к увеличению с высотой, однако скорость такого увеличения в современных радиозондах не столь высока и измерения, дающие полезные результаты, можно проводить до высоты 35 км, особенно ночью.

При планировании радиозондовых измерений в целях мониторинга климата необходимо обеспечить, чтобы было закуплено достаточное количество оболочек большого размера для проведения измерений до высоты 30 км на регулярной основе в каждом регионе.

Проблемы, связанные с искажением показаний датчиков во время полета и очень большими величинами постоянных времени (инерции) датчиков при низкой температуре и низком давлении, на сегодняшний день ограничивают практическую пригодность качественных радиозондовых измерений относительной влажности тропосферой.

12.1.4 Требования к точности

В настоящем разделе в обобщенном виде представлены требования к погрешностям (которые всегда записываются в терминах $k = 2$, см. настоящий том, глава 1) метеорологических параметров, измеряемых с помощью радиозондов, и проводится их сравнение с типичными характеристиками эксплуатируемых радиозондов. Более подробное рассмотрение точности и источников ошибок содержится в нижеприведенных разделах, посвященных отдельным метеорологическим параметрам (см. 12.3.5, 12.3.7, 12.4.7 и 12.5.7 по давлению, высоте, температуре и относительной влажности, соответственно). Определение погрешности, систематического отклонения и другие определения содержатся в настоящем томе, глава 1.

Оценки достижимой оптимальной погрешности для радиозондовых наблюдений по состоянию на 2012 г. представлены в приложении 12.A. Это приложение было подготовлено после проведения взаимного сравнения высококачественных систем

радиозондирования ВМО в Янцзяне, Китай (WMO, 2011*b*). В нем описываются оптимальная точность, которая может на сегодняшний день быть достигнута в оперативных радиозондах.

Обобщенные требования к предельным значениям точности и вертикального разрешения радиозондовых наблюдений из документов ВМО, приведены в приложении 12.B. В приведенные таблицы включена информация из базы данных, содержащей требования к наблюдениям ВМО (OSCAR/требования; см. WMO, 2014), нормативные требования к наблюдениям, опубликованные ВМО (WMO, 2009) для Опорной аэрологической сети (ГРУАН) Глобальной системы наблюдений за климатом (ГСНК), и некоторая информация по данным исследований изменчивости атмосферы, доступная в WMO (1970).

База данных с требованиями к наблюдениям ВМО содержит три максимально допустимых значений точности измерений для большинства метеорологических параметров:

a) целевое значение: требование оптимальной точности;

b) пороговое значение: минимальная точность, которая должна быть обеспечена для того, чтобы данные были полезными;

c) перспективное значение: промежуточный уровень между пороговым и целевым значением, достижение которого приведет к значительному улучшению в целевом применении.

Таблицы 12.B.1, 12.B.2 и 12.B.3 в приложении 12.B основаны, главным образом, на требованиях прикладной области ЧПП с высоким разрешением, тем не менее информация о целевых значениях точности измерений, полученных из работ по атмосферной изменчивости, также представлена в тех случаях, когда целевые значения отличаются от установленных в базе данных с требованиями к наблюдениям ВМО. Требования, связанные с изучением климата, основаны на требованиях ГРУАН и тех требованиях, которые изложены в разделе, описывающем базу данных с требованиями к наблюдениям для деятельности Группы экспертов ГСНК по атмосферным наблюдениям в интересах изучения климата или по стратосферным процессам и их роли в климате. В этом случае также, когда имеются существенные различия в целевых значениях точности измерений между двумя базами данных, они указываются в таблицах. Требования к точности определения геопотенциальной высоты в таблице 12.B.4 были установлены, как это описано в приложении 12.B.

Радиозонд, отвечающий менее строгим требованиям перспективной точности измерений, изложенным в приложении 12.A, должен обеспечивать измерения, которые позволяют получить хорошее соотношение затрат и результатов с точки зрения национального целенаправленного использования. Однако менее строгие требования к точности измерений не будут удовлетворять ожидания некоторых пользователей, например, в том, что касается первичных площадок, используемых для обнаружения изменений климата. Таким образом, для оперативной работы должно быть принято решение относительно качества наблюдений, которое требуется для национальной сети, учитывая, что использование таких данных в прогнозах улучшит качество прогнозов по всей стране, при условии, если наблюдение удовлетворяет требуемым значениям перспективной точности измерений.

Требования в отношении расстояния между точками наблюдений в горизонтальном направлении из базы данных, содержащей требования к наблюдениям ВМО, в данной главе не приводятся, но вместе с тем из них очевидно следует, что одни только радиозондовые наблюдения не могут удовлетворить минимальные требования Интегрированной глобальной системы наблюдений ВМО (ИГСНВ) и они должны быть дополнены измерениями температуры, относительной влажности и ветра при помощи других систем наблюдений.

12.1.4.1 *Геопотенциальная высота: требования и точность измерения*

Современные системы радиозондирования могут иметь систематическое отклонение по давлению немногим больше 1 гПа вблизи поверхности земли, однако столь большие систематические погрешности при давлении ниже 100 гПа сегодня являются редкостью (см. таблицу 12.4). Радиозонды, по-прежнему использующие самые лучшие датчики давления, могут проводить измерения высоты около 10 гПа со случайной погрешностью ($k = 2$) от 300 м до 400 м, то есть со случайной погрешностью измерения давления около 0,6 гПа.

Таким образом, целевая точность измерения высоты для ЧПП погоды может быть обеспечена большинством радиозондов, использующих датчик давления до 100 гПа. При этом однако требуется, чтобы радиозонд измерял высоту при помощи технологии ГСОМ с тем, чтобы обеспечить измерения до высоты 30 км со случайной погрешностью не более 20 м, что эквивалентно случайной погрешности измерения давления в 0,05 гПа и менее в зависимости от точности радиозондовых измерений температуры.

Целевое значение для точности измерения высоты нижней границы облаков в нижней тропосфере, приведенное в таблице 12.B.4 приложения 12.B, требует точности всего лишь 3 гПа в измерении давления ($k = 2$), связанного с нижней границей облаков. Большинство современных радиозондов близки к выполнению этого требования.

Концентрации озона в стратосфере характеризуются четко выраженными градиентами по вертикали, и погрешности определения высоты, вытекающие из даже относительно небольших погрешностей датчиков давления, могут вносить значительные неточности в сообщения, поступающие с озонных зондов на всех широтах. Это оказалось одним из лимитирующих факторов данного типа измерений при использовании радиозондов прежнего типа с более значительными погрешностями измерения давления в стратосфере.

12.1.4.2 *Температура: требования и точность измерений*

Большинство современных радиозондовых систем (введенные в эксплуатацию, начиная с 2000 г.) позволяют измерять температуру в тропосфере и стратосфере до высоты приблизительно 31 км с погрешностью ($k = 2$) в пределах от 0,4 до 1 K. Такая точность, как правило, близка к оптимальной точности для целей ЧПП, предложенной в таблице 12.B.2 приложения 12.B. Однако в некоторых национальных сетях станций радиозондирования в тропических регионах все еще можно обнаружить погрешности, значительно превышающие 2 K. Если данные измерений с такими большими погрешностями используются, то они наносят вред ЧПП.

В стратосфере погрешности радиозондовых измерений температуры могут быть близки к целевым значениям для ЧПП, но требуется некоторое улучшение точности для дневных условий с целью оптимизации для удовлетворения потребностей климатических исследований.

Поскольку целевая точность измерений для определения климатической температуры более жесткая, чем для ЧПП, ведущий центр ГРУАН продолжает работать с изготовителями и операторами над уменьшением погрешности проводимых оперативных измерений в тропосфере и стратосфере. При этом исключительно важно, чтобы систематическое отклонение было как можно более постоянным со временем, а это требует более жестких предельных значений для методов наблюдений, чем те, которые используются на стандартных оперативных площадках. Для того, чтобы добиться наиболее полезной точности измерений, операторы должны следить за тем, чтобы подготовка и функционирование радиозондов соответствовали предписаниям, будь то инструкции из настоящего Руководства, инструкции изготовителя или действующие на станциях ГРУАН, и выполнялись процедуры, согласованные с ведущим центром ГРУАН. В случае ГРУАН детали подготовки радиозондов должны записываться и архивироваться как часть метаданных, связанных с измерениями (Immler et al., 2010).

12.1.4.3 *Относительная влажность: требования и точность измерений*

Погрешности в современных измерениях относительной влажности при температурах выше 50 °C лежат в основном в диапазоне от 5 % до 14 % относительной влажности. Таким образом, измерения в большинстве случаев соответствуют требованиям к перспективным значениям точности измерений для целей ЧПП, однако во многих случаях требуется улучшение для достижения перспективных значений точности измерений для климатических измерений (см. приложение 12.B, таблица 12.B.3).

При температурах ниже –50 °C погрешности измерений увеличиваются, при этом самые лучшие датчики оперативных радиозондов дают погрешность около 16 % относительной влажности при –70 °C, что близко к перспективному значению для ЧПП, но не отвечает требованиям климатических измерений. Однако большинство современных датчиков обеспечивают погрешность около 24 % относительной влажности при самых низких температурах. В ходе взаимного сравнения высококачественных систем радиозондирования ВМО в Янцзяне, Китай (WMO, 2011*b*) был выявлен ряд проблем. Ожидается, что погрешности в измерении относительной влажности в верхней тропосфере со временем будут улучшаться по мере того, как будут устраняться упомянутые проблемы.

12.1.5 Методы измерения

В настоящем разделе приводятся общие сведения о методах радиозондовых измерений. Подробно работа приборов и процедуры приводятся в других разделах.

12.1.5.1 *Ограничивающие факторы при проектировании радиозондов*

При проектировании радиозондов необходимо находить определенные компромиссные решения:

a) При измерениях температуры наиболее надежные результаты получают, когда датчики размещены над верхней поверхностью радиозонда, и при этом не защищены; однако при таком размещении датчики подвергаются воздействию прямого солнечного излучения. В большинстве современных радиозондов применяется покрытие, позволяющее уменьшить нагревание датчиков температуры солнцем и обмен тепла в инфракрасной области. Поправки на радиацию бывают наиболее корректными в том случае, когда датчик температуры и его держатели спроектированы таким образом, что нагревание солнцем не сильно разнится по мере вращения радиозонда относительно солнца. В программном обеспечении для обработки данных предусмотрены поправки на остаточный разогрев солнцем.

b) Почти для всех датчиков относительной влажности требуется некоторая защита от дождя. В то же время защитный экран или шахта уменьшают вентиляцию датчика и соответственно скорость реагирования всей системы датчиков в целом. Кроме того, защита или шахта становятся источником искажения показаний датчика после прохождения зонда через облака. Однако на практике требование о защите от дождя или льда является обычно более важным, чем требование о надлежащем воздействии окружающего воздуха. Поэтому для датчиков относительной влажности в большинстве случаев используются защитный экран или шахта. Одним из альтернативных решений является наличие двух датчиков, которые чередуются: один обогревается для удаления загрязнения, в то время как другой передает данные об относительной влажности, затем второй датчик обогревается, а первый передает информацию об относительной влажности и так далее. Датчики влажности часто помещаются вблизи датчиков температуры, поскольку до последнего времени считалось, что датчики влажности находятся при той же температуре, что и датчик температуры. Однако многие радиозонды в настоящее время измеряют температуру датчика влажности напрямую, поскольку температура датчика влажности редко бывает точно такой же, как и температура воздуха, передаваемая радиозондом. Если

это делается именно таким образом, то датчик относительной влажности, возможно, лучше размещать в стороне от главного датчика температуры и его держателей, вызывающих искажения показаний.

c) Датчики давления обычно устанавливаются внутри зонда, чтобы свести к минимуму изменения температуры в датчике во время полета и обеспечить оптимальное размещение датчиков температуры и относительной влажности.

d) Во многих современных радиозондах датчик давления не используется и геометрическая высота определяется при помощи технологии ГСОМ, а затем переводится в геопотенциальную высоту на основе данных о гравитационных полях в данном месте.

К другим важным факторам, которые необходимо учитывать при проектировании радиозондов, можно отнести их надежность, прочность, а также легкий вес и небольшие размеры, способствующие более успешному запуску. Учитывая доступность современных электронных средств мультиплексирования, важно также обеспечить, чтобы датчики радиозонда производили измерения с высокой скоростью. По мере возможности, замер должен осуществляться приблизительно один раз в секунду, что соответствует замеру, как минимум, примерно через каждые 5 м по вертикали. Поскольку радиозонды обычно используются только один раз или не более чем несколько раз, они должны быть достаточно дешевыми при массовом производстве. Простота и стабильность калибровки являются очень важным показателем, поскольку радиозонды приходится часто хранить в течение продолжительных периодов времени (более года), прежде чем они будут использованы. (Многие из наиболее важных станций ГСНК, к примеру в Антарктике, являются такими пунктами, куда радиозонды могут доставляться только раз в год).

Радиозонд должен передавать устойчивый сигнал на наземный приемник при наклонной дальности, по меньшей мере 200 км. Напряжение батареи радиозонда меняется как с ходом времени, так и при изменении температуры. Поэтому радиозонд должен быть сконструирован таким образом, чтобы изменение напряжения батареи не приводило к уменьшению точности измерений или к неприемлемому смещению частоты радиопередачи.

12.1.5.2 ***Радиочастоты, используемые для передач с радиозондов***

Полосы радиочастот, используемых в настоящее время для большинства передач с радиозондов, приведены в таблице 12.1. Эти полосы соответствуют распределению частот для метеорологических нужд, зафиксированному в Регламенте радиосвязи Международного союза электросвязи.

Радиочастота, которая в действительности выбирается для эксплуатации радиозонда в той или иной географической точке, зависит от различных факторов. В тех местах, для которых характерны сильные ветры на высотах, наклонная дальность до радиозондов обычно большая и низкие углы места изменяются часто очень медленно. При таких обстоятельствах, как правило, выбирается полоса в 400 МГц, поскольку хорошей связи

Таблица 12.1. Основные частоты, используемые радиозондами в полосах радиочастот, выделенных для метеорологических целей

Радиочастотный диапазон (МГц)	*Статус*	*Регионы МСЭ*
400,15–406	Основной	Все
1668,4–1700	Основной	Все

Примечание: некоторые вторичные радиолокационные системы, производимые и эксплуатируемые в Российской Федерации, действуют в диапазоне радиочастот с центром на 1780 МГц.

между радиозондом и наземной системой гораздо легче добиться на частоте 400 МГц, чем на частоте 1680 МГц. Там, где ветры на высотах не столь сильны, выбор частоты в среднем определяется выбором метода, который используется для измерения ветра на высотах (см. настоящий том, глава 13). Так, при выборе для измерения ветра навигационной системы используется обычно частота 400 МГц, и частота 1 680 МГц должна выбираться для измерения ветра радиотеодолитами или антеннами слежения, используемыми с радиозондовыми системами.

Радиочастоты, указанные в таблице 12.1, выделяются на основе разделения частот с другими службами. В некоторых странах национальные органы, ответственные за радиосвязь, выделяют часть полос радиочастот другим пользователям, и поэтому вся полоса полностью не может использоваться для передач с радиозондов. В других странах, в которых большое число радиозондовых систем образует плотную сеть, разработаны строгие спецификации в отношении смещения радиочастот и ширины полос, на которых должны работать отдельные радиозонды.

Любая организация, планирующая запуск радиозондов, должна удостовериться в том, что для их эксплуатации можно воспользоваться подходящими радиочастотами, а также в том, что они не помешают работе радиозондов НМГС.

В настоящее время существуют требования со стороны правительственных учреждений повышать эффективность использования радиочастот. Следовательно, в будущем при эксплуатации радиозондов необходимо будет делить радиочастоты с большим числом пользователей. Вероятно, что во многих странах станет практически невозможным использование широкополосных радиозондовых систем, занимающих большую часть имеющегося спектра полос радиочастот, выделенных для метеорологических нужд. В связи с этим планирование будущих работ в большинстве стран должно быть основано на принципе, согласно которому, во избежание ненужных помех радиозондовые передатчики и приемники должны работать в полосах, ширина которых гораздо меньше 1 МГц. Устойчивость передатчика должна быть лучше ±5 кГц в странах с плотной сетью радиозондов и не хуже примерно ±200 кГц в большинстве остальных стран.

НМГС необходимо поддерживать контакт с национальными органами по радиосвязи для того, чтобы сохранять выделенные им надлежащие радиочастоты и обеспечивать своим оперативным действиям защиту от помех. При эксплуатации радиозондов необходимо также не создавать помех и избегать помех со стороны платформ сбора данных, передающих информацию на метеорологические спутники в диапазоне частот 401–403 МГц, с линий связи, идущих вниз с метеорологических спутников в диапазоне 1690–1700 МГц, и от сигналов для передачи команд и сбора данных для метеорологических спутников в ограниченном ряде географических пунктов в диапазоне 1670–1690 МГц.

12.1.6 Погрешности радиозондовых измерений: общие сведения

12.1.6.1 *Типы погрешностей*

В настоящем разделе подробно рассматривается вопрос о погрешностях в показаниях радиозондовых датчиков.

Погрешности радиозондовых измерений могут быть классифицированы по трем типам (WMO, 1975):

a) систематические погрешности, характерные для определенного типа радиозондов в целом;

b) случайная составляющая систематической погрешности радиозонда, представляющая собой вариации погрешностей, которые характерны для конкретного типа радиозонда и повторяются из полета в полет при вертикальном подъеме в атмосфере;

c) случайные погрешности отдельных наблюдений, приводящие к разбросу значений, накладываемых на погрешности радиозонда при заданном подъеме в атмосфере.

Вместе с тем, многим пользователям целесообразно принимать во внимание величину ошибки репрезентативности, которая связана с измерением (см. Kitchen, 1989, и настоящий том, глава 1). Например, радиозондовые наблюдения за температурой имеют ошибку в схемах усвоения данных, и это в большей степени связано с ошибкой репрезентативности, чем с небольшими погрешностями приборов, обозначенными в 12.4.7. Эти ошибки могут быть различными в зависимости от атмосферной ситуации, а также от того, каким образом используются результаты измерений. Например, с увеличением масштабов движения, представленных в модели ЧПП, ошибки репрезентативности радиозондов должны уменьшаться, поскольку модель отражает большую часть параметров, которые измеряет радиозонд. С другой стороны, климатолог хочет иметь результаты измерений, которые близки к более долгосрочному среднему значению, являющемуся репрезентативным для значительной области вокруг места запуска. Структура, вызываемая локализованными мелкомасштабными флуктуациями в радиозондовых измерениях, для этих целей нежелательна.

12.1.6.2 ***Потенциальные стандартные значения***

Высокоточные измерения радиолокаторов сопровождения или измерения высоты с помощью ГСОМ позволяют выразить количественно систематические погрешности измерений геопотенциальной высоты. Полученные таким образом результаты можно затем использовать для определения систематических погрешностей измерений с помощью радиозондового датчика давления, если известно, что погрешности измерения температуры сравнительно невелики.

Большинство современных радиозондов измеряют температуру в ночное время с точностью ±0,2 K на высоте 30 км (WMO, 2006*a*, 2011*b*). Таким образом, в ночное время можно определить систематические погрешности, которые вызывают отклонение результатов радиозондовых измерений от фактических значений.

Однако по-прежнему не представляется возможным интерпретация сравнений данных о температуре в дневное время с той же степенью достоверности. Например, средние температуры в одних и тех же сравнениях расходятся в пределах ±0,5 K на высоте 30 км. При использовании в крупных международных испытаниях научная аппаратура радиозондирования пока что не достигла требуемой точности в дневное время, так чтобы можно было выявить корректные измерения с такой же достоверностью, что и в ночное время.

Данные измерений относительной влажности могут быть проверены при высоких значениях влажности, когда радиозонды проходят через облака. В этом случае лазерный облакомер и радиолокаторы для определения характеристик облаков могут дать более качественные данные об облаке, за которым наблюдал радиозонд во время своего подъема. Вертикальный профиль относительной влажности, полученный с помощью радиозондов, включая наличие очень сухих слоев, можно проверить путем сравнения с данными измерений, проводимых с помощью рамановского лидара.

В ходе большинства сравнений радиозондов результаты, полученные с радиозондов одной конструкции, сравниваются с результатами, полученными с радиозондов другой конструкции, с тем чтобы получить оценку их систематических расхождений. Погрешности радиозонда и случайные отклонения могут, как правило, быть оценены с помощью соответствующего метода расчета среднеквадратического отклонения расхождений между результатами измерений радиозондов двух разных типов. Наиболее масштабными сериями сравнений радиозондов после 1984 г. были международные сравнения радиозондов ВМО (WMO, 1987; 1991; 1996*a*, 2006*b*) и сравнения, проведенные в Бразилии (WMO, 2006*c*), Маврикии (WMO, 2006*a*) и Янцзяне, Китай (WMO, 2011*b*). В соответствующих разделах ниже приводятся результаты, полученные в ходе этих

и других сравнений с одними и теми же эталонными приборами в Соединенном Королевстве (см. результаты, полученные Метеорологическим бюро в Камборне (WMO, 2010), в США и Швейцарии.

Существует несколько национальных структур, в которых можно проверить точность и надежность радиозондовых датчиков при различных давлениях и температурах в лабораторных условиях. Взаимное сравнение радиозондовых датчиков влажности (WMO, 2006*b*) позволило получить результаты лабораторных сравнений со стандартами влажности в Российской Федерации. Эти результаты могут помочь выявить некоторые, но далеко не все, проблемы, установленные во время полетов радиозондов в атмосфере.

12.1.6.3 ***Источники дополнительных ошибок во время функционирования радиозондов***

Чрезвычайно важно перед запуском радиозонда проводить его тщательную проверку, поскольку ошибки в измерении значений контрольных данных, используемых для коррекции калибровки, могут привести к появлению значительных погрешностей измерений во время полета радиозонда. Следует также избегать ошибок в данных приземных наблюдений, полученных в стандартной метеорологической будке, и дальнейшего их попадания в результаты измерений. Ошибка в данных о приземном давлении повлияет впоследствии на все расчетные значения геопотенциальной высоты. По этой же причине важно, чтобы данные наблюдений за приземным давлением были приведены к уровню высоты станции.

Случайные погрешности в современных радиозондовых измерениях, как правило, невелики. Это результат применения в радиозондах усовершенствованной электроники и мультиплексирования, обеспечивающих более надежную связь с наземной станцией для передачи информации и повышения эффективности автоматизированной обработки данных на наземной станции. Соответственно случайные погрешности обычно менее значительны, чем систематические погрешности радиозонда и происходящие от полета к полету изменения в точности измерений и калибровке датчиков (погрешность радиозонда). Однако случайные погрешности могут стать значительными, когда происходит частичный отказ в работе радиозонда, когда возникают помехи от другого радиозонда, передатчик которого работает на той же частоте, либо когда радиозонд находится на большом наклонном расстоянии и малой высоте, которые несовместимы с характеристиками приемников и антенн наземной системы.

Таким образом, погрешности радиозондовых измерений могут возникать не только из-за конструкции датчиков радиозонда и проблем с калибровкой на заводе во время их изготовления, но также и из-за проблем приема сигналов с радиозондов на земле, которые отражаются на последующей обработке данных. При плохом приеме сигнала программное обеспечение для обработки данных часто определяет значения просто путем интерполяции случайных измерений, которые считаются допустимыми. В этом случае очень важно, чтобы оператор был осведомлен о количестве интерполированных данных. Качество данных может быть настолько плохим, что следует прекратить наблюдение за радиозондом и запустить вместо него другой радиозонд.

В автоматизированных системах при особых обстоятельствах часто возникают сбои в программном обеспечении, которые трудно определить без проведения масштабных проверок. Обычно ошибки обусловлены непреднамеренным пропуском обычного действия, необходимого для того, чтобы справиться с какой-то особой ситуацией или сочетанием явлений, с которыми опытный оператор обычно работает не задумываясь.

12.2 РАДИОЗОНДОВЫЕ ЭЛЕКТРОННЫЕ СРЕДСТВА

12.2.1 Общие характеристики

Базовая конструкция радиозонда состоит, как правило, из трех основных элементов:

a) датчики плюс образцовый прибор;

b) электронный преобразователь, преобразующий выходные сигналы с датчиков и образцовых приборов в электрические сигналы;

c) радиопередатчик.

В системах радиоветровых зондов (см. настоящий том, глава 13) имеются также электронные средства, необходимые для приема и передачи радионавигационных сигналов, или электронные средства системы приемо-передатчика для использования со вторичными радиолокаторами.

Радиозонды, как правило, должны обеспечивать измерение более одной метеорологической переменной величины. Для компенсации нестабильности при преобразовании выходных сигналов датчика в передаваемые сигналы используются образцовые сигналы. Таким образом, следует производить переключение различных датчиков и образцовых устройств в соответствии с заранее определенным циклом. В большинстве современных радиозондов используются электронные переключатели, работающие с высокой скоростью при типичном цикле одного измерения, продолжающемся от одной до двух секунд. Такая скорость отсчетов позволяет измерять метеорологические параметры с интервалом по высоте от 5 до 10 м при нормальной скорости подъема радиозонда.

12.2.2 Источники питания для радиозондов

Емкость батарей радиозондов должна быть достаточной для того, чтобы обеспечивать питание радиозонда на протяжении всего времени его полета при любых условиях состояния атмосферы. Для подъема радиозонда на высоту 5 гПа емкость батарей радиозондов должна быть достаточной для снабжения требуемыми токами в течение до трех часов, с учетом того, что запуск радиозонда часто может затянуться и время полета может растянуться до двух часов. Три часа работы батареи могли бы потребоваться в том случае, когда должны использоваться данные, поступающие во время снижения радиозонда. Батареи должны быть как можно более легкими и иметь длительный срок хранения. Кроме того, использованные батареи не должны представлять опасность для окружающей среды. Многие современные радиозонды могут в ходе полета выдерживать значительные изменения выходного напряжения. Обычно в радиозондах используют батареи двух типов: батареи с сухими элементами и водоналивные батареи.

Применение сухих батарей быстро растет благодаря их преимуществу, заключающемуся в том, что они легкодоступны по очень низкой цене, поскольку в большом количестве производятся по всему миру и предоставляют меньшую опасность с точки зрения охраны здоровья и техники безопасности (и воздействия на окружающую среду). Однако к их недостаткам относится ограниченный срок годности. К тому же при разрядке выходное напряжение сухой батареи подвержено большим изменениям по сравнению с водоналивными батареями.

В водоналивных батареях обычно используют хлорид меди и серное вещество. Эти батареи имеют длительный срок хранения. Благодаря химическим реакциям, происходящим в водоналивных батареях, в них вырабатывается внутреннее тепло, что уменьшает потребность в тепловой изоляции и помогает стабилизировать температуру электронных средств радиозонда во время полета. Эти батареи не производятся в широких масштабах для других пользователей. Поэтому, как правило, их производят непосредственные изготовители радиозондов.

Необходимо позаботиться о том, чтобы батареи не представляли опасность для окружающей среды после того, как радиозонд упадет на землю в результате разрыва оболочки воздушного шара. См. более детальное рассмотрение вопросов охраны окружающей среды в 12.7.5 и приложении 12.C.

12.2.3 Методы передачи данных

12.2.3.1 *Радиопередатчик*

В радиозондах используются передатчики самых разных конструкций. При частотах вплоть до 400 МГц используется, главным образом, полупроводниковые схемы, а при частоте 1680 МГц могут применяться ламповые (резонаторные) генераторы. В современных конструкциях передатчика обычно используется кварцевая стабилизация частоты для того, чтобы обеспечить хорошую стабильность частоты во время зондирования. Хорошая устойчивость частоты во время подготовки зонда на земле перед запуском и в ходе полета является очень важным фактором. При частоте 400 МГц предполагается широкое использование радиозондов с передатчиками, выходная мощность которых составляет менее 250 мВт. При частоте 1680 МГц наиболее часто используются радиозонды с передатчиками мощностью примерно 330 мВт. Модуляция передатчика у разных типов радиозондов различается. Желательно, чтобы в будущем производители радиозондов договорились о стандартных методах и формате передачи данных с радиозондов на наземную станцию, что обеспечило бы для пользователей функциональную совместимость между различными типами радиозондов без необходимости модифицировать каждый раз аппаратное и программное обеспечение наземного приема. В любом случае органы, регулирующие правила радиосвязи, во многих регионах мира будут требовать в будущем соответствия передатчиков радиозондов определенным спецификациям, чтобы минимизировать занятый радиочастотный спектр и дать возможность другим пользователям использовать выделенные для метеорологических нужд полосы радиочастот (см. 12.1.5.2).

12.3 ДАТЧИКИ ДАВЛЕНИЯ (ВКЛЮЧАЯ ИЗМЕРЕНИЯ ВЫСОТЫ)

12.3.1 Общие аспекты

Радиозондовые датчики давления должны сохранять точность измерений в очень широком диапазоне — от 3 до 1 000 гПа с разрешением в 0,1 гПа на большей части диапазона и с разрешением в 0,01 гПа для давления менее 100 гПа. Изменения давления определяются, как правило, по небольшому электрическому или механическому изменению. Например, типичная максимальная деформация анероидной коробки составляет примерно 5 мм, так что преобразователь, используемый вместе с датчиком, должен обеспечивать разрешение смещения примерно в 0,5 мкм. Изменения калибровки, происходящие в результате изменений температуры датчика при подъеме радиозонда, также должны компенсироваться. Эти изменения температуры могут достигать нескольких десятков градусов, если только датчик давления не смонтирован в стабилизируемой среде.

В связи с этим датчики давления устанавливаются, как правило, внутри корпуса радиозонда с целью сведения к минимуму происходящих изменений температуры. В некоторых случаях датчик с целью уменьшения охлаждения окружают фольгированными пакетиками с водой. В тех случаях, когда используются водоналивные батареи, тепло, выделяемое такими батареями в результате химической реакции, используется для компенсации внутреннего охлаждения радиозонда. Однако даже при этом конструкция радиозонда должна обеспечить отсутствие градиентов температуры вокруг датчика и связанных с ним электрических компонентов. В случае, когда для датчика давления создается среда с активно контролируемой температурой, вся конструкция

датчика должна быть смонтирована в таком положении на радиозонде, при котором тепловое искажение показаний датчика вследствие конструкции датчика давления не могло бы влиять на измерения температуры или относительной влажности.

Датчик давления и связанный с ним преобразователь конструируются, как правило, таким образом, что чувствительность увеличивается по мере падения давления. Величина постоянной времени радиозондовых датчиков давления обычно очень мала, и погрешности, обусловленные инерцией датчика, незначительны.

Исторически, когда производились надежные датчики давления для низкого давления, датчики с неудовлетворительной точностью заменяли измерениями давления, рассчитанными из высоты радиолокатора, как, например, в Соединенном Королевстве до 1978 г. В некоторых странах Содружества Независимых Государств для измерения геометрических высот вместо датчика давления на радиозонде используют очень точные вторичные радиолокаторы.

Сегодня многие современные системы радиозондирования используют навигационные сигналы ГСОМ для определения положения радиозонда и уже не используют датчики давления на радиозондах (для экономии средств на расходные материалы). В результате геометрическая высота, а значит и геопотенциальная высота, определяется напрямую (см. 12.3.6), а изменения в давлении во время полета вычисляются из радиозондовых измерений температуры и влажности.

12.3.2 **Анероидные коробки**

Анероидные коробки используются в качестве датчика давления в большинстве радиозондов. В радиозондах более старых конструкций диаметр этих коробок, как правило, составлял приблизительно 50–60 мм. Датчики изготавливаются из металла, коэффициент упругости которого не зависит от температуры. Измерение деформации анероидной коробки может проводиться либо при помощи внешнего устройства, требующего механической связи между коробкой и радиозондовым преобразователем, либо при помощи внутреннего устройства (см. 12.3.3).

Чувствительность анероида зависит, главным образом, от активной площади поверхности коробки и от ее упругости. Коробки могут быть сконструированы таким образом, чтобы их деформация была линейно пропорциональна давлению или следовала бы какому-то другому закону, например, приближалась к логарифмической зависимости от давления. Долгосрочную устойчивость калибровки коробки можно, как правило, повысить путем выдерживания коробок. Этого можно достичь, многократно подвергая коробки изменениям давления и температуры по всему рабочему диапазону.

При использовании анероида с механической связью с преобразователем датчик обычно подвержен эффекту гистерезиса, равного примерно 1–2 гПа. Этот гистерезис необходимо принимать во внимание при калибровке датчика. Изменение давления в ходе калибровки должно быть такого же знака, как и изменение, происходящее в реальных условиях зондирования. Механическая связь с радиозондовым преобразователем часто представляет собой систему, усиливающую движение коробки с передачей на стрелку, приводящую в действие контакты переключателя или контакты, содержащие активные сопротивления. Для того чтобы действие было успешным, трение должно быть сведено к минимуму, чтобы избежать как прерывистости в движениях стрелки, так и гистерезиса в системе датчика.

12.3.3 **Анероидные коробки (емкостные)**

Во многих современных конструкциях радиозондов используются анероидные коробки меньшего диаметра (30 мм или меньшего диаметра), причем деформация коробки измеряется непосредственно внутренним конденсатором. Используемый для этой цели

электрический конденсатор состоит из двух параллельных пластин, каждая из которых закрепляется непосредственно на одной из сторон коробки. Емкость конденсатора C определяется по формуле:

$$C = \in \cdot S / e \tag{12.1}$$

где S — площадь поверхности каждой пластины, e — расстояние между пластинами и ϵ — диэлектрическая постоянная. Поскольку e — прямая функция деформации коробки, емкость C — прямая электрическая мера этой деформации. Во многих радиозондовых датчиках каждая из пластин конденсатора зафиксирована на одной из противоположных сторон коробки при помощи креплений, проходящих через отверстия в другой пластине. При такой конфигурации e уменьшается при понижении давления. Чувствительность емкостного датчика определяется по формуле:

$$- \in \cdot S / e^2 \cdot de / dp \tag{12.2}$$

Чувствительность будет самой высокой, когда e мало, а давление наименьшее. Описанный емкостный датчик более сложен в изготовлении, однако наилучшим образом подходит для измерений на высотах, поскольку его чувствительность может быть в 10 раз выше на уровне 10 гПа, чем на уровне 1 000 гПа. Значение емкости, как правило, близко к 6 пФ.

Емкостные анероидные коробки обычно соединены с электронным RC-генератором с соответствующими опорными конденсаторами. Такая конструкция необходима для измерения очень малых колебаний емкости (например, 0,1 % при максимуме в 6 пФ) без каких-либо значительных нарушений в работе генератора за счет изменений температуры, подводимого питания или в результате старения. Такой высокой устойчивости работы генератора трудно достичь при низкой цене. Однако одно из решений может заключаться в переключении входных сигналов, поступающих в генератор от датчика давления и от двух опорных конденсаторов. Опорный конденсатор C_1 подсоединяется к генератору самостоятельно, затем параллельно с конденсатором датчика давления C_p и затем параллельно со вторым опорным конденсатором C_2 для того, чтобы обеспечить полномасштабный образцовый прибор.

Калибровка анероидного емкостного датчика будет, как правило, в значительной степени зависеть от температуры. Это может быть компенсировано либо путем сличения с внешним конденсатором, обладающим аналогичным температурным коэффициентом, либо путем использования во время обработки данных в наземных системах калибровочных коэффициентов, установленных при калибровке на предприятии-изготовителе. Поправка, применяемая при обработке данных, будет зависеть от внутренней температуры, измеряемой близко к месту нахождения датчика давления. На практике для достижения необходимой точности, возможно, следует использовать оба метода компенсации.

12.3.4 **Кремниевые датчики**

Успехи в области использования кремния позволили в настоящее время изготавливать надежные датчики давления с использованием этого материала. В толстом слое полупроводника формируется небольшая полость. Эта полость покрывается очень тонким слоем кремния, и в ней сохраняется очень низкое давление. Эта полость затем выполняет функцию датчика давления. Чувствительным элементом служит тонкое кремниевое покрытие, которое прогибается в той или иной степени в зависимости от атмосферного давления.

Метод определения прогиба кремниевого покрытия заключается в использовании емкостного датчика. В этом случае тонкий слой кремния над полостью покрывается тонким слоем металла, а второй слой металла используется в качестве эталонной пластины. Прогиб кремниевого покрытия определяется по изменению емкости между этими двумя слоями. Датчики этого типа в гораздо меньшей степени зависят от температуры, чем датчики деформации, и сейчас широко используются. Поскольку датчик имеет очень маленький размер, это позволяет избежать погрешностей в калибровке,

присущих более крупным емкостным анероидным датчикам и возникающих при полете радиозонда в результате изменений градиента температуры в анероидном датчике и в связанной с ним электронике.

12.3.5 Погрешности датчиков давления

Систематические погрешности и погрешность радиозонда (изменение от полета к полету при двух среднеквадратических отклонениях) были определены по данным международных сравнений радиозондов ВМО для выбранных типов радиозондов. Полученные результаты представлены в таблице 12.2. Диапазон значений систематической погрешности обычно представляет разброс результатов нескольких испытаний.

Анероидные коробки подвержены изменению калибровки, если только они перед использованием не были надлежащим образом выдержаны в течение многих циклов изменения давления в их рабочем диапазоне. Коррекция с помощью программного обеспечения, проводимая во время обработки данных, но основанная на показаниях, полученных при наземном контроле перед запуском, позволяет несколько уменьшить эти погрешности. Однако поправки на основе проверок перед запуском радиозонда вводятся по фиксированной схеме коррекции погрешностей по всему рабочему диапазону. На практике изменение в калибровке датчика давления было более изменчивым по всему рабочему диапазону.

Система вторичных радиолокаторов MRZ была введена в Российской Федерации в середине 1980-х годов, и представленные результаты были получены в 1989 г. В системе нет датчика давления. Давление рассчитывается из данных измерений геометрической

Таблица 12.2. Диапазон систематической погрешности и погрешности радиозонда (от полета к полету, $k = 2$) и общая погрешность в измерении давления в международных сравнениях радиозондов ВМО и связанных с ними испытаниях

Тип радиозонда	*Систематическая погрешность*			*Погрешность радиозонда*			*Погрешность*		
Изобарическая поверхность (гПа)	*850*	*100*	*10*	*850*	*100*	*10*	*850*	*100*	*10*
MRZ[a] (Российская Федерация)	от –1,5 до –0,5	от –1,2 до –0,8	0–0,2	*7*	3,5	0,5	8	4	0,7
Meisei RS2-91	0,2–1	–0,1–0,5	–0,2–0,2	1	0,6	0,6	2	1,1	0,8
VIZ MKII	0–1	0,7–1,1	0,3–0,7	1,6	0,6	0,4	2,5	1,6	1
Vaisala RS92, кремниевый датчик	< 0,5	< 0,3	< 0,2	0,8	0,4	0,2	1	0,6	0,4
MODEM M2K2[a]	от –0,8 до –0,4	< 0,1	< 0,05	1,2	0,4	0,03	1,6	0,4	0,05
Vaisala RS92[a]	< 0,5	< 0,1	< 0,05	1,2	0,4	0,03	1,6	0,4	0,05
Lockheed Martin Sippican (LMS),[a] LMG-6	< 0,5	< 0,1	< 0,05	1,2	0,4	0,03	1,2	0,4	0,05

Примечание:

a Датчик давления не используется, давление вычисляется из измерений геопотенциальной высоты, см. 12.3.6.

высоты, которые затем переводятся в геопотенциальную высоту, как показано в 12.3.6. Качество измерений зависело от характеристик каждого конкретного вторичного радиолокатора.

Радиозонды VIZ MKII и Meisei RS2-91 имеют емкостные анероидные датчики, но различной конструкции. В целом погрешности радиозонда ($k = 2$) при использовании емкостных анероидов составляют обычно менее 2 гПа почти при любом давлении. Однако для емкостных анероидных коробок характерны значительные систематические погрешности, особенно при изменениях внутренней температуры радиозонда и температурных градиентов по всему датчику и в связанной с ним электронике. Систематическая погрешность емкостных анероидов обычно не превышает ±1,5 гПа. Однако погрешности могут быть более значительными, если датчики давления испытывают очень большой термический удар при запуске радиозонда.

Радиозонд Vaisala RS92 имеет кремниевый микроэлектронный датчик и не подвержен воздействию термического удара, а погрешности, полученные для данных систем, были даже лучше, чем у емкостных анероидных коробок.

О последствиях погрешностей в измерении давления, представленных в таблице 12.2, для сообщаемых данных о температуре можно судить по тому факту, что погрешность измерения давления в 1 гПа приводит к ошибке в данных о температуре, равной в среднем –0,1 K на уровне 900 гПа, –0,3 K в верхней тропосфере (на уровне 200 гПа в тропиках), ±0,5 K на уровне 30 гПа (с изменением зависимости от летних или зимних условий примерно на 55° с. ш.) и до, по меньшей мере, 1 K для большинства ситуаций на уровне 10 гПа.

12.3.5.1 *Соотношение погрешностей в значениях геопотенциальной высоты и погрешностей в значениях давления*

Погрешность $\varepsilon_z(t_1)$ в значении геопотенциальной высоты в заданный момент времени при полете определяется по следующей формуле:

$$\varepsilon_z(t_1) = \frac{R}{g}\int_{p_0}^{p_1}\left[\varepsilon_T(p) - \frac{\delta T}{\delta p}\varepsilon_p(p)\right]\frac{dp}{p} + \frac{R}{g}\int_{p_1}^{p_1+\varepsilon_p(p_1)}\left[T_v(p) + \varepsilon_T(p) - \frac{\delta T}{\delta p}\varepsilon_p(p)\right]\frac{dp}{p} \qquad (12.3)$$

где p_0 — давление у поверхности; p_1 — истинное давление в момент времени t_1; $p_1 + \varepsilon_p(p_1)$ — измеренное давление, указываемое датчиком радиозонда в момент времени t_1; $\varepsilon_T(p)$ и $\varepsilon_p(p)$ — погрешности радиозондовых измерений соответственно температуры и давления как функции давления; $T_v(p)$ — виртуальная температура при давлении p; R — газовая постоянная, g — ускорение свободного падения, как это определено в публикации ВМО (2011*a*).

Для указанной стандартной изобарической поверхности p_s второй член в уравнении 12.3 исчезает, поскольку не существует погрешности в определении p_s, и, следовательно, погрешность в значении геопотенциальной высоты на стандартной изобарической поверхности сокращается и приобретает следующий вид:

$$\varepsilon_z(p_s) = \frac{R}{g}\int_{p_0}^{p_s}\left[\varepsilon_T(p) - \frac{\delta T}{\delta p}\varepsilon_p(p)\right]\frac{dp}{p} \qquad (12.4)$$

и для радиозондов без датчика давления с использованием радиолокатора:

$$\varepsilon_z(p_s) = T_v(p_s)\int_{z_0}^{z_{ps}} g/T^2\left[\varepsilon_T(z) + \varepsilon_z(Range,\theta)\cdot dT_v/dz\right] \qquad (12.5)$$

где Z_{ps} — геопотенциальная высота на данной изобарической поверхности p_s, и погрешность в значении геопотенциальной высоты для радиолокатора является функцией наклонной дальности и угла места (θ), и колеблется от полета к полету согласно режиму ветра.

В таблице 12.3 представлены для типичных атмосферных условий погрешности определения геопотенциальной высоты, которые возникают из-за погрешностей датчиков радиозонда. Из таблицы видно, что значения геопотенциала на заданных изобарических поверхностях определяются с небольшими погрешностями, которые связаны с ошибкой измерения температуры или давления радиозондом. Погрешность в измерении давления имеет несколько различный эффект на различных широтах, поскольку структура типичных профилей температуры меняется с широтой. Однако те же самые погрешности датчиков давления дают гораздо большие погрешности в определении высоты конкретных структур, таких как температурная инверсия, в том числе в тропопаузе, а также верхней и нижней границы облаков.

Важность уравнений 12.4 и 12.5 заключается в том, что погрешности в определении геопотенциальной высоты на стандартной изобарической поверхности главным образом связаны с погрешностями в измерении температуры, и таким образом, если сравнить

Таблица 12.3. Систематические ошибки в определении геопотенциальной высоты (гп. м) при заданных погрешностях давления и температуры

	$\varepsilon_T T$ *погрешность (K)*	$\varepsilon_p P$ *погрешность (гПа)*	*Широта*	*300 гПа*	*100 гПа*	*30 гПа*	*10 гПа*
Высота стандартной изобарической поверхности, погрешность температуры	0,25	0	Все	9	17	26	34
Высота стандартной изобарической поверхности, погрешность давления	0	–1	25° с. ш.	3	12	–2	–24
Высота стандартной изобарической поверхности, погрешность давления	0	–1	50° с. ш. лето	3	5	1	–20
Высота стандартной изобарической поверхности, погрешность давления	0	–1	50° с. ш. зима	3	5	6	–4
Высота уровня особых точек, погрешность давления	0	–1	25° с. ш.	27	72	211	650
Высота уровня особых точек, погрешность давления	0	–1	50° с. ш. лето	26	72	223	680
Высота уровня особых точек, погрешность давления	0	–1	50° с. ш. зима	26	70	213	625

геопотенциальные высоты с совмещенными данными в нулевом приближении из ЧПП, то аномалии высоты дадут представление об относительной точности определения температуры в двух точках (см. WMO, 2003).

12.3.6 Использование геометрической высоты вместо данных датчика давления

12.3.6.1 *Общие сведения*

Радиозонды с ГСОМ, которые декодируют спутниковые сигналы глобальной системы определения местоположения, могут предоставлять данные о геометрической высоте в отличие от первых радиозондов с ГСОМ, которые не декодировали эти сигналы. Эти измерения геометрической высоты достаточно точны (между 10 и 20 м) для того, чтобы использоваться для расчета давления в заданное время полета зонда на основе данных наблюдений у поверхности за давлением, температурой и относительной влажностью (см. уравнения 12.12 и 12.13). Рассчитанное значение давления будет более точным, чем измерения в стратосфере с помощью самых лучших радиозондовых датчиков давления (см. таблицу 12.2).

Исключение из радиозондов с технологией ГСОМ датчика давления должно обеспечить значительное снижение стоимости радиозондов, однако при этом необходимо учитывать потребности пользователей в данных для все чаще применяемых негидростатических моделей ЧПП, поскольку непосредственное измерение в тропосфере давления и геопотенциальной высоты может давать некоторое преимущество в тех случаях, когда предположение о гидростатическом равновесии не соответствует атмосферным условиям.

12.3.6.2 *Метод расчета*

Перевод геометрической высоты, измеренной при помощи радиозонда с технологией ГСОМ, в геопотенциальную высоту представляет собой функцию поля силы тяжести в данной точке и не зависит от профилей температуры и влажности в данной точке. Энергия гравитационного потенциала (Φ_1) единицы массы чего бы то ни было — интеграл нормальной силы тяжести от СУМ ($z = 0$) до высоты радиозонда ($z = z_1$), и записывается уравнением 12.6:

$$\Phi_1 = \int_0^{z_1} \gamma\left(z, \varphi\right) \cdot dz \tag{12.6}$$

где $\gamma(z, \varphi)$ — нормальная сила тяжести над геоидом. Это функция геометрической высоты z, и геодезической широты φ.

Делением геопотенциала на нормальную силу тяжести на широте 45° получаем высоту геопотенциала, которая используется в ВМО:

$$Z_1 = \Phi_1 / \gamma_{45^\circ} \tag{12.7}$$

где γ_{45° взято из определения и равно 9,806 65 м·с$^{-2}$. Следует отметить, что сила тяжести на поверхности самая большая на полюсах (9,832 18 м·с$^{-2}$), а самая малая на экваторе (9,780 33 м·с$^{-2}$).

Колебания силы тяжести с высотой должны учитывать эллипсоидную форму Земли и вращение Земли. Однако, когда колебания γ с высотой учитываются, геопотенциальная высота Z_1 на геометрической высоте z_1, аппроксимируется с использованием смитсонианских метеорологических таблиц (List, 1968) следующим образом:

$$Z_1\left(z_1, \varphi\right) = \left(\gamma_{\mathrm{SMT}}\left(\varphi\right) / \gamma_{45^\circ}\right) \cdot \left(\left(R_{\mathrm{SMT}}\left(\varphi\right) \cdot z_1\right) / \left(R_{\mathrm{SMT}}\left(\varphi\right) + z_1\right)\right) \tag{12.8}$$

где $R_{\mathrm{SMT}}(\varphi)$ — эффективный радиус Земли для широты (φ), эта величина содержится в смитсонианских метеорологических таблицах и была выбрана для учета фактических изменений с геометрической высотой в совмещенных гравитационных и центробежных

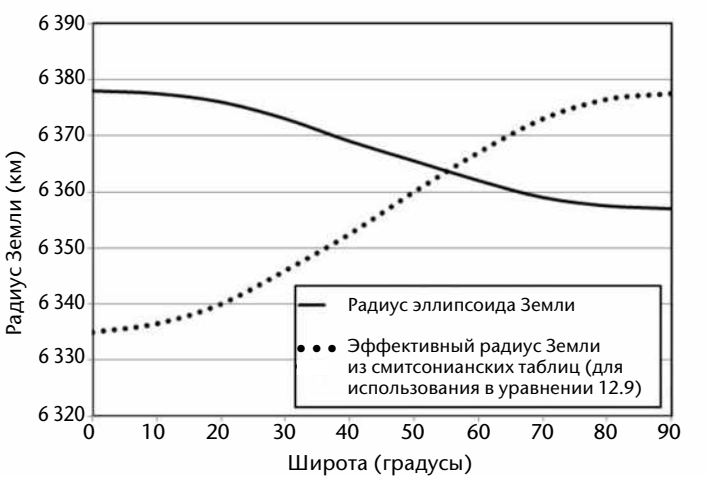


Рисунок 12.3 Колебания радиуса Земли с широтой в сравнении с колебаниями радиуса из смитсонианских таблиц, использованного в уравнении 12.8.

силах. Она не является фактическим радиусом Земли на данной широте, как показано на рисунке 12.3, где смитсонианский радиус увеличивается от экватора к высоким широтам, но фактический радиус эллипсоида Земли самый большой на экваторе и самый малый на полюсах.

Поскольку величины $R_{SMT}(\varphi)$ в смитсонианских таблицах были получены приблизительно в 1949 г., в вычислениях использовался Международный эллипсоид 1935 года, а не Всемирная геодезическая система 1984 года (WGS-84), которая в настоящее время используется в приемниках ГСОМ. Кроме того, в смитсонианских таблицах использовалось следующее значение $\gamma_{SMT}(\varphi)$:

$$\gamma_{\mathrm{SMT}}(\varphi) = 9,806\,16 \cdot \left(1 - 0,002\,637\,3 \cdot \cos(2\varphi) + 0,000\,005\,9 \cdot \cos(2\varphi)^2\right) \left[\mathrm{m\ s^{-2}}\right] \qquad (12.9)$$

Эта формула не представлена широко в открытой научной литературе, несмотря на то, что была рекомендована Международной ассоциацией геодезии в 1949 г.

Альтернативное выражение для соотношения в уравнении 12.8 было предложено Махони (личное сообщение) на основе геоида WGS-84. В этом случае геопотенциальная высота для геометрической высоты z_1 записывается как

$$Z_1(z_1, \varphi) = \left(\gamma_{\mathrm{s}}(\varphi) / \gamma_{45^\circ}\right) \cdot \left(\left(R(\varphi) \cdot z_1\right) / \left(R(\varphi) + z_1\right)\right) \qquad (12.10)$$

где $\gamma_s(\varphi)$ — нормальная сила тяжести на поверхности эллипсоида вращения и где:

$$\gamma_{\mathrm{s}}(\varphi) = 9,780\,325 \cdot \left(\left(1 + 0,001\,931\,85 \cdot \sin(\varphi)^2\right) \Big/ \left(1 - 0,006\,694\,35 \cdot \sin(\varphi)^2\right)^{0,5}\right) \qquad (12.11)$$

где радиус $R(\varphi)$ = 6 378,137/(1,006 803 – 0,006 706 · $\sin(\varphi)^2$), что дает результаты для R, близкие к значениям в смитсонианских таблицах.

Если геопотенциальная высота для геометрической высоты 30 км получена вычислениями, то она составляет от 29,778 5 км на экваторе до 29,932 км на широте 80° с. ш., если используются уравнения 12.8 и 12.9, или 12.10 и 12.11. Разница в значениях геопотенциальной высоты, полученных двумя методами, составляет менее 1 м и по сути не является критичной для метеорологов.

Разница в значениях геометрической высоты и геопотенциальной высоты увеличивается с высотой над поверхностью Земли. Например, типичные различия в значениях, полученных в измерениях в ходе взаимного сравнения высококачественных систем радиозондирования в Янцзяне, Китай, на широте 22° с. ш., представлены в таблице 12.4.

Таблица 12.4. Различия между геопотенциальной и геометрической высотами, измеренными во время взаимного сравнения радиозондов ВМО в Янцзяне, Китай, на 22° с. ш.

Геопотенциальная высота	*Геопотенциальная — геометрическая высота*
8 000	25
16 000	70
24 000	135
32 000	220

Если определены изменения геопотенциальной высоты относительно температуры и относительной влажности, то можно рассчитать давление путем интегрирования из измеренного давления на поверхности с использованием гипсометрического отношения в дискретной форме:

$$L_n\left(p_{i+1}/p_i\right) = -9,806\,65 \cdot dZ/R^* \cdot T_{\mathrm{v}} \qquad (12.12)$$

где p — давление в гПа; R^* — газовая постоянная для сухого воздуха; T_{v} — средняя виртуальная температура для слоя в градусах К; dZ — толщина слоя в геопотенциальной высоте и i относится к нижней границе этого слоя.

Виртуальная температура T_{v} рассчитывается из:

$$T_{\mathrm{v}} = T\Big/\left(1-\left(U/100\right)\cdot\left(e_s\left(T\right)/p\right)\cdot\left(1-\varepsilon_a\right)\right) \qquad (12.13)$$

где U — относительная влажность воздуха, e_s — давление насыщенного водяного пара и ε_a — отношение молекулярного веса влажного и сухого воздуха, при этом ε_a = 0,622.

Необходимо еще раз подчеркнуть, что температура и относительная влажность, определенные радиозондом, используются только в расчетах давления для систем, использующих ГСОМ-измерения геометрической высоты, поскольку геопотенциальные значения получают просто из геометрической высоты и гравитационного поля Земли.

Алгоритмы для вычисления геометрической высоты по данным радиолокационных наблюдений за ветром с учетом наклонной дальности и угла места с последующим преобразованием геометрической высоты в геопотенциальную высоту включены в публикацию ВМО (WMO, 1986). Оперативный алгоритм, используемый во вторичных радиолокационных системах в Российской Федерации, приведен в другой публикации ВМО (WMO, 1991). В случае, когда вместо данных наблюдений с помощью датчика давления используются данные радиолокационных наблюдений за высотой, необходимо перед расчетом значений давления откорректировать эти высоты с учетом влияния кривизны земного шара и рефракции радиоволн. Поправка на рефракцию может быть введена с использованием сезонных средних профилей атмосферы, однако для достижения оптимальной точности значений давления может понадобиться коррекция высоты с учетом условий, характерных для каждого индивидуального полета радиозонда.

12.3.7. Источники погрешностей при прямом измерении высоты

12.3.7.1 *При определении геометрической высоты с помощью ГСОМ*

При отсутствии местных помех на частотах навигационного сигнала ГСОМ большинство современных систем радиозондирования могут определять высоты с хорошей точностью по отношению к высоте, на которой в полете происходит блокирование ГСОМ. Правда, при этом программное обеспечение должно надежно интерполировать на поверхность Земли (с учетом изменений в скорости подъема шара-зонда сразу после запуска) с тем, чтобы обеспечить наилучшую точность измерений ГСОМ. Во время взаимного сравнения

ВМО высококачественных систем радиозондирования в Янцзяне, Китай (WMO, 2011*b*) некоторые программные модули интерполяции работали лучше, чем другие, и в самых худших случаях систематические погрешности составляли более 10 м, оставаясь на этом уровне на протяжении всего полета радиозонда данного типа.

Особенно важно проверять высоту локальной антенны ГСОМ относительно датчика давления на поверхности и обеспечивать, чтобы эта величина использовалась корректно в вычислениях, производимых программным обеспечением системы радиозондирования. Следует помнить о том, что расхождение в значениях давления (или погрешность в значении давления) в 1 гПа на антенне относительно датчика давления в поверхностном слое на станции радиозондирования приводит к ошибке 10 м в определении высоты на протяжении всего полета.

Полетная обработка данных должна предусматривать возможности преодоления значительных колебаний (положительных и отрицательных) в скоростях подъема газовой оболочки, поднимающей радиозонд. Погрешности в определении температуры и относительной влажности скажутся только на вычислениях давления на основе геопотенциальной высоты (см. уравнения 12.12 и 12.13). О влиянии погрешностей в измерении температуры на вычисления давления можно судить по величинам погрешностей в значениях высоты, приведенным в таблице 12.3, которые возникают в результате погрешности измерения температуры, составляющей 0,25 K на протяжении всего полета. Такая погрешность в значении температуры приводит к погрешностям в значениях давления 0,4, 0,3, 0,13 и 0,05 гПа при номинальном давлении 300, 100, 30 и 10 гПа, соответственно.

Таким образом в стратосфере геометрические высоты, определенные с помощью ГСОМ, являются гораздо более надежными измерениями высоты, чем при помощи любой другой оперативной системы измерения. Вблизи поверхности земли измерения высоты с помощью ГСОМ должны проводиться с большой осторожностью, чтобы обеспечить качество, сопоставимое с лучшими датчиками давления. Требования по перспективному значению погрешности для давления, указанные в приложении 12.A, используя радиозонды, можно выполнить для всех значений давления. Вместе с тем, отнюдь не очевидно, что все системы радиозондирования с ГСОМ могут обеспечить выполнение требований по оптимальному значению давления на низких уровнях, и при давлении ниже 100 гПа оптимальные требуемые значения могут быть достигнуты при условии, что погрешности в измерении температуры небольшие.

12.3.7.2 ***При радиолокационных наблюдениях за высотой***

Влияние погрешностей радиолокационных наблюдений на результаты измерения ветра рассматриваются в настоящем томе I, глава 13. Однако при радиолокационном определении высоты ошибки в угле места (случайные и систематические) являются гораздо более значительными, чем при определении ветра. Систематическое смещение наклонной дальности также более существенно при измерениях высоты, чем при измерениях ветра. Таким образом, радиолокаторы, обеспечивающие удовлетворительные наблюдения за ветром, часто имеют такие погрешности в угле места и наклонной дальности, которые препятствуют получению высококачественных данных измерения высоты (и, следовательно, давления).

Небольшие, но значимые систематические погрешности в угле места могут быть обусловлены следующими различными факторами:

a) перекос осей вращения по азимуту и углу места радиолокатора во время его изготовления. Для того чтобы избежать этого, следует в спецификации на поставку оборудования четко указать, какая требуется точность;

b) ошибки в горизонтировании радиолокатора при его установке и в установлении нулевого отсчета для угла места в горизонтальной плоскости;

c) расхождения между электрическими и механическими осями следящих антенн, которые, возможно, возникают при ремонте или замене электрических компонентов радиолокатора.

Погрешности могут возникать вследствие погрешностей системы преобразователя, измеряющей угол места радиолокатора по механическому положению следящей антенны.

Систематические погрешности в наклонной дальности могут быть вызваны следующими причинами:

a) задержкой во включении цепи измерения времени и расстояния или неправильной компенсацией задержки сигнала в радиолокационных электронных средствах сопровождения;

b) погрешностью в измерении частоты калибратора расстояния.

Таким образом, системы радиозондирования, работающие без датчиков давления и рассчитанные единственно на радиолокационные измерения высоты, требуют частых проверок и регулировок радиолокаторов в процессе обычной эксплуатации станции. Эти системы непригодны для использования в странах, в которых возможности сервисного технического обслуживания ограничены.

12.4 ДАТЧИКИ ТЕМПЕРАТУРЫ

12.4.1 Основные требования

Лучшие современные датчики температуры должны обладать такой инерцией на изменения температуры, при которой систематическое отклонение от тепловой инерции в ходе подъема радиозонда, обычная скорость подъема 5–6 м·с$^{-1}$, составляло бы менее 0,1 K при прохождении через любой слой толщиной 1 км в тропосфере и менее 0,2 K при прохождении через любой слой толщиной 1 км. Это достигается в большинстве районов наблюдений в случае, когда величина постоянной времени датчика составляет менее 1 с на ранней стадии подъема. Кроме того, датчики температуры должны быть сконструированы таким образом, чтобы по мере возможности избежать погрешностей, возникающих при воздействии прямой или отраженной солнечной радиации. Необходимо обеспечить по возможности наименьшее изменение площади сечения, которая подвергается нагреванию солнцем, когда датчик вращается относительно солнца во время подъема. Теплообмен, связанный с ИК-излучением, необходимо исключить путем использования покрытий для датчиков с низкой излучающей способностью в ИК-области спектра.

Датчики температуры должны быть также достаточно прочными для того, чтобы выдерживать резкие встряхивания во время запуска радиозонда, и достаточно стабильными для того, чтобы сохранять точную калибровку в течение нескольких лет. В качестве основных типов датчиков температуры, используемых на регулярной основе, можно назвать резистивные датчики (например, термисторы, изготовленные из керамических резистивных полупроводников), емкостные датчики и термопары.

Скорость реакции датчика обычно измеряется величиной постоянной времени τ. Она определяется (как и в настоящем томе I, глава 1, 1.6.3) по формуле:

$$dT_e/dt = -1/\tau \cdot \left(T_e - T\right) \qquad (12.14)$$

где T_e — температура датчика и T — действительная температура воздуха.

Таким образом, постоянная времени определяется как время, необходимое для реагирования на какое-либо внезапное изменение температуры на величину 63 %. Постоянная времени датчика температуры прямо пропорциональна теплоемкости и обратно пропорциональна скорости передачи тепла путем конвекции/диффузии от этого датчика. Теплоемкость зависит от объема и материала датчика, в то время

как передача тепла от датчика зависит от площади его поверхности и коэффициента теплопередачи, а также от скорости воздушного потока над датчиком. Коэффициент теплопередачи незначительно зависит от диаметра датчика. Таким образом, величина постоянной времени датчиков температуры, изготовленных из какого-либо заданного материала, приблизительно пропорциональны отношению объема датчика к площади его поверхности. Следовательно, наиболее эффективными для достижения быстрой реакции являются тонкие датчики с большой площадью поверхности. Изменение постоянной времени ответной реакции в зависимости от скорости воздушного потока может быть выражено следующим образом:

$$\tau = \tau_0 \cdot \left(\rho \cdot v\right)^{-n} \tag{12.15}$$

где ρ — плотность воздуха, v — скорость воздушного потока над датчиком и n — константа.

Значение n изменяется от 0,4 до 0,8 в зависимости от формы датчика и от характера воздушного потока (ламинарный или турбулентный). Некоторые величины постоянной времени как устаревших, так и современных типов датчиков температуры при показателях давления 1 000, 100 и 10 гПа и скорости подъема 5 $м \cdot с^{-1}$ представлены в таблице 12.5. Эти значения получены путем объединения результатов лабораторных проверок и результатов сравнений с малоинерционными датчиками при подъеме в ходе испытательных сравнений радиозондов.

Современные термисторы-бусинки, проволочные конденсаторы и термопары имеют малую инерционность, поэтому систематические погрешности, обусловленные тепловой инерцией, должны быть менее 0,05 K в верхней тропосфере для более совершенных датчиков и менее 0,1 K в верхней стратосфере.

В публикации ВМО (WMO, 2011*b*) приводятся примеры, в которых скорости отклика термисторов-бусинок, использованных в радиозондах во время испытаний, были в большинстве случаев близки, или несколько выше значений для термистора с интегральной схемой, представленного в таблице 12.5.

Таблица 12.5. Типичные постоянные времени для радиозондовых датчиков температуры

Датчик температуры	*Начало эксплуатации*	*τ (1 000 гПа)*	*τ (100 гПа)*	*τ (10 гПа)*
Термистор с интегральной схемой,[a] 0,4 x 0,8 x 0,8 мм	2003–	≤ 1	≤ 3	≤ 10
Проволочный термоконденсатор,[a] диаметр 0,1 мм	2002–	0,4	1,1	3
Медь-константановая термопара,[a] диаметр 0,06 мм	1991–	< 0,3	< 0,8	2
Другие современные термисторы-бусинки[a]	2005–	≤ 1	≤ 4	5–12

Примечание:

a Постоянные времени на уровне 10 гПа у термисторов с интегральной схемой в Янцзяне, Китай, были больше, чем у медь-константановой термопары почти на 4 с. Другие небольшие термисторы-бусинки имели постоянные времени, которые были на 3–10 с больше, чем у медь-константановой термопары. Проволочный термоконденсатор имел постоянные времени как минимум 4 с, несколько больше, чем результаты лабораторных испытаний, упомянутых выше. Это может быть связано с тем, что в 2007 г. диаметр проволочного термоконденсатора в радиозондах Vaisala RS92 был увеличен за счет включения кварцевой нити, а также может быть обусловлено программным обеспечением, которое было использовано вместе с датчиком в Янцзяне.

12.4.2 Термисторы

Термисторы обычно изготавливают из керамического материала, сопротивление которого изменяется при изменении температуры. Датчики обладают высоким сопротивлением, которое понижается с абсолютной температурой. Соотношение между сопротивлением R и температурой T может быть выражено приблизительно следующей формулой:

$$R = A \cdot \exp\left(B/T\right) \tag{12.16}$$

где A и B — постоянные величины. Хотя чувствительность к изменениям температуры очень высокая, ответная реакция на изменение температуры далека от линейной, поскольку чувствительность понижается в зависимости от квадрата абсолютной температуры. Поскольку сопротивление термистора является очень высоким и составляет обычно десятки тысяч ом, самонагревание от напряжения, подаваемого на датчик, пренебрежимо мало. Можно изготавливать очень маленькие термисторы и благодаря этому достигать малой инерционности. Нагрев от солнечных лучей у современных термисторов в виде чипа составляет величину около 1°K на 10 гПа.

12.4.3 Термоконденсаторы

Термоконденсаторы обычно изготавливаются из керамического материала, диэлектрическая проводимость которого изменяется при изменении температуры. В качестве керамического материала обычно используется бариево-стронциевый титанат. Температурный коэффициент диэлектрической проводимости этого ферроэлектрического материала составляет порядка 10^{-2} на K. Температурный коэффициент положителен при температурах ниже точки Кюри и отрицателен при температурах выше точки Кюри. Датчики теперь могут иметь диаметр примерно 0,1 мм. Проволочные конденсаторы измеряют изменения емкости между двумя тонкими платиновыми проволоками, разделенными стеклокерамикой (см. Turtiainen, et al., 1995). Такой датчик обладает малой инерционностью и погрешностью, обусловленной нагреванием за счет солнечной радиации, менее 1°K на 10 гПа.

12.4.4 Термопары

В одном из национальных радиозондов используется также датчик температуры с термопарой из меди и константана (WMO, 1989*a*). Для внешнего соединения термопары используется проволока диаметром 0,05 мм, которая обеспечивают датчику возможность очень быстрого реагирования. Соотношение между термоЭДС и разностью температур между датчиком и его эталоном является установленным физическим соотношением. Опорная термопара устанавливается внутри корпуса радиозонда в относительно стабильной температурной среде. Медный резистор используется для измерения этой эталонной температуры. Для получения точных значений температуры необходимо компенсировать паразитную ЭДС, возникающую на дополнительных соединениях между датчиком и находящимися внутри радиозонда опорными термопарами.

12.4.5 Научные приборы зондирования

Два специальных научных датчика зондирования температуры были размещены во время взаимного сравнения ВМО высококачественных систем радиозондирования в Янцзяне, Китай (WMO, 2011*b*):

a) датчик температуры MTR, в котором в качестве чувствительного элемента используется ультратонкая вольфрамовая проволока. Проволока имеет диаметр 0,01 мм, длину 44 см и скручена в спиральную катушку диаметром 0,2 мм с шагом обмотки 0,1 мм. Проволока покрыта алюминием для улучшения отражательной способности и, следовательно, уменьшения нагревания солнцем (см. Shimizu and Hasebe, 2010). Этот датчик имеет меньшую постоянную времени ответной реакции, чем медь-константановая термопара.

b) мульти-термистор, испытанный в Янцзяне, был самостоятельным прибором, основанным на мульти-термисторном радиозонде для точного измерения температуры (ATM) Национального управления по аэронавтике и исследованию космического пространства (НАСА) (см. Schmidlin et al., 1995; WMO, 2006*d*). Система производила измерения при помощи трех алюминированных термисторов, а также одного белого и одного черного термистора. В Янцзяне постоянные времени ответной реакции были близки к тем, которые характерны для современных термисторов-бусинок. На основе измерений пятью датчиками и точных знаний оптических свойств различных покрытий датчиков была определена эталонная температура, а также получены оценки условий солнечного и ИК-излучения. Данная оценка температуры не зависит от какого бы то ни было допущения об обратном рассеянии от поверхности и облаков в отличие от схем коррекции радиозондовой температуры.

Надежность абсолютной калибровки и корректировки на дневное время для этих научных систем в испытаниях в Янцзяне оказались не лучше, чем у работоспособных оперативных радиозондов.

12.4.6 **Размещение датчиков**

Датчики температуры в радиозонде лучше всего размещать над корпусом радиозонда (под корпусом сбрасываемого зонда). Таким образом, воздух, нагреваемый или охлаждаемый при контакте с корпусом радиозонда или держателем датчика, не проходит впоследствии над датчиком. Для долгосрочной стабильности работы это местоположение датчика необходимо точно воспроизводить, и оно не должно изменяться от полета к полету. Этого, как правило, можно достичь путем установки датчика на кронштейне, который поддерживает датчик в необходимом положении в течение всего полета. Для обеспечения хорошего обдува датчиков при низком давлении держатели датчиков и подходящие к ним токоподводы должны быть настолько тонкими, чтобы погрешностями, связанными с нагреванием или охлаждением при прохождении тепла через токоподводы, можно было пренебречь.

При таком методе размещения радиозондовые датчики температуры подвергаются непосредственному воздействию солнечного и ИК-излучения в атмосфере. Датчики поглощают солнечную радиацию при зондировании в дневное время и обмениваются длинноволновым излучением с Землей и атмосферой в любое время суток. Величина погрешностей, связанных с излучением, лишь в незначительной степени зависит от размера и формы датчиков, поскольку размер датчика очень слабо влияет на коэффициент конвективной теплоотдачи. Таким образом, при малых размерах датчика погрешности, обусловленные излучением, будут малы лишь в том случае, когда покрытие датчика выбрано таким образом, чтобы обеспечить низкое поглощение как коротковолновой радиации, так и длинноволнового излучения. Необходимое покрытие можно получить путем нанесения надлежащего тонкого слоя металла. Для многих белых красок характерно высокое поглощение в ИК-области спектра, и они не являются идеальным покрытием для радиозондового датчика.

Еще одним следствием размещения датчика температуры над корпусом радиозонда является то, что при подъеме зонда сквозь атмосферные осадки или облако датчик может покрываться водой или льдом. Чрезвычайно важно, чтобы конструкция датчика предусматривала эффективный отвод воды или льда. Испарение воды или льда с датчика при его попадании из облака в более сухие слои будет приводить к охлаждению датчика до температуры, которая ниже фактической температуры окружающей среды. Поглощающая способность датчика температуры в ИК-области спектра в случае, когда датчик остается покрытым льдом в ходе полета, отличается от обычной. Таким образом, в данных измерений, полученных от покрытого льдом датчика, будет присутствовать аномальная систематическая погрешность в результате теплообмена в ИК-части спектра, особенно при низких давлениях.

12.4.7 **Погрешности измерения температуры**

Погрешности в радиозондах более ранних моделей, которые широко применялись в период 1980–2000 гг., рассмотрены более подробно в публикации WMO (2015*b*).

12.4.7.1 ***Калибровка***

Погрешности в значениях температуры, связанные с калибровкой, во время подъема радиозонда могут быть вызваны:

a) погрешностями калибровки на заводе-изготовителе. Это может порой происходить и является одной из причин, по которой радиозондовые измерения следует проверять на земле до запуска;

b) небольшими изменениями в датчике, такими как паразитная емкость, связанная с емкостными датчиками, или в электрических присоединениях к датчикам;

c) нестабильностью в работе системы преобразователя радиозонда и в опорных резисторах во время хранения или подъема радиозонда. Смещение показаний датчика или электронного преобразователя в ходе хранения, как правило, может быть частично откорректировано во время обработки данных с использованием поправок, основанных на предполетных проверках.

В таблице 12.6 в обобщенном виде представлены данные по сравнительной точности датчиков температуры в ночное время для тех датчиков температуры, которые находились в эксплуатации в 2013 г. Приведенные результаты соответствуют типовым характеристикам, усредненным как минимум по 15 испытательным полетам. Абсолютная погрешность эталона в ночное время, по-видимому, была лучше 0,3 K, а результаты для радиозондов с мульти-термистором НАСА и Sippican находились в хорошем согласии, как следует из анализа погрешностей.

В тех случаях, когда тип датчика характеризуется диапазоном систематических погрешностей, этот диапазон представляет собой разброс в систематических расхождениях, наблюдавшихся в ряде испытаний. Также учитывается диапазон вероятной точности до 30 гПа, оцененный по радиозондовым наблюдениям (WMO, 2003). Поскольку современные датчики имеют алюминированное покрытие, погрешности, связанные с влиянием ИК-излучения, очень незначительны, и любой разброс в точности уменьшается, главным образом, благодаря долгосрочной устойчивости калибровки завода-изготовителя, незначительной нестабильности датчика, возможно, обусловленной структурой атмосферы и внутренней температурой радиозондовой электроники и т. п. В таблице 12.6 трудно выделить самые лучшие системы, поскольку перечисленным датчикам присущи аналогичные погрешности. Воспроизводимость результатов измерений температуры может быть оценена достаточно легко, но пока не представляется возможным установить систематическое отклонение с лучшей точностью, чем показано в таблице. Крупномасштабные испытания в тропиках не дали для систематического отклонения результатов, аналогичных тем, которые были получены в Европе, поэтому приведенные значения представляют усреднение между двумя условиями и диапазон значений охватывает оба набора данных.

В таблице 12.6 погрешности зондирования приводятся только для давления 30 гПа и 10 гПа, поскольку для большинства современных датчиков температуры погрешности зондирования не сильно различаются между поверхностью земли и уровнем 30 гПА, правда, некоторые системы сталкивались с проблемами вблизи тропопаузы (WMO, 2011*b*).

Индийские радиозонды MKIII на протяжении многих лет не обеспечивали качественных измерений температуры, однако в данном случае неудовлетворительная воспроизводимость была следствием не только характеристик датчика, но и нестабильности радиозондовой электроники во время подъема, что приводило к эффективным изменениям в калибровке датчика, так что качество данных ухудшалось

Таблица 12.6. Систематическая погрешность, ошибка радиозонда и погрешность (k = 2) в ночное время по результатам международных сравнений радиозондов ВМО и других испытаний, связанных с ними (с использованием эталонного мульти-термистора АТМ НАСА в качестве произвольного эталона для систематических смещений, при наличии такового)

Датчик температуры	*Систематическая погрешность (K)*				*Погрешность радиозонда*		*Погрешность (k = 2)*		
Давление (гПа)	*300*	*100*	*30*	*10*	*30*	*10*	*100*	*30*	*10*
Стержневой термистор, окрашенный в белый цвет, MRZ (Российская Федерация)	0,2±0,5	0,2±0,5	–0,3 ±0,7	–0,8 ±0,7	1	1	1–1,7	1–2	1,1–2,5
Медь-константановая термопара, Meteolabor (Швейцария)	0,1±0,1	0±0,1	–0,1 ±0,2	–0,1± 0,2	0,3	0,4	0,3–0,4	0,3–0,6	0,4–0,7
Проволочный термоконденсатор, Vaisala RS92 (Финляндия)	0,05 ±0,1	0,05 ±0,1	0,07 ±0,2	0,07 ±0,2	0,2	0,3	0,2–0,4	0,2–0,5	0,3–0,6
Термистор с интегральной схемой, Lockheed Martin Sippican (США)	0±0,1	–0,05 ±0,2	–0,07 ±0,2	–0,07 ±0,2	0,2	0,3	0,2–0,4	0,2–0,5	0,3–0,6
Термистор-бусинка, алюминированный	0±0,2	0,1±0,2	0,1±0,2	0,2±0,2	0,2	0,4	0,2–0,5	0,2–0,5	0,4–0,8
Мульти-термисторы АТМ НАСА, которые использовал Ф. Шмидлин	Считается, что отклонение в пределах ±0,1 K				0,2	0,2	0,2–0,3	0,2–0,3	0,2–0,3

самой системой радиозондирования. Ошибки зондирования для этого радиозонда на 100 гПа лежали в диапазоне от 2 до 4 K на протяжении многих лет (WMO, 2003), несмотря на то, что погрешности, выявленные в ходе фазы II сравнения радиозондов ВМО (WMO, 1987), были гораздо меньше этого.

12.4.7.2 ***Тепловая инерция***

Большинство современных радиозондовых датчиков температуры характеризуется хорошей инерционностью и не требует значительной корректировки на погрешности, обусловленные тепловой инерцией в тропосфере и нижней стратосфере.

12.4.7.3 ***Теплообмен в инфракрасной области спектра***

Большая часть белых красок, используемых для радиозондовых датчиков, обладает сравнительно высокой эмиссионной способностью в ИК-области спектра (> 0,8 мкм). Поэтому теплообмен с фоновым ИК-излучением может приводить к возникновению значительных погрешностей в значениях температуры. Для некоторой заданной вертикальной структуры поля температуры потоки ИК-излучения также будут существенно различаться от полета к полету, в зависимости от наличия облачности в районе подъема

радиозонда. В работе Luers and Eskridge (1998) приводится хороший пример того, как пользователи пытались смоделировать погрешности, возникающие под влиянием солнечного и ИК-излучения на радиозондах, использовавшихся в 1990-х годах.

Погрешности, возникающие под влиянием ИК-излучения, характерны для наблюдений как в дневное, так и в ночное время. О влиянии погрешностей, возникающих в результате теплообмена в инфракрасной области спектра в ночное время, можно судить по данным измерений, проводившихся с помощью стержневых термисторов (используемых на российских радиозондах), которые представлены в таблице 12.6. При высоком давлении значения температуры, полученные с помощью этих датчиков, близки к образцовым. Однако при низком давлении измеренные значения температуры гораздо ниже, чем образцовые. По данным рассматриваемых испытаний при давлении ниже 30 гПа температура радиационного равновесия в ночное время была обычно значительно ниже фактической температуры атмосферы. Следовательно, ИК-излучение датчика температуры превышало ИК-излучение, поглощавшееся датчиком из окружающей атмосферы, и этот датчик охлаждался до температуры ниже фактической. Дополнительная информация о влиянии погрешностей, обусловленныхИК-излучением, в прошлом содержится в публикации WMO (2015*b*).

Использование белой краски на датчиках температуры следует как можно скорее прекратить с тем, чтобы вклад погрешностей, обусловленных ИК-излучением, в систематическую погрешность в измерении температуры был совсем незначительным по всей сети радиозондирования.

12.4.7.4 ***Разогрев солнечной радиацией***

Для всех радиозондовых датчиков температуры характерны погрешности, связанные с разогревом при полетах в дневное время под воздействием приходящей солнечной радиации, в том числе отраженной радиации от облаков и поверхности. В таблице 12.7 представлены различные погрешности в дневное и ночное время, связанные с измерениями температуры при помощи радиозондов, указанных в таблице 12.6. Эти значения в основном являются результатом коррекции с помощью программного обеспечения, которая проводится каждой системой для дневных температур для углов солнца от 30° до 80°. Датчики температуры российских радиозондов имели достаточно слабую теплоизоляцию от опоры, которая могла зачастую разогреваться больше, чем сам датчик, и поэтому российским радиозондам были также присущи большие расхождения между дневными и ночными температурами на высотах.

Во всех современных системах радиозондирования при обработке данных в целях компенсации разогрева солнечной радиацией применяется коррекция с помощью специального программного обеспечения (см. таблицу 12.7). Такие корректирующие схемы обычно разрабатываются на основе специальных исследований расхождения дневных и ночных температур (с учетом реального суточного колебания температуры, вызываемого атмосферными приливами), в сочетании с данными моделей солнечного разогрева и по возможности лабораторных испытаний. Затем соответствующая поправка выражается как функция высоты солнца во время подъема радиозонда. При коррекции можно также учитывать действительную скорость подъема радиозонда, поскольку погрешности, вызванные вентиляцией и разогревом, изменяются, если скорость подъема радиозонда отличается от стандартных условий испытания. При малой высоте солнца (менее 10°) погрешности, обусловленные разогревом, очень чувствительны к ее изменениям. Поэтому в случае, когда корректирующее программное обеспечение не предусматривает обновления данных о высоте солнца во время полета радиозонда, возникают значительные погрешности при коррекции данных, полученных при полетах во время восхода или захода солнца. Простая схема поправок будет эффективно работать только для определенных условий облачности и состояния поверхности и не сможет обеспечить надлежащей коррекции для всех условий полетов, которые могут возникнуть: например, при запуске радиозондов из прибрежных пунктов они нередко оказываются над морем. При ясном небе низкое альбедо поверхности моря приводит к уменьшению отраженной солнечной радиации в два–три раза по сравнению с усредненными

Таблица 12.7. Расхождения между дневной и ночной температурами для выбранных датчиков температуры во время проведения международных сравнений радиозондов ВМО и других связанных с ними испытаний

Датчик температуры	*Систематическая погрешность (K)*			
Давление (гПа)	*300*	*100*	*30*	*10*
Стержневой термистор, окрашенный в белый цвет, MRZ (Российская Федерация)	1	1,8	3,3	5,1
Медь-константановая термопара, Meteolabor (Швейцария)	0,5[a] 0,3[b]	0,75[a] 0,5[b]	1,1[a] 0,75[b]	1,8[a] 1[b]
Термистор с интегральной схемой, Lockheed Martin Sippican (США)	0,3	0,5	0,8	0,95
Проволочный термоконденсатор, Vaisala (Финляндия)	0,15	0,3	0,5	0,8
Термистор-бусинка,[c] алюминированный	0,2–0,5	0,3–1,1	0,4–1,5	0,6–2,3

Примечания:
[a] Как используется в WMO (2011*b*)
[b] С изменениями, внесенными в ходе последующих испытаний (Philipona et al., 2013)
[c] Обзор целого ряда результатов для других систем радиозондирования с использованием термисторов-бусинок в сравнении в Янцзяне (WMO, 2011*b*). См. публикацию WMO (2015*b*), в которой подробно описаны конкретные типы радиозондов, использованные в Янцзяне.

атмосферными условиями во время полета. При таких обстоятельствах поправки, предусмотренные в программном обеспечении и основанные на усредненных условиях, будут завышены минимум на 30 %. С другой стороны, при подъеме радиозондов сквозь мощные слои облаков верхнего яруса с очень высоким альбедо обратное рассеяние может быть гораздо больше, чем обычно, и поправки, предусмотренные программным обеспечением, будут недостаточны.

В таблице 12.8 в обобщенном виде представлены систематические погрешности и погрешности зондирования, присущие большинству современных типов радиозондов. Для систематических погрешностей, полученных во время испытания в Янцзяне, Китай (WMO, 2011*b*), было сделано предположение, что нулевое систематическое отклонение в Янцзяне находилось посредине между Vaisala/MODEM и LMS/мульти-термистором на 30 и 10 гПа. Это связано с тем, что последующие испытания в США не выявили существенных погрешностей в мульти-термисторной системе, которая использовалась в Янцзяне, то есть, имелись некоторые реальные атмосферные дневные колебания в величине температуры между 30 и 10 гПА в Янцзяне, и их вероятная амплитуда составляла около 0,15 K. В оценках диапазона систематической погрешности в таблице 12.8 было сделано допущение, что стандартизованные корректирующие схемы в программном обеспечении дают разброс возможных систематических отклонений ±30 %. Во время одного испытания радиозонда радиационные условия (облачность, альбедо поверхности) обычно сильно не меняются, так что создается иллюзия, что полученное систематическое отклонение характеризуется небольшими ошибками. Однако испытание, проведенное в другом месте, может дать систематические ошибки, которые отличаются гораздо больше, чем на ошибку зондирования, обнаруженную во время отдельного испытания.

Значения погрешности радиозонда больше в дневное время, чем в ночное, для всех радиозондов (см. таблицы 12.6 и 12.8). Во время подъема радиозонды вращаются и раскачиваются как маятник, подвешенный к газонаполненной оболочке, и поэтому сечения поглощения датчика меняются по мере того, как датчик вращается. Кроме того, воздух, нагревающийся при соприкосновении либо с держателями датчика, либо с корпусом радиозонда, время от времени обтекает внешний датчик. Если такие возможные явления не исключить при проектировании (например, если датчик температуры устанавливается вблизи корпуса радиозонда, скажем, посередине от верхней до нижней

Таблица 12.8. Систематическая погрешность, погрешность зонда и погрешность (k = 2) в дневное время для выбранных датчиков температуры во время проведения под эгидой ВМО международных сравнений радиозондов и других связанных с ними испытаний, и по результатам оперативного мониторинга, представленным в публикации ВМО (WMO, 2003)

Датчик температуры	*Систематическая погрешность (K)*			*Ошибка радиозонда*			*Погрешность (k = 2)*		
Давление (гПа)	*100*	*30*	*10*	*100*	*30*	*10*	*100*	*30*	*10*
Стержневой термистор, окрашенный в белый цвет, MRZ (Российская Федерация)	0,7±0,5	0,5±1	–0,7 ±1,3	1	1,2	1,5	1,2–2,2	1,2–2,7	1,5–3,5
Медь-константановая термопара, Meteolabor (Швейцария)	–0,2[a] –0,05[b]	–0,5[a] –0,2[b]	–0,8[a] 0[b]	0,4	0,4	0,8	0,6	0,9	1,5
Проволочный термоконденсатор, Vaisala (Финляндия)	0±0,2	–0,2 ±0,2	–0,3 ±0,3	0,4	0,4	0,4	0,4–0,7	0,4–0,9	0,4–0,9
Термистор с интегральной схемой, Lockheed Martin Sippican (США)	–0,1 ±0,2			0,3	0,3	0,4	0,3–0,6	0,3–0,8	0,4–1,0
Термистор-бусинка,[c] алюминированный	0,1±0,2	0±0,3	0±0,5	0,4–0,8	0,4–1,3	0,4–1,7	0,5–1,0	0,8–1,6	0,4–2,3
Мульти-термистор	±0,2	±0,2	±0,3	0,3	0,3	0,4	0,3–0,5	0,4–0,6	0,4–0,7

Примечания:

[a] Как используется в WMO (2011*b*)

[b] С изменениями, внесенными в ходе последующих испытаний (Philipona et al., 2013)

[c] Обзор целого ряда результатов для других систем радиозондирования с использованием термисторов-бусинок в сравнении в Янцзяне (WMO, 2011*b*). См. публикацию WMO (2015*b*), в которой подробно описаны конкретные типы радиозондов, использованные в Янцзяне.

точки корпуса), то можно получить гораздо более значительные погрешности радиозонда в дневное время. Отраженная радиация колеблется от полета к полету с изменением облачности и это также вносит вклад в погрешности зондирования в дневное время.

Когда устанавливают температурные датчики над его держателем, воздух, который нагревается при контакте с держателем проходит над датчиком, как маятник, приводя к положительным всплескам в показаниях температуры в ходе движения радиозонда по кругу во время полета Подобные всплески могут достигать 1 K на уровне 10 гПа. Эти всплески, вызванные разогревом, могут быть легко выявлены в ходе полета радиозонда на подвесках, используемых в международных сравнениях радиозондов ВМО, поскольку радиозонды вращаются во время полета определенным закономерным образом. В этой ситуации применение соответствующих методов фильтрации полученных значений температуры может устранить до некоторой степени такие положительные всплески. Таким образом фильтрация для базовых наблюдений нескольких систем должна учитываться при изучении погрешностей в измерении температуры радиозондами в дневное время.

Диапазон систематических ошибок для измерений в дневное время, представленный в таблице 12.8, должен быть наименьшим для систем радиозондирования с наименьшими расхождениями в измерениях в дневное и ночное время. Учитывая, что в большинстве случаев увеличение неопределенности в измерениях в дневное и ночное время связано с неправильным положением датчика относительно корпуса радиозонда и неудачной конструкцией держателя датчика, есть надежда, что большая часть современных радиозондов, которым присущи более значительные погрешности и расхождения в дневное и ночное время, как показано в таблице 12.7, будут доработаны в течение нескольких лет после взаимного сравнения в Янцзяне. Таким образом результаты сравнения в Янцзяне отображают состояние дел с точностью датчиков в конкретный момент времени, а радиозонды, которым были присущи значительные систематические ошибки в Янцзяне, будут модифицированы в той или иной степени в течение нескольких лет после завершения испытания. Например, радиационные погрешности швейцарских радиозондов были пересмотрены в ходе дополнительного испытания и поправка на солнечный разогрев теперь уменьшена, как показано ниже. Это позволит исключить отрицательное отклонение, которое было выявлено в результатах для дневного времени, полученных ВМО (WMO, 2011*b*) и представленных в таблице 12.8.

Взаимные сравнения ВМО проводились с радиозондами, которые подвешивались по крайней мере 30 м, а чаще всего 40 м ниже оболочки. Однако во многих национальных сетях, например, в Китае, Японии и Российской Федерации, использовались еще более низкие подвесы, что дает дополнительные смещения в дневное время и большие погрешности зондирования по сравнению с теми, которые приводятся в таблицах 12.7 и 12.8, особенно при давлении ниже 30 гПа.

12.4.7.5 *Осаждение льда или воды на датчике*

Еще одним источником возникновения погрешностей при измерении температуры является осаждение воды или льда на датчике температуры. Это явление ведет к психрометрическому охлаждению (эффект смоченного термометра) датчика температуры, как только относительная влажность атмосферы при подъеме радиозонда становится ниже 100 %. Если датчик устроен так, что вода или лед скапливаются на нем, вместо того чтобы быстро удаляться, то значительная часть данных измерений температуры во время подъема может оказаться искаженной. В ночное время наличие слоя льда на датчике приводит к тому, что алюминированный датчик начинает вести себя как окрашенный в черный цвет датчик в ИК-области спектра, что при низком давлении приводит к значительному охлаждению в обычно наблюдающихся условиях.

Более того, когда вода, накопившаяся на датчике, замерзает по мере попадания датчика в более холодные слои воздуха, выделение скрытой теплоты приводит к повышению температуры до 0 °C. Если датчик сначала покрывается льдом, а затем перемещается в более теплые слои воздуха, температура не поднимется выше 0 °C до тех пор, пока лед не растает. Таким образом, к результатам измерений близким к 0 °C во влажных условиях в изотермических слоях следует относиться с некоторой осторожностью.

12.4.7.6 *Вопросы репрезентативности*

Вопросы репрезентативности рассматриваются в WMO (2015*b*).

12.5 ДАТЧИКИ ОТНОСИТЕЛЬНОЙ ВЛАЖНОСТИ

12.5.1 Общие аспекты

Оперативные измерения относительной влажности по всему миру характеризуются широким разбросом точности (от хорошей до неудовлетворительной), поскольку датчики всех типов, перечисленные в таблице 12.10, по-прежнему использовались в некоторых

национальных сетях в 2013 г. Наиболее широко используется двойной емкостный тонкопленочный датчик. Этот датчик устанавливается снаружи без всякой защиты на кронштейне, который удерживает его над корпусом радиозонда. Другие современные емкостные тонкопленочные датчики, как правило, крепятся тоже на кронштейне, но имеют алюминированное покрытие, защищающее датчик влажности от загрязнения осадками и сводящее к минимуму нагревание от солнечной радиации. Угольные гигристоры обычно устанавливаются в какого-нибудь рода защитной шахте внутри радиозонда. Применение угольных гигристоров сокращается. Датчики из животной пленки отличаются значительной неточностью и ограниченными возможностями измерения по вертикали для того, чтобы удовлетворять требованиям современных пользователей, однако они все еще используются в одной национальной сети. Датчик из животной пленки также устанавливается в какую-нибудь шахту.

Хорошие современные радиозондовые датчики относительной влажности должны измерять относительную влажность с полезной точностью при всех температурах от 40 °C до приблизительно –70 °C. Температуры вблизи тропической и субтропической тропопаузы ниже, чем эти температуры, и радиозондовые датчики могут производить полезные измерения при этих температурах при условии, что применятся определенные поправки (см. ниже). Однако наиболее надежным практическим методом измерения содержания водяного пара при таких низких температурах является гигрометр точки инея (см. Vömel et al. (2007*a*) и результаты взаимного сравнения высококачественных систем радиозондирования (WMO, 2011*b*)). Таблица 12.9 представляет диапазон значений давления насыщенного водяного пара по отношению к поверхности воды, который должен быть достижим для возможности проведения измерений относительной влажности на всех уровнях. Для измерений при температуре ниже 0 °C датчики относительной влажности должны быть откалиброваны таким образом, чтобы сообщать значение относительной влажности по отношению к поверхности воды.

Насыщение по отношению к воде не может быть измерено при температурах значительно ниже –50 °C, поэтому изготовители должны использовать одну из приведенных ниже формул для расчета давления насыщенного пара по отношению к воде при наиболее низких температурах — Wexler (1976, 1977), Hyland и Wexler (1983) или Sonntag (1994), — а не уравнение Гоффа-Гратча, которое рекомендовано в более ранних публикациях ВМО. Давление насыщенного пара в ледяных облаках при наиболее низких температурах в верхней тропосфере тропиков составляет около 50 % давления насыщенного пара по отношению к поверхности воды, приведенного в таблице 12.9.

Таблица 12.9. Колебания давления насыщенного водяного пара над поверхностью воды в зависимости от температуры согласно работе Sonntag (1994)

Температура (°C)	*Давление насыщенного пара (гПа)*
40	73,9
30	42,5
15	17,1
0	6,1
–15	1,92
–30	0,51
–45	0,112
–60	0,0195
–75	0,0025
–90	0,00023
–100	0,000036

Успешное функционирование радиозондового датчика относительной влажности сильно затруднено при очень низких температурах и давлении. Свободный обмен молекулами воды между датчиком и атмосферой затруднен при понижении температуры. Кроме того, загрязнение датчика от воздействия высоких концентраций водяного пара в начале подъема может привести к существенному систематическому отклонению при наиболее низких температурах. Например, если положительное систематическое отклонение в 5 % относительной влажности вызвано загрязнением при –60 °C, то это дает положительное систематическое отклонение в 40 % при –75 °C, если загрязнение не устранено вентилированием.

В нижней стратосфере и верхней тропосфере измерения водяного пара должны оцениваться на основе коэффициента перемешивания и относительной влажности. На рисунке 12.4 представлены колебания температуры, относительной влажности и коэффициента перемешивания с высотой, которые были измерены четырьмя различными радиозондовыми датчиками в ходе взаимных сравнений высококачественных систем радиозондирования ВМО (WMO, 2011*b*). Непосредственно под тропопаузой относительная влажность была несколько выше, чем насыщение, однако коэффициент перемешивания водяного пара был близким к минимальному и быстро падал с температурой, как и следовало ожидать из таблицы 12.9. Там, где температура растет над тропопаузой, два датчика относительной влажности с большей инерционностью (серая линия) дали гораздо более высокие коэффициенты перемешивания водяного пара чем реально можно было ожидать. Скорректированный датчик и гигрометр с охлаждаемым зеркалом (черная линия) показывает непродолжительный максимум коэффициента перемешивания водяного пара непосредственно над тропопаузой. Маловероятно, что так в самом деле и происходит, и это говорит о том, что относительная влажность, передаваемая с черных датчиков, в этом слое между 48,4 и 50-й минутой завышена приблизительно в 2,5 раза. Возможно, это результат искажения, связанного с полезной нагрузкой или областью зондирования радиозонда, а не вопрос калибровки. Искажение могло произойти и раньше во время полета радиозонда с 33-й по 38-ю минуту после прохождения мощного слоя перистых облаков, обнаруженных радиолокатором (не показано на рисунке 12.4).

Скорость реагирования датчиков относительной влажности можно записать в виде:

$$dU_e/dt = -1/\tau \cdot (U_e - U) \qquad (12.17)$$

где U_e — относительная влажность, передаваемая датчиком, U — фактическая относительная влажность и τ — инерционность датчика.

Все осложняется еще и тем, что датчик относительной влажности передает относительную влажность для температуры самого датчика. Если она отличается от истинной температуры атмосферы, то вносится дополнительная погрешность из-за тепловой инерции датчика влажности по отношению к температуре воздуха. Современные датчики влажности изготавливают гораздо меньшими по размеру по сравнению с радиозондами более старого образца для того, чтобы свести к минимуму эту проблему, и температура датчика в любом случае измеряется напрямую во многих, если не во всех, современных широко распространенных радиозондах.

Инерционность датчика относительной влажности во время подъема радиозонда возрастает гораздо быстрее, чем инерционность датчика температуры. Это видно из таблицы 12.10, в которой представлены приблизительные значения величины постоянной времени для двух датчиков старого образца и трех современных типов датчика. В случае датчика из животной пленки приведенная инерционность относится к изменениям относительной влажности от 70 до 30 %. Инерционность датчиков с животной пленкой при заданной температуре значительно возрастает при очень высокой или очень низкой относительной влажности. Значения для двойного емкостного тонкопленочного датчика (Vaisala RS92) в этой таблице отличаются от тех, которые приводятся в работе Miloshevich et al. (2004), и были взяты из уточненных данных, предоставленных заводом-изготовителем.

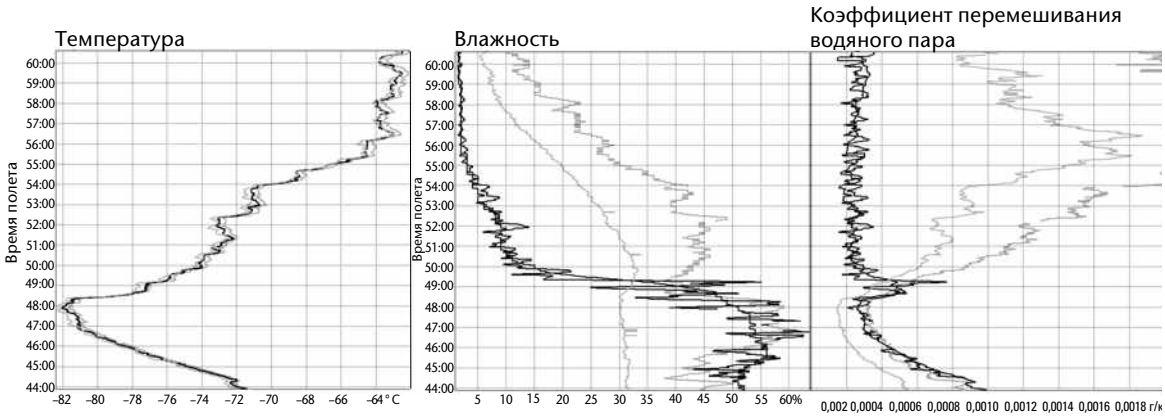


Рисунок 12.4. Температура, относительная влажность и коэффициент перемешивания водяного пара, представленные как функция времени от начала полета, по результатам полета 56 во время взаимного сравнения под эгидой ВМО высококачественных систем радиозондирования. Измерения, представленные серым цветом, производились радиозондами с емкостными датчиками и не корректировались на большую инерционность. Черные линии соответствуют измерениям при помощи обогреваемого двойного емкостного датчика (с коррекцией на постоянную времени) и гигрометра точки инея (гигрометр точки инея характеризуется более значительными колебаниями со временем в относительной влажности и коэффициенте перемешивания, чем двойной обогреваемый емкостный датчик).

Таблица 12.10. Инерционность τ (в секундах) датчиков относительной влажности

Датчик влажности	*Используется*	τ *при 20 °C*	τ *при 0 °C*	τ *при –20 °C*	τ *при –40 °C*	τ *при –70 °C*
Двойной емкостный тонкопленочный датчик без колпачка	2004	< 0,15	0,4	2	10	80
Другие емкостные тонкопленочные датчики с колпачком	2000–	0,1–0,6	0,6–0,9	4–6	15–20	150–300[a]
Угольный гигристор	1960–	0,3	1,5	9	20	ненадежный
Животная пленка	1950–	6	20	100	> 300	не используется
Криогенный гигрометр точки инея, CFH	2003– для научных целей		< 2[b]	< 4[b]		< 25
Гигрометр с охлаждаемым зеркалом Snow White в ночное время	1996– для научных целей		< 2[b]	< 4[b]		< 25

Примечания:

[a] Значения, полученные во время сравнения с гигрометрами в ходе взаимного сравнения под эгидой ВМО высококачественных систем радиозондирования (WMO, 2011*b*); могут быть проблемы с вентиляцией колпачков, защищающих датчик.

[b] Значение, оцененное по полетному сравнению с наиболее качественными радиозондовыми датчиками относительной влажности, из публикации WMO (2011*b*).

На рисунках 12.5 и 12.6 представлены два профиля температуры и относительной влажности, измеренных с помощью радиозонда. Рисунок 12.5 иллюстрирует подъем радиозонда в Соединенном Королевстве, когда были объединены результаты измерений от двух различных датчиков. Резкие изменения относительной влажности с высотой происходят во время многих полетов и наблюдались и здесь для радиозондов обоих типов. Очень сухие слои, в частности, связаны с температурной инверсией. Наличие этих очень сухих слоев признается правильным, однако в прошлом они рассматривались как ошибочные, потому что датчики старого образца не могли осуществлять их измерения корректно. В данном случае скорость изменения относительной влажности с высотой над самой нижней инверсией составляла 6 % относительной влажности в секунду. Таким образом, современные датчики дают преимущества для тех, кому нужны подробные

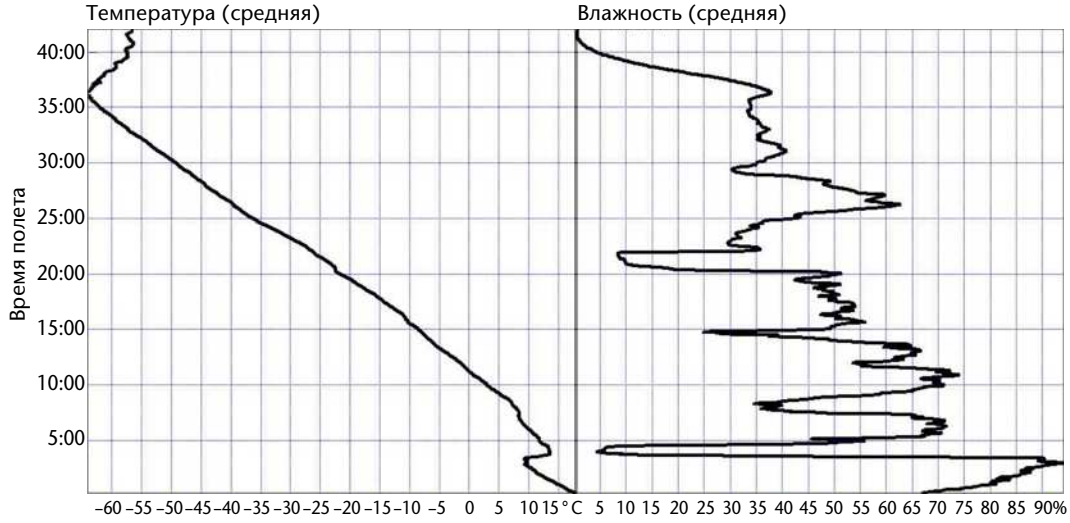


Рисунок 12.5. Средние значения параллельных измерений в первых интервалах двумя радиозондами, подвешенными вместе под одной оболочкой; измерения проводились в ночное время.

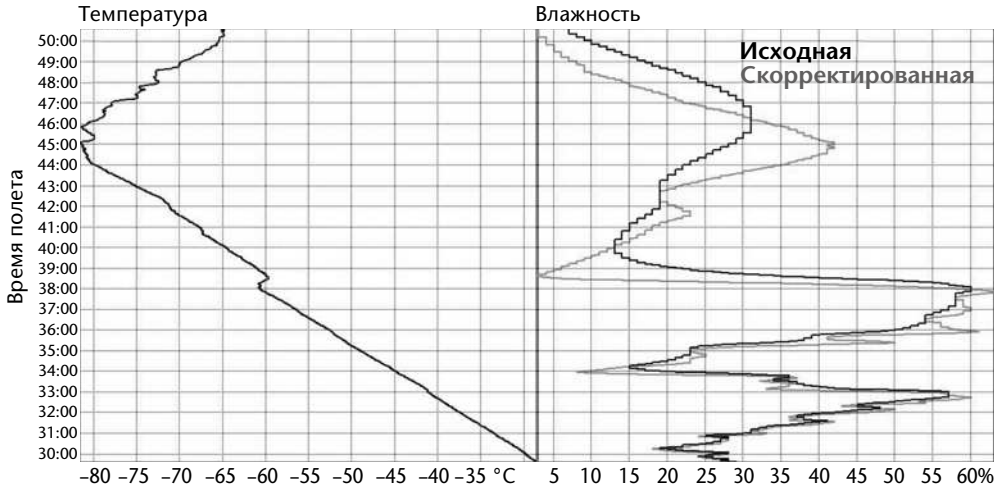


Рисунок 12.6. Измерения при помощи двойного тонкопленочного емкостного датчика в верхней тропосфере в ночное время в Янцзяне, Китай, представлены как функция времени от начала полета, при этом профиль влажности измерялся напрямую датчиком (черная кривая), а затем вносились поправки, учитывающие погрешности, обусловленные инерционностью датчика (серая кривая).

данные о колебаниях коэффициента преломления атмосферы с высотой, что имеет значение для распространения радиоволн. На средних уровнях часто наблюдаются скорости изменения, равные 3 % относительной влажности в секунду.

В работе Miloshevich et al. (2004) предложен метод коррекции для большой инерционности датчика, измеряющего влажность, на основе следующего уравнения:

$$U = U_e(t_2) - U_e(t_1) \cdot X / (1 - X) \qquad (12.18)$$

где U — относительная влажность окружающей среды, U_e — сообщаемые датчиком значения относительной влажности для времен t_1 и t_2, при этом считается, что U не изменяется существенным образом между t_1 и t_2 (ограничение размера временного шага), и $X = e^{-(t_2 - t_1)/\tau}$, где τ — инерционность датчика относительной влажности.

Для того, чтобы алгоритм давал удовлетворительные результаты, используемые данные должны быть свободны от аномальных данных, шума и т. п. Поэтому контроль качества (КК) в том или ином виде должен быть применен к основным данным наблюдений и поправкам (например, на нагревание датчика влажности под воздействием солнечной радиации) до того, как будет проведена коррекция для инерционности датчика. Эта коррекция не может исправить все детали вертикального профиля относительной влажности с гораздо более высоким разрешением, чем инерционность датчика. Она дает сглаженный вертикальный профиль с более высокими, чем в исходных измерениях, скоростями изменения относительной влажности, однако к любой детали профиля на временных шагах гораздо меньших инерционности датчика следует относиться с осторожностью. Как следует из работы Miloshevich et al. (2004), для конкретного исходного измерения существует немало возможных ответов, согласующихся с известными постоянными времени отклика. Тип сглаживания, применяемый к исходным данным, влияет на полученный профиль, поэтому применяемое сглаживание должно быть отражено в документах, и допущения, сделанные при использовании алгоритма, должны быть объяснены пользователям.

Из примеров, продемонстрированных в Янцзяне (WMO, 2011*b*, приложение D), был сделан вывод, что для регистрации структуры относительной влажности вблизи тропической тропопаузы система измерения давления должна иметь инерционность 3 мин или выше с тем, чтобы поправки на большую инерционность не были слишком большими и не увеличивали погрешность, обусловленную шумом в измерениях или водным/ледяным загрязнением.

Рисунок 12.6 иллюстрирует величину поправок в профиле относительной влажности для датчика с инерционностью около 80 С при –70 °С, которая наблюдалась в тропической верхней тропосфере в ходе взаимного сравнения высококачественных систем радиозондирования в Янцзяне, Китай (WMO, 2011*b*). Скорректированный профиль явно гораздо более сглаженный, чем профили относительной влажности, измеренные в верхней тропосфере гигрометром с охлаждаемым зеркалом и представленные на рисунке 12.4. В Янцзяне, где применялись поправки на инерционность, результат выглядел более правдоподобным приблизительно в 65 % случаев и совсем неправильным в остальных случаях. Представляется обоснованной необходимость дальнейшего тестирования поправок и сглаживания такого типа.

Во время испытаний в Янцзяне самые высокие скорости изменения, которые наблюдались на границе тропосферы и стратосферы, составляли 30 % относительной влажности за 30 секунд. Таким образом на сегодняшний день даже самые малоинерционные радиозондовые датчики относительной влажности не способны определить истинную высоту, на которой происходит резкое падение влажности в тропической тропопаузе без коррекции. Поправки для высоты на верхней границе влажного слоя в Янцзяне

составляли от 200 до 500 м. Однако в Янцзяне были два научных прибора, которые имели меньшую инерционность и могли лучше определять высоту, когда датчики исправно функционировали (см. таблицу 12.10).

12.5.2 Емкостные тонкопленочные датчики

Емкостные тонкопленочные датчики используются в настоящее время в большинстве конструкций современных радиозондов. Принцип действия этих датчиков основан на изменчивости диэлектрической проницаемости полимерной пленки в зависимости от давления водяного пара в окружающей среде. Нижний электрод конденсатора формируется путем протравливания покрытой металлом стеклянной пластинки, имеющей размеры 5 на 3 мм или 4 на 1,5 мм и толщину 0,5 или 0,2 мм. Зачастую приходится идти на компромисс в отношении толщины, поскольку более тонкая пленка имеет меньшую инерционность при низких температурах, но видимо, меньшую устойчивость функционирования со временем. Верхний электрод напыляется вакуумным методом на поверхности этого полимера и является проницаемым для водяного пара. Зависимость емкости датчика от относительной влажности представляет собой почти линейную функцию; зависимость калибровки от температуры незначительна. Эти датчики всегда крепятся на кронштейне, который обеспечивает положение датчика над радиозондом или на значительном расстоянии от корпуса радиозонда сбоку.

Калибровка этих датчиков относительной влажности зависит от температуры. Для того чтобы точность, заявленная для данного датчика при комнатной температуре в лаборатории, сохранялась и при полете радиозонда через большую часть тропосферы, необходимо проводить коррекцию этой зависимости при обработке данных наземной системой.

Загрязнение в результате воздействия дождя, капель воды в облаках или обледенения необходимо устранять в том случае, если для датчика не предусмотрено никакого защитного колпачка. Это можно обеспечить обогреванием датчика до температуры значительно выше температуры окружающей среды. Применяют также двойные датчики, в которых в то время, когда один датчик проводит измерение, другой подогревается, а затем охлаждается для нормальной работы (Paukkunen, 1995). Двойные датчики крепятся на расстоянии 1 см друг от друга. Эти датчики имеют тонкое гидрофобное покрытие для сведения к минимуму загрязнения от жидкой воды. Когда солнечный свет попадает прямо на датчики и их держатели, датчики влажности разогреваются по сравнению с истинной температурой, особенно в верхней тропосфере. Этот эффект нагревания необходимо компенсировать для того, чтобы обеспечить точные измерения влажности. Один из возможных методов заключается в прямом измерении температуры датчика влажности и использовании этой информации для компенсации. В более ранних версиях системы таких датчиков печатная плата не имела покрытия с высокой отражательной способностью, и датчик влажности слишком нагревался в верхней тропосфере в дневное время. Поэтому позднее все поверхности держателя были алюминированы и впервые такой образец был испытан на Маврикии (WMO, 2006*a*), а затем уже протестирован как прибор для эксплуатации на сети в Янцзяне, Китай (WMO, 2011*b*). Вначале изготовитель рекомендовал пользователям использовать этот датчик вместе с корректирующим программным обеспечением для большой инерционности при низких температурах и поправкой на солнечный разогрев датчика в дневное время. Однако большинство последних версий программного обеспечения для системы, предоставляемого изготовителем, предусматривает применение этих поправок автоматически по умолчанию.

В ходе взаимного сравнения высококачественных систем радиозондирования ВМО (WMO, 2011*b*) четыре радиозонда использовали другой датчик, изготовленный E+E Elektronik. Этот датчик всегда имел защитный колпачок для сведения к минимуму загрязнения. Как правило, колпачок имеет покрытие с высокой отражательной способностью, так что датчик не нагревается слишком сильно в дневное время в верхней тропосфере. Держатели датчика и колпачок не должны быть гигроскопичными, в противном случае газовыделение с этих поверхностей приведет к существенным погрешностям. Некоторые изготовители применяют поправки для

большой инерционности. Для данного датчика погрешности, связанные с большой инерционностью, больше, чем в двойных датчиках. Большинство радиозондов, использующих этот датчик, имеют дополнительный термистор для того, чтобы измерять температуру датчика влажности напрямую, а не применять допущение, что датчик влажности находится при той же температуре, что и скорректированный датчик температуры.

12.5.3 **Угольные гигристоры**

Угольные гигристоры изготавливаются путем внедрения тонко измельченных частиц угля в гигроскопическую пленку. Современный вариант этого датчика представляет собой полистироловую ленту (примерно 1 мм толщиной, 60 мм длиной и 18 мм шириной), покрытую тонкой гигроскопической пленкой, содержащей частицы угля. Вдоль каждой стороны этого датчика размещены электроды. Изменение относительной влажности окружающей среды приводит к изменению размеров гигроскопической пленки, при этом по мере увеличения влажности возрастает сопротивление. Сопротивление при относительной влажности 90 % примерно в 100 раз больше, чем при относительной влажности 30 %. При обработке данных может проводиться коррекция с учетом температурной зависимости. Датчики обычно устанавливаются в шахте внутри радиозонда с целью сведения к минимуму влияния атмосферных осадков и предотвращения прямого нагревания датчика солнцем.

При производстве этот тип датчиков имеет воспроизводимые калибровочные характеристики, поэтому зависимость датчиков от температуры не нужно определять на индивидуальной основе. Гигристоры следует подвергать, как правило, на месте их изготовления, воздействию многих сезонных циклов при разных значениях относительной влажности и комнатной температуре, с тем чтобы впоследствии уменьшить гистерезис в этом датчике при подъеме радиозонда. Сопротивление датчика во время его изготовления может быть отрегулировано до стандартного значения путем удаления части угольного покрытия с пленки. В этом случае значению измеряемой величины могут соответствовать определенные стандартные значения сопротивления для конкретных условий, и датчики в радиозондах станут взаимозаменяемыми без необходимости дальнейшей калибровки. Этот датчик должен храниться в опечатанном виде вплоть до момента его использования, а во время установки этого датчика в радиозонде нельзя прикасаться к гигроскопической поверхности пленки.

Необходимо отметить, что датчики этого типа, по всей видимости, не отличаются стабильной калибровкой при высокой влажности, и воспроизводимость результатов их измерений часто бывает неудовлетворительной при низкой влажности. В ходе взаимного сравнения датчиков влажности ВМО (WMO, 2006*b*), было продемонстрировано, что, если датчики (поставляемые основным изготовителем гигристоров) выдерживали при высокой влажности на протяжении нескольких часов, то калибровка датчика необратимо изменялась. Кроме того, датчики не обеспечивали измерения низкой влажности (менее 20 %) воспроизводимым образом (Wade, 1995), и измерения при помощи этих датчиков заставляли многих метеорологов ошибочно считать, что относительная влажность ниже 20 % не наблюдается в нижней тропосфере.

12.5.4 **Датчики из животной пленки**

Датчики из животной пленки (пленка из брюшины быка) все еще используются. При изменении влажности от 0 до 100 % длина элемента из животной пленки изменяется на 5–7 %. Хорошие результаты могут быть получены при температуре выше –20 °C, однако при более низкой температуре скорость ответной реакции датчиков становится чрезвычайно низкой (см. таблицу 12.10). При низкой влажности датчики из животной пленки также испытывают отрицательные последствия значительного гистерезиса.

Животная пленка, используемая в датчиках влажности, должна быть однослойной и нелакированной, толщиной примерно 0,03 мм. Эта пленка должна быть закреплена

с натяжением примерно в 20 г·см$^{-1}$ (на сантиметр ее ширины) и в таком натянутом состоянии должна быть выдержана в течение нескольких часов в насыщенной атмосфере. Для сведения к минимуму гистерезиса рекомендуется помещать датчик в насыщенную атмосферу на 20 минут как перед калибровкой, так и перед использованием. Калибровка должна проводиться в ходе цикла изменений относительной влажности при переходе от влажных условий к сухим. Во время полета радиозонда датчик должен быть защищен от воздействия дождя.

Инерционность этого датчика гораздо больше значений, указанных в таблице 12.10, при очень высоких и очень низкой влажности (McIlveen и Ludlam, 1969). Таким образом, трудно избежать большой систематической погрешности в данных измерений датчиками из животной пленки во время подъема радиозонда (занижение при высокой влажности, завышение — при низкой влажности) даже в нижней тропосфере.

12.5.5 Научные приборы зондирования

Во время взаимного сравнения высококачественных систем радиозондирования в Янцзяне, Китай (WMO, 2011*b*) были успешно испытаны два специальных научных прибора для измерения содержания водяного пара. Эти системы по существу не были такими же надежными, как оперативные радиозонды, тем не менее, когда они работали исправно, они были исключительно полезны для выявления ограничений оперативных радиозондов.

a) Криогенный гигрометр точки инея (CFH) (Vömel et al., 2007*a*) представляет собой гигрометр с охлаждаемым зеркалом. В гигрометре используется контур обратной связи, предназначенный для активного регулирования температуры небольшого зеркала, которое покрывается льдом (или росой в нижней тропопаузе). В контуре обратной связи оптический детектор определяет количество льда, покрывающего зеркало, и регулятор с обратной связью регулирует температуру зеркала таким образом, что количество льда остается постоянным.

   Когда регулятор с обратной связью работает исправно, температура зеркала равна температуре точке инея, а если отсутствует загрязнение льдом/водой, тогда и температуре атмосферы. Впускные патрубки криогенного гигрометра точки инея изготовлены из нержавеющей стали, имеют длину 17 см и диаметр 2,5 см и расположены непосредственно над и под самим гигрометром. Это сделано для того, чтобы загрязнение от воздуха, проходящего через гигрометр, было минимальным, и результаты испытаний в Янцзяне подтвердили, что загрязнение криогенного гигрометра точки инея ниже, чем гигрометра с охлаждаемым зеркалом Snow White в верхней тропосфере и нижней стратосфере.

   Инерционность прибора колеблется от нескольких секунд в нижней тропосфере, увеличиваясь с высотой до 20–30 с в стратосфере. Таким образом, в нижней тропосфере инерционность не отличается от лучших оперативных радиозондов. Однако в верхней тропосфере и нижней стратосфере инерционность меньше, чем у лучших эксплуатируемых радиозондов. Основная погрешность измерений при помощи CFH связана со стабильностью и дрейфом регулятора с обратной связью. Общая погрешность измерений оценивается в 0,5 K для температуры точки росы или точки инея, что соответствует приблизительно 9 % относительной влажности в тропической тропопаузе и 4 % относительной влажности в нижней тропосфере.

   В криогенном гигрометре точки инея используется холодная жидкость при температуре ниже –100 °C для охлаждения зеркала во время полета. Подготовка и охлаждение этой жидкости до полета требует обучения и знания техники безопасности во избежание причинения вреда здоровью.

   Для схем коррекции (солнечного разогрева, инерционности), применяемых к измерениям относительной влажности оперативными радиозондами в верхней тропосфере, было полезным сравнение с результатами измерений с помощью криогенного гигрометра точки инея, например, неопубликованные сравнения в

рамках Проекта по проверке достоверности результатов измерения содержания водяного пара в верхней тропосфере и нижней стратосфере по линии Фонда по изучению проблем атмосферы и биосферы Лапландии в Соданкюла, Финляндия (2004), и взаимное сравнение аэрологических методов в Линденберге, Германия (2008).

b) Гигрометр «Snow White» также основан на принципе охлаждаемого зеркала для измерения содержания водяного пара (Fujiwara et al., 2003). Но в нем используется охладитель Пельтье для охлаждения зеркала. Существует два варианта размещения системы. В дневное время гигрометр-зеркало устанавливается в шахту измерительной системы. Такая конфигурация не исключает загрязнения, что сказывается на точности измерений при температурах ниже –50 °C, и она была применена всего в нескольких полетах в Янцзяне. При ночном варианте гигрометр-зеркало крепился над корпусом радиозонда. Таким образом гигрометр-зеркало ночью имел недостаточную прямую защиту от загрязнения, но был очень удачно размещен для измерения условий окружающей среды. В Янцзяне система «Snow White» в ночное время измеряла температуры точки росы до –75 °C в 70 % ночных полетов. Во время двух дневных полетов произошло сильное загрязнение в условиях приближающейся грозы после полудня, а вот в ночное время измерительные системы «Snow White» не подвергались загрязнению в верхнем ярусе облаков, поскольку тогда условия подъема были благоприятны для функционирования датчиков «Snow White». Однако в Янцзяне загрязнение вокруг корпуса гигрометра ограничивало использование измерительной системы «Snow White» высотами ниже 18 км, непосредственно над тропической тропопаузой. Система «Snow White» имеет те же преимущества, что и криогенный гигрометр точки инея в отношении инерционности, которая гораздо меньше, чем у оперативных датчиков влажности в верхней тропосфере.

Необходимо присутствие квалифицированного оператора, который способен распознать, когда зеркальная пленка переходит с водной фазы в ледяную (вместе с системой «Snow White» в полете необходимо использовать хороший оперативный датчик влажности). Оператор должен быть способен обнаружить возможные виды неисправностей (такие как исчезновение ледяной пленки на зеркале) в средней или верхней тропосфере. Умение обнаружить, когда происходят искажения в измерениях гигрометра, требуется как для системы «Snow White», так и криогенного гигрометра точки инея.

Два гигрометра с охлаждаемым зеркалом имеют преимущество перед датчиками относительной влажности в том, что они более чувствительны в верхней тропосфере и нижней стратосфере до самых низких температур, при условии, что данные измерений с искажениями распознаются и исключаются. Измерения этими приборами, кроме этого, не имеют существенных различий в точности в дневное и ночное время. Поэтому использование измерений данных датчиков в качестве рабочих эталонов оказалось наилучшим методом выявления таких расхождений. Сравнение с измерениями при помощи охлаждаемого зеркала позволило разработать процедуры коррекции или изменить оперативные процедуры в целях обеспечения оперативных измерений более высокого качества в средней и верхней тропосфере.

Размещение датчиков в шахте не является лучшим методом наблюдения за структурой относительной влажности во время дождя и низкой облачности, поэтому необоснованно считать датчики с охлаждаемым зеркалом более надежными, чем самые лучшие датчики оперативных радиозондов в нижней тропосфере.

12.5.6 **Размещение датчиков**

При подъеме радиозонда обычным является быстрое изменение относительной влажности на более чем 25 %. Для точных измерений необходимо, чтобы датчики

влажности хорошо вентилировались, а кроме того, были по возможности защищены от оседания на их поверхности или на их держателях воды или льда, а также от нагревания солнцем.

Таким образом, датчики относительной влажности небольшого размера, такие как емкостные тонкопленочные датчики, устанавливаются на внешнем кронштейне. Датчик может накрываться небольшим защитным колпачком или датчик может периодически подвергаться нагреву для уменьшения искажения показаний датчика от воздействия воды или льда из облака или тумана. Конструкция защитного колпачка может иметь очень большое значение, ведь необходимо, чтобы колпачок не мешал датчику влажности хорошо вентилироваться воздухом во время подъема радиозонда.

Более крупные датчики устанавливали обычно во внутренней шахте или в большой защитной шахте сверху или на боковой стороне корпуса радиозонда. Следует проверить, позволяет ли конструкция шахты обеспечивать приток воздуха в шахту, достаточный для надлежащей вентиляции датчика во время подъема радиозонда. В конструкции шахты должно предусматриваться как можно более быстрое удаление воды и льда при прохождении радиозонда через облака или сильные атмосферные осадки. Шахта должна защищать датчик от приходящего солнечного излучения и в значительной степени от рассеянного солнечного излучения. Конструкция шахты должна быть особенно тщательно продумана, если крайне важно избежать загрязнения в облаках верхнего яруса.

Защитные оболочки или покрытия шахты не должны изготавливаться из гигроскопических материалов. Примерами могут служить входные патрубки криогенных гигрометров точки инея, которые изготавливаются из нержавеющей стали, или алюминированные держатели датчиков на некоторых эксплуатируемых радиозондах.

12.5.7 **Погрешности измерений относительной влажности**

Погрешности в радиозондах более раннего образца, которые широко использовались с 1980 по 2000 гг., рассматриваются более подробно в публикации WMO (2015*b*).

12.5.7.1 ***Общие аспекты***

Оперативные датчики относительной влажности были значительно усовершенствованы по сравнению с датчиками, которые применялись до 1980-х годов, особенно при низких температурах в средней и верхней тропосфере. Результаты наблюдений за относительной влажностью ниже –40 °C не передавались большинством более ранних систем радиозондирования, а сообщаемые значения относительной влажности при таких температурах не очень широко использовались приблизительно до 2000 г.

Оперативная оценка пользователями в реальном масштабе времени результатов радиозондовых измерений относительной влажности не очень распространена и необходимо разработать методы предоставления информации изготовителям о калибровочной точности датчиков. Например, им могут быть предоставлены данные об относительной влажности, которую сообщал прибор во время прохождения через облако нижнего яруса, или направлены статистические данные о предполетных проверках. При испытаниях радиозондов не следует исходить из предположения, что погрешность измерений одинакова для всех диапазонов относительной влажности. Неодинаковая точность по диапазону относительной влажности была отмечена для многих систем во взаимном сравнении высококачественных систем радиозондирования ВМО (WMO, 2011*b*). Вместе с тем, более совершенные системы в настоящее время обеспечивают гораздо более ровные измерения, чем наблюдалось в начале проведения серии сравнений радиозондов в 1984 г. В ходе изготовления калибровка индивидуальных датчиков часто осуществляется лишь при нескольких (менее трех) заранее установленных значениях относительной влажности и зачастую лишь при одном значении температуры (см., например, Wade, 1995). Во многих случаях температурная зависимость калибровки датчика не проверяется для отдельных датчиков или партий датчиков, а считается

соответствующей характеристике, определенной в ходе ограниченного числа испытаний. Калибровка датчиков относительной влажности из различных партий часто различается на несколько процентов, как это можно видеть из данных измерений в облаках нижнего яруса (Nash et al, 1995). Это может быть результатом неправильной процедуры калибровки во время изготовления датчиков. Например, характеристики реального датчика в какой-либо выбранной партии могут отличаться от стандартных характеристик калибровки, соответствующих предварительно установленным в ходе испытаний значениям влажности. С другой стороны, это может быть результатом различий в стабильности датчиков из разных партий во время хранения. Помимо этого, толщина пленки в некоторых емкостных тонкопленочных датчиках не всегда одинаковая, и датчики большей толщины иногда не так хорошо реагируют на изменения влажности при низких температурах, в то время как большинство датчиков того же типа эффективно реагируют в тех же условиях.

В нижеследующих разделах погрешности сначала рассматриваются для температур выше –20 °C, при которых ожидается, что и более ранние и более новые датчики работают надежно. До 1990 г. большинство используемых радиозондов имели существенные проблемы с измерениями при температурах ниже –30 °C. Поэтому применительно к более современным типам датчиков погрешности рассматриваются для температурных диапазонов от –20 °C до –50 °C, в которых эти датчики работают боле надежно, а затем для температур от –50 °C до –70 °C, при которых только новейшие датчики относительной влажности могут реагировать с остаточной скоростью, чтобы обеспечивать полезные измерения. Анализ далее подразделяется на рассмотрение точности в дневное и ночное время. Измерения в ночное время совсем не обязательно будут более надежными, чем измерения в дневное время, поскольку во многих случаях существует более высокий шанс загрязнения вокруг датчика в ночное время, если вентиляция недостаточно хорошая, в то время как днем нагревание солнцем среды, окружающей датчик, уменьшает большую часть искажений или дает компенсирующее небольшое отклонение в дневной влажности.

Значения давления водяного пара обычно получают путем умножения давления насыщенного пара, рассчитанного по радиозондовому значению температуры, на измеренное с помощью радиозонда значение относительной влажности. Если температура датчика относительной влажности не соответствует температуре, полученной с радиозонда, то значение содержания водяного пара (и, следовательно, точки росы) будет ошибочным. В районе тропопаузы, где температура уменьшается с высотой, температура, определяемая датчиком влажности, будет выше, чем температура воздуха. Если температура датчика влажности выше истинной температуры на 0,5 K при температуре близкой к 20 °C, то относительная влажность, передаваемая датчиком будет составлять около 97 % истинной относительной влажности. Это приведет к погрешности –1,5 % при относительной влажности 50 %. По мере того, как температура уменьшается до –10 °C, а затем до –30 °C, та же самая температурная инерция датчика приводит к уменьшению передаваемой относительной влажности до 96 %, а затем до 95 % истинной величины.

Систематические погрешности в данных измерений относительной влажности могут возникать из-за изменений в калибровке при хранении датчиков. Это может быть связано просто со старением датчика или накоплением химического загрязнения, когда загрязнение занимает места, которые обычно бывают открыты для молекул водяного пара. Скорость, с которой происходит загрязнение, может зависеть от химических веществ, использованных для изготовления корпуса радиозонда или упаковки, и ее нельзя считать одной и той же, если со временем меняется процесс изготовления корпуса радиозонда или печатных плат. Обязательно следует тщательно выполнять инструкции изготовителя в отношении хранения датчиков и их подготовки к использованию. Например, очень важно проводить перед запуском процедуру предполетной проверки с использованием датчика Vaisala RS92, поскольку это устраняет накопленное химического загрязнения и тем самым препятствует небольшим искажениям в начале подъема.

12.5.7.2 ***Относительная влажность в ночное время для температур выше –20 °C***

В таблице 12.11 в обобщенном виде представлены данные о систематических расхождениях в относительной влажности при температурах выше –20 °C в ночное

Таблица 12.11. Систематические расхождения, погрешности радиозонда и погрешность (k = 2) радиозондовых измерений относительной влажности в ночное время при температурах выше –20 °C

Датчик влажности	*Систематическое отклонение (% ОВ)*			*Ошибка радиозонда*			*Погрешность (k = 2)*		
Относительная влажность (% ОВ)	*80–90*	*40–60*	*10–20*	*80–90*	*40–60*	*10–20*	*80–90*	*40–60*	*10–20*
Животная пленка, MRZ (Российская Федерация) и RS3 (СК)[a]	–8	–1	9	12	18	16	20	19	25
Угольный гигристор, VIZ MKII (США)	4–10	–4–4	–20–10	10	4–16	6–20	14–20	4–20	6–40
Двойной тонкопленочный термистор, Vaisala RS92 (Финляндия)	1±2[d]	0±2	0±2	3	5	3	3–6	5–8	3–5
Тонкопленочный термистор, используемый в LMS-6[b] (США)	–1±2	1±3	2±2	3	5	3	4–6	6–9	5–9
Другие тонкопленочные емкостные датчики[c]	3±2	6±3	2±2	4	5	3	5–9	8–14	3–7
Система «Snow White», Meteolabor (Швейцария)	–1	–1	–1	4	5	3	5	6	4
CFH (США/ Германия)	4[e]	3[e]	0	8	7	2	13	10	2

Примечания:
[a] В анализе использовались только данные, полученные в сухих условиях.
[b] Применяется датчик E+E Elektronik производства Австрии.
[c] Обзор результатов, полученных другими системами радиозондирования без существенных конструкционных недостатков во время проводимого в Янцзяне сравнения (WMO, 2011*b*). См. публикацию WMO (2015*b*), где подробно описаны конкретные типы радиозондов, испытанных в Янцзяне.
[d] Использована информация из работы Miloshevich et al. (2009), а также результаты других испытаний, проведенных ВМО и СК.
e CFH, по-видимому, имел положительное отклонение на низких уровнях во время сравнения ВМО (2011*b*), что было аналогично ситуации, описанной в работе Miloshevich et al. (2009).

время между наиболее широко используемыми датчиками, которые испытывались во время международного сравнения радиозондов ВМО. Результаты, представленные в таблице 12.11, ограничены только ночными полетами для того, чтобы исключить проблемы, связанные с нагреванием под воздействием солнечной радиации. С более подробными результатами проводившихся ранее тестов можно ознакомиться в работе Nash et al. (1995). С 1984 г. до 2000 г. характеристики датчика Vaisala RS80 A-Humicap использовались в качестве эталонного прибора, связывающего между собой данные более ранних испытаний в рамках сравнения радиозондов ВМО. В более поздних испытаниях в Бразилии и Маврикии в качестве рабочего образца также использовался конденсационный гигрометр Meteolabor «Snow White». Во взаимном сравнении высококачественных систем радиозондирования ВМО в Янцзяне, Китай, проводили измерения как с помощью системы «Snow White», так и криогенного гигрометра точки инея, и систематичная погрешность эталона в этих испытаниях была порядка ±2 % температурного диапазона, как видно из таблицы 12.11.

Сравнительные данные в таблице 12.11 свидетельствуют о том, что инерционность большинства тонкопленочных емкостных датчиков и угольных гигристоров была близкой и достаточно малой для того, чтобы не допустить существенного систематического отклонения от отклика датчика с большой инерционностью. Датчик из животной пленки способен реагировать достаточно хорошо на быстрые изменения в средних значениях относительной влажности при этих температурах. Тем не менее очень большая инерционность этого датчика при высоких и низких значениях влажности способствует большим систематическим расхождениям, как видно из таблицы 12.11, причем измеренные значения слишком низкие при высокой относительной влажности и слишком высокие при низкой относительной влажности.

Результаты, приведенные для угольного гигрометра VIZ MKII, указывают на широкие диапазоны погрешности, особенно при очень низкой влажности. Результаты отличались друг от друга в зависимости от того, были ли погодные условия засушливыми, или в целом очень влажными (особенно в присутствии жидкой воды в облаке или дожде). Как представляется, это происходило потому, что калибровка данного нового гигристора также изменялась, когда условия были очень влажными (в облаке), приводя к существенному отклонению в сторону занижения влажности при низких значениях влажности. Предложенные изменения в алгоритмах, особенно при низкой влажности, не привели к устойчивому улучшению качества измерений. В радиозонде LMS-6, который является последующей версией после VIZ MKII, используется емкостный датчик. Угольные гигристоры использовались последние десять лет в Индии и Китае.

Начиная с 2005 г., большинство современных датчиков влажности демонстрируют более высокую устойчивость и защиту от загрязнения водой в облаках (эффекты загрязнения обычно носят непродолжительный характер и не приводят к постоянным смещениям во время подъема) и лучшую воспроизводимость результатов от серии к серии. Таким образом результаты, полученные в сухих и влажных условиях, теперь можно совмещать, за исключением случаев очень сильного дождя, когда ни одна система не работает надежно. Таким образом для более совершенных типов датчиков погрешности ($k = 2$) в диапазоне от 5 до 10 % представляются достижимыми по всему диапазону относительной влажности.

12.5.7.3 ***Относительная влажность в дневное время для температур выше –20 °C***

В таблице 12.12 в обобщенном виде представлены систематические расхождения, погрешности радиозонда и погрешности радиозондовых измерений относительной влажности для температур выше –20 °C. Эта таблица содержит только информацию о современных конструкциях датчиков влажности.

Сравнение с наблюдениями методом дистанционного зондирования, проводимыми в районе выпуска радиозонда (используя микроволновые радиометры или измерения водяного пара с помощью ГСОМ), подтвердили, что существуют расхождения в измерениях относительной влажности современными радиозондами в дневное и ночное время, например, см. работы Turner et al., 2003; и публикации ВМО (WMO, 2006*a*, 2011*b*). Разница между измерениями в дневное и ночное время может быть также оценена независимо на основе данных недавних сравнений с гигрометром системы «Snow White», поскольку данные измерений этим гигрометром днем и ночью относительно хорошо согласуются между собой при температуре выше –40 °C.

Ситуация с Vaisala RS92 изменилась в 2006 г., когда существенные доработки конструкции держателя датчика позволили добиться изменения точности измерений в дневное время. Более ранние варианты конструкции имели незащищенную печатную плату непосредственно на держателе. Эти держатели нагревались гораздо в большей степени, чем алюминированные поверхности, и это приводило к большему разогреву воздуха, проходящего над датчиками влажности. Было сделано заключение, что вследствие этого возникают проблемы, и ко времени проведения сравнения радиозондов ВМО на Маврикии (WMO, 2006*a*) держатели датчика были полностью алюминированы и полученные тогда результаты приведены в примечании (d) в таблице 12.12. Таким образом, измерения, описанные в работе Vömel et al. (2007*b*), которые проводились с

Таблица 12.12. Систематические расхождения, погрешности радиозонда и погрешность (k = 2) радиозондовых измерений относительной влажности в дневное время при температурах выше –20 °C

Датчик влажности	*Систематическое отклонение (% ОВ)*			*Ошибка радиозонда*			*Погрешность (k = 2)*		
Относительная влажность (% ОВ)	*80–90*	*40–60*	*10–20*	*80–90*	*40–60*	*10–20*	*80–90*	*40–60*	*10–20*
Угольный гигристор, VIZ MKII (США)	–2±4	–3±6	0±10	*7*	*7*	10	*7–13*	*7–16*	10–20
Сдвоенный тонкопленочный термистор, Vaisala RS92 (Финляндия)	–9±2[c] –3±2[d] 1±2[e]	 –3±2[d] 0±2[e]	 –1±2[d] –1±2[e]	4 4 4	4 4 4	2 2 2	11–15 5–9 *5–7*	 5–9 *4–6*	 3–5 3–5
Тонкопленочный термистор, LMS-6[a] (США)	–3±2	0±3	0±2	4	4	2	*7–9*	*4–7*	*2–4*
Другие тонкопленочные емкостные датчики[b]	1±2	2±2	0±2	4	4	3	*4–7*	4–8	3–5
Snow White, Meteolabor (Швейцария)	–1	–1	–1	4	8	4	5	*9*	5
CFH (США/ Германия)	1	1	0	8	8	2	*9*	*9*	*2*

Примечания:

[a] Применяется датчик E+E Elektronik производства Австрии.

[b] Обзор результатов, полученных другими системами радиозондирования без существенных конструкционных недостатков во время проводимого в Янцзяне сравнения (WMO, 2011*b*). См.публикацию ВМО (WMO, 2015), где подробно описаны конкретные типы радиозондов, испытанных в Янцзяне.

[c] Vaisala RS92 заводского производства с незащищенной печатной платой на держателе датчика относительной влажности; значения для тропиков из Vömel et al. (2007*b*).

[d] Vaisala RS92 с полностью алюминированными держателями, но без поправки на нагревание под воздействием солнечной радиации (WMO, 2006*a*).

[e] Vaisala RS92 с полностью алюминированным держателем датчика и поправкой на нагревание под воздействием солнечной радиации в тропиках (WMO, 2011*b*).

первоначальной версией RS92 (примечание (c)), характеризовались более значительными отклонениями в сторону занижения влажности, чем те, которые наблюдались на Маврикии. И хотя алюминирование не устранило полностью проблему, связанную с нагреванием под воздействием солнечного излучения, оно все-таки уменьшило величину этого эффекта. Очевидно, это было важнейшим шагом вперед в уменьшении погрешности измерения относительной влажности в дневное время при более высоких температурах датчиком компании «Vaisala». Во взаимном сравнении высококачественных систем радиозондирования ВМО в Янцзяне, Китай (WMO, 2011*b*) использовалось программное обеспечение для коррекции отрицательного отклонения, обусловленного нагревом под воздействием солнечного излучения.

Таким образом, измерения при помощи двойного тонкопленочного емкостного датчика были оптимизированы только после того, как программное обеспечение, использованное в сравнении в Янцзяне, было внедрено в оперативную практику во всем мире, а

погрешности в дневных измерениях были гораздо хуже, чем в ночных измерениях до тех пор, пока новые модификации аппаратного и программного обеспечения не были внедрены после 2006 г.

Однако в целом погрешности ($k = 2$) в более совершенных датчиках в диапазоне от 5 до 10 % вполне достижимы по всему диапазону относительной влажности, и расхождения в систематической погрешности ночных и дневных измерений обычно бывают небольшими в этом температурном диапазоне

12.5.7.4 *Относительная влажность в ночное время для температур от –20 до –50 °C*

В таблице 12.13 в обобщенном виде представлены данные о систематических расхождениях, погрешности радиозонда и погрешности радиозондовых измерений относительной влажности в ночное время для температур от –20 °C до –50 °C. Для большинства систем радиозондирования, спроектированных до 2000 г., точность датчика относительной влажности, как правило, зависела от условий, которые наблюдались в начале полета, и значения, полученные в более ранних испытаниях в этом температурном диапазоне, не очень хорошо воспроизводились, даже в том случае, когда исключались и не рассматривались мощные облака и дождливые условия.

Если двойные тонкопленочные емкостные датчики и емкостные датчики LMS имели небольшие систематические погрешности, то этого нельзя сказать о других типах радиозондов в Янцзяне, в которых недостаточная вентиляция датчика под защитным колпачком приводила к повышенному положительному отклонению в измерениях при высокой и средней относительной влажности. Не все датчики влажности в Янцзяне могли обеспечить погрешности ($k = 2$) в диапазоне от 5 до 10 % относительной влажности во влажных условиях, которые наблюдаются в этом температурном диапазоне.

12.5.7.5 *Относительная влажность в дневное время для температур от –20 до –50 °C*

В таблице 12.14 в обобщенном виде представлены данные о систематических расхождениях, погрешности радиозонда и погрешности радиозондовых измерений относительной влажности в дневное время для температур в диапазоне от –20 °C до –50 °C.

Систематические погрешности в измерениях при помощи двойного тонкопленочного емкостного датчика в дневное время характеризовались более значительными отрицательными отклонениями в дневное время, чем при более высоких температурах, как показано в таблице 12.12. Только примерно в 2011 г. эти отклонения в сторону занижения влажности в измерениях двойного тонкопленочного емкостного датчика удалось устранить, и большие погрешности в измерениях были уменьшены до значений, наблюдаемых в ночное время, как показано в таблице 12.13.

В дневное время другие датчики в ходе испытаний в Янцзяне не демонстрировали существенных отклонений в положительную сторону по сравнению с емкостным датчиком LMS в ночное время, как показано в таблице 12.13. Однако в этом температурном диапазоне в дневное время было труднее добиться, чтобы оперативные радиозонды производили измерения с погрешностью ($k = 2$) от 5 до 10 % во всех условиях.

Две системы радиозондирования в Янцзяне продемонстрировали очень большие погрешности как днем, так и ночью из-за проблем с конструкцией датчика, и еще одна система имела большие погрешности радиозонда только в дневное время, связанные с неправильной ориентацией датчика влажности. Поэтому обеспечение хорошей точности в этом диапазоне потребовало значительных испытаний и устранения ошибок проектирования, которые не обязательно влияют на измерения при более высоких температурах (см. публикацию WMO, 2015*b*).

Таблица 12.13. Систематические расхождения, погрешности радиозонда и погрешность (k = 2) радиозондовых измерений относительной влажности в ночное время при температурах от –20 до –50 °C

Датчик влажности	*Систематическое отклонение (% ОВ)*			*Ошибка радиозонда*			*Погрешность (k = 2)*		
Относительная влажность (% ОВ)	*60–80*	*40–60*	*10–20*	*60–80*	*40–60*	*10–20*	*60–80*	*40–60*	*10–20*
Угольный гигристор, VIZ MKII (США)[a]	–5–0	–10 to –4	–20–10	10	8	7	10–15	12–18	17–27
Сдвоенный тонкопленочный термистор, Vaisala RS92 (Финляндия)	1±3[d]	0±3	0±2	6	6	4	6–10	6–9	4–6
Тонкопленочный термистор, используемый в LMS-6[b] (США)	–1±2	1±3	2±2	6	6	4	6–9	6–10	4–8
Другие тонкопленочные емкостные датчики[c]	3±10	7±8	4±4	6	8	4	6–19	8–23	4–8
Snow White, Meteolabor, (Швейцария)	–2	–1	3	6	8	4	8	9	7
CFH (США/ Германия)	2	1	0	5	5	5	7	6	5

Примечания:

[a] В анализе используются только данные, полученные в сухих условиях.

[b] Применяется датчик E+E Elektronik производства Австрии.

[c] Обзор результатов, полученных другими системами радиозондирования без существенных конструкционных недостатков во время проводимого в Янцзяне сравнения (WMO, 2011*b*). См. публикацию WMO (2015*b*), где подробно описаны конкретные типы радиозондов, испытанных в Янцзяне.

[d] Использована информация из работы Miloshevich et al. (2009), а также результаты других испытаний, проведенных ВМО и СК.

12.5.7.6 ***Относительная влажность в ночное время для температур от –50 до –70 °C***

В таблице 12.15 представлены данные о систематических расхождениях, погрешности радиозонда и погрешности (k = 2) радиозондовых измерений в ночное время при температуре от –50 °C до –70 °C только для современных датчиков. Эти датчики/системы измерений отличаются по инерционности. Все они имеют постоянные времени, которые больше оптимальной в верхней тропосфере/нижней стратосфере в тропиках, при этом некоторые из них медленнее реагируют при –60 °C, а другие при –80 °C. Гигрометры с охлаждаемым зеркалом могут работать с достаточно хорошей скоростью при таких низких температурах, и это позволило получить фактические данные о скорости реагирования оперативных датчиков.

Погрешности радиозонда в таблице 12.15 при –60 °C в целом в два раза больше, чем погрешности при температурах выше –20 °C, представленные в таблице 12.19, при этом исключение составляют CFH, которые отличаются более воспроизводимыми измерениями в верхних слоях атмосферы, чем в нижней тропосфере. Эталонное значение, использованное в таблице 12.15 для систематических погрешностей, нельзя определить лучше, чем ±4 %, поскольку все датчики, включая CFH, (из-за возможного искажения) имеют свои недостатки. Поправки на инерционность датчиков, которые были внесены

Таблица 12.14. Систематические расхождения, погрешности радиозонда и погрешность (k = 2) радиозондовых измерений относительной влажности в дневное время при температурах от –20 до –50 °C

Датчик влажности	*Систематическое отклонение (% ОВ)*			*Ошибка радиозонда*			*Погрешность (k = 2)*		
Относительная влажность (% ОВ)	*60–80*	*40–60*	*10–20*	*60–80*	*40–60*	*10–20*	*60–80*	*40–60*	*10–20*
Угольный гигристор, VIZ MKII (США)[a]	–8	–9	±10	10	8	7	18	17	7–17
Сдвоенный тонкопленочный термистор, Vaisala RS92 (Финляндия)	–16±4[d] –7±2[e] 2±2[f]	–5±2[e] 3±2[f]	–3±2[e] –1±2[f]	6 6 6	4 4 4	2 2 2	16–24 11–15 6–10	7–11 5–9	3–7 2–5
Тонкопленочный термистор, используемый в LMS-6[b] (США)	–2±2	–3±3	0±2	6	8	2	6–10	8–14	2–6
Другие тонкопленочные емкостные датчики[c]	–3±2	0±3	1±3	7	6	4	7–12	6–9	4–8
Snow White, Meteolabor (Швейцария)	0	1	1	6	8	4	8	9	7
CFH (США/ Германия)	2	1	0	5	5	5	7	6	5

Примечания:

[a] В анализе используются только данные, полученные в сухих условиях.

[b] Применяется датчик E+E Elektronik производства Австрии.

[c] Обзор результатов, полученных другими системами радиозондирования без существенных конструкционных недостатков во время проводимого в Янцзяне сравнения (WMO, 2011*b*). См. публикацию WMO (2015*b*), где подробно описаны конкретные типы радиозондов, испытанные в Янцзяне.

[d] Vaisala RS92 заводского производства с незащищенной печатной платой на держателе датчика относительной влажности; значения для тропиков из Vömel et al. (2007*b*).

[e] Vaisala RS92 с полностью алюминированными держателями, но без поправки на нагревание под воздействием солнечной радиации (WMO, 2006*a*).

[f] Vaisala RS92 с полностью алюминированным держателем датчика и поправкой на нагревание под воздействием солнечной радиации в тропиках (WMO, 2011*b*).

для Vaisala RS92 в 2011 г., изменили систематическое отклонение всего лишь на +0,5 % ОВ в диапазоне относительной влажности от 40 до 60 % и 1,2 % ОВ в диапазоне от 20 % до 40 %. При анализе результатов взаимного сравнения высококачественных систем радиозондирования ВМО некоторые полеты CFH и Snow White пришлось отбраковать из-за технических проблем. Следует напомнить, что систематические погрешности в таблице 12.15 представляют собой непосредственно сами расхождения в относительной влажности, а не процентное отношение измеряемой относительной влажности.

Из таблицы 12.15 следует, что, возможно, только две системы радиозондирования оказались способны обеспечить измерения относительной влажности с погрешностью в диапазоне от 6 до 12 % в ночное время при температурах от –50 °C до –70 °C при наличии облачности или без нее. В публикации ВМО (WMO, 2015*b*) показано, что еще четыре системы могли обеспечивать измерения в диапазоне от 10 до 20 %

При очень низкой влажности в стратосфере ожидаемая погрешность зондирования CFH составляет около 2 % при измерении 10 % относительной влажности и 0,4 %

Таблица 12.15. Систематические расхождения, погрешности радиозонда и погрешность (k = 2) радиозондовых измерений относительной влажности в ночное время при температурах от –50 до –70 °C в тропосфере

Датчик влажности	*Систематическое отклонение (% ОВ)*		*Ошибка радиозонда*		*Погрешность (k = 2)*	
Относительная влажность (% ОВ)	*40–60*	*20–40*	*40–60*	*20–40*	*40–60*	*20–40*
Двойной тонкопленочный термистор, Vaisala RS92 (Финляндия)	0±4[c]	1±3	*7*	4	*7–11*	4–8
Тонкопленочный термистор, используемый в LMS-6[a] (США)	1±4	–1±3	12	14	12–17	14–18
Другие тонкопленочные емкостные датчики[b]	4±6	5±4	12±8	12±8	6–30	5–29
Snow White, Meteolabor (Швейцария)	–3±3	–2	9	8	9–15	10
CFH (США/Германия)	*2*	*2*	*5*	3	*7*	*5*

Примечания:
[a] Применяется датчик E+E Elektronik производства Австрии.
[b] Обзор результатов, полученных другими системами радиозондирования без существенных конструкционных недостатков во время проводимого в Янцзяне сравнения (WMO, 2011*b*). См. публикацию WMO (2015*b*), где подробно описаны конкретные типы радиозондов, испытанных в Янцзяне.
[c] Использована информация из работы Miloshevich et al. (2009), а также результаты других испытаний ВМО и СК.

при измерении 2 % относительной влажности, в то время как ошибки оперативных радиозондов остаются близкими к значениям, приведенным в таблице 12.15, и следовательно, не подходят для стратосферных измерений, в которых доли процента относительной влажности имеют существенное значение для передаваемого коэффициента перемешивания водяного пара.

12.5.7.7 *Относительная влажность в дневное время для температур от –50 до –70 °C*

В таблице 12.16 представлены систематические отклонения, погрешности радиозонда и погрешности для измерений в дневное время в области температур с центром –60 °C. Погрешности радиозонда в дневное время были аналогичны или немного меньше, чем погрешности радиозонда в ночное время. Таким образом любое увеличение погрешности радиозонда в результате нагревания под воздействием солнечной радиации компенсировалось уменьшением какого-нибудь другого источника ошибок в ночное время, например, загрязнения. Судя по всему, что структуры по вертикали были аналогичны в дневное и ночное время, но по-видимому погрешности, связанные с инерционностью, были больше в ночных условиях, что возможно повлияло на разницу в погрешностях радиозонда днем и ночью.

Системой с наиболее выраженным отклонением в отрицательную сторону в дневное время был прибор Vaisala RS92 в своем первоначальном виде. Датчики температуры нагревались как непосредственно в результате нагревания датчика влажности под воздействием солнечной радиации, так и воздухом, который нагревался от незащищенных медных поверхностей на держателях близко от датчика, а затем проходил над датчиком. Другие системы в основном имеют алюминированные покрытия, и прямой нагрев под воздействием солнечной радиации не является особой проблемой. Однако воздух, который нагревается при прохождении над держателями и пластиком не влияет

Таблица 12.16. Систематические расхождения, погрешности радиозонда и погрешность (k = 2) радиозондовых измерений относительной влажности в дневное время при температурах от –50 до –70 °C в тропосфере

Датчик влажности	*Систематическое отклонение (% ОВ)*		*Ошибка радиозонда*		*Погрешность (k = 2)*	
Относительная влажность (% ОВ)	*40–60*	*20–40*	*40–60*	*20–40*	*40–60*	*20–40*
Двойной тонкопленочный термистор, Vaisala RS92 (Финляндия)	–22±4[c] –12±3[d] 3±3[e]	–14±4 –7±3 0±3	5 5 5	3 3 3	23–31 14–20 5–11	13–21 7–13 3–6
Тонкопленочный термистор, используемый в LMS-6[a] (США)	–4±3	–3±3	8	10	9–15	10–16
Другие тонкопленочные емкостные датчики[b]	–2±6	–1±5	9±3	11±2	6–20	9–19
CFH (США/Германия)	2	1	5	5	7	6

Примечания:

[a] Применяется датчик E+E Elektronik производства Австрии.

[b] Обзор результатов, полученных другими системами радиозондирования без существенных конструкционных недостатков во время проводимого в Янцзяне сравнения (WMO, 2011*b*). См. публикацию WMO (2015*b*), где подробно описаны конкретные типы радиозондов, испытанных в Янцзяне.

[c] Vaisala RS92 заводского производства с незащищенной печатной платой на держателе датчика относительной влажности; значения для тропиков из работы Vömel et al.(2007*b*).

[d] Vaisala RS92 с полностью алюминированными держателями, но без поправки на нагревание под воздействием солнечной радиации (WMO, 2006*a*).

[e] Vaisala RS92 с полностью алюминированным держателем датчика и поправкой на нагревание под воздействием солнечной радиации в тропиках (WMO, 2011*b*).

на температуру датчика влажности. Некоторые изготовители, такие как Lockheed Martin Sippican и InterMet, предлагают измерение температуры датчика влажности специальным датчиком. Во время самых последних испытаний для прибора Vaisala RS92 предусматривалась коррекция в программном обеспечении для учета нагревания, аналогично системе Graw (WMO, 2011*b*, приложение D). Передаваемые значения в облаках при очень низкой температуре для обеих систем были выше в дневное время, чем в ночное время, и гораздо выше, чем у датчиков системы «Snow White» или CFH. Таким образом, на сегодняшнем этапе вполне вероятно, что поправки, применяемые к оперативным радиозондам, могут содержать ошибки, особенно в облачных условиях, хотя поправки все-таки делают систематические отклонения более близкими к истинным значениям по сравнению с измерениями без коррекции (см. результаты Vaisala).

Как следует из таблицы 12.16, в 2011 г., по всей видимости, только две системы радиозондирования могли обеспечивать измерения относительной влажности с погрешностью в диапазоне от 6 до 12 % в дневное время при температурах от –50 °C до –70 °C независимо от того, была облачность или нет (при условии, что двойные тонкопленочные емкостные датчики имеют весь набор поправок, примененных в Янцзяне). В публикации ВМО (WMO, 2015*b*) показано, что еще четыре системы могут обеспечивать измерения в диапазоне погрешности от 10 до 20 %.

Большинство данных испытаний, приведенных в таблицах 12.15 и 12.16, были получены в тропиках, где область температур с центром на –60 °C, возможно, находится на 4 км выше, чем на высоких широтах (см. рисунок 12.2). Систематические отклонения для погрешности, обусловленной нагреванием, для данной температуры могут характеризоваться целым диапазоном значений, при этом меньшие отклонения в отрицательную сторону связаны с функционированием датчиков на средних широтах в облачных условиях при более высоком давлении, а более значительные отклонения связаны с полетами в тропиках в безоблачных ситуациях.

12.5.7.8 *Увлажнение или обледенение в облаке*

Современные датчики влажности могут подвергаться загрязнению при прохождении через облако, но, как правило, эффекты отклонения в положительную сторону являются непродолжительными и загрязнение устраняется вентиляцией, или в двойных тонкопленочных емкостных датчиках импульсным обогревом в следующем цикле нагревания датчика. Обледенение в облаке может происходить при температурах гораздо ниже –40 °C, и оно не так быстро устраняется вентиляцией, как загрязнение в нижней тропосфере.

12.5.7.9 *Вопросы репрезентативности*

Вопросы репрезентативности рассматриваются в публикации ВМО (WMO, 2015*b*).

12.6 ОБОРУДОВАНИЕ НАЗЕМНОЙ СТАНЦИИ

12.6.1 Общие характеристики

Детали конструкции наземного оборудования радиозондовой станции зависят от того, какой тип радиозондов используется. Тем не менее, в оборудование наземной станции всегда входят следующие элементы:

a) антенна и радиоприемник для приема сигналов с радиозонда;

b) оборудование для декодирования радиозондовых сигналов и для преобразования этих сигналов в метеорологические величины;

c) оборудование для представления данных метеорологических измерений оператору таким образом, чтобы можно было передавать пользователям необходимые сообщения в соответствии с требованиями.

При необходимости для наблюдений за ветром может дополнительно использоваться и другое оборудование (например, устройство сопряжения с радиолокатором и навигационные системы «LORAN-C», «Омега» или следящие устройства ГСОМ).

Сигналы, выходящие с декодера, должны, как правило, служить в качестве входных сигналов для компьютера для архивации и дальнейшей обработки и коррекции данных.

Современные системы наземных станций могут быть либо приобретены в виде комплексной системы у какого-либо производителя, либо созданы из отдельных модулей, поставленных из различных источников. В случае, когда ремонт и обслуживание будут обеспечиваться в основном самим производителем или его представителями, а не операторами, предпочтительнее выбирать комплексную систему. Систему, состоящую из отдельных модулей, можно гораздо легче адаптировать к различным типам радиозондов. Этого можно достичь, добавляя соответствующие декодеры, без дополнительных затрат на приобретение основных частей комплексной наземной системы, предлагаемых каждым производителем. Модульный тип системы может быть предпочтительным вариантом для операторов, способных самостоятельно обслуживать техническую часть и программное обеспечение, независимо от производителя радиозондов. В последние 10 лет системы из отдельных модулей сталкиваются с проблемами из-за сложности тестирования таких систем, а также с проблемами, возникающими при необходимости адаптации программного обеспечения стандартных поправок производителя к нестандартному использованию с другой системой обработки данных.

Примечание: при существующих темпах развития современных электронных средств для производителей трудно будет обеспечивать надлежащее обслуживание конкретных комплексных систем более 10–15 лет. Таким образом, при планировании долгосрочных расходов необходимо предусмотреть замену комплексных наземных систем примерно каждые 10 лет.

12.6.2 Программное обеспечение для обработки данных

Удовлетворительное программное обеспечение для радиозондовой наземной системы является гораздо более сложным, чем программное обеспечение, необходимое просто для оценки, например, геопотенциальных высот на стандартном уровне на основе точных данных. Данные измерений плохого качества должны отбраковываться; при этом специальные процедуры интерполяции позволяют справляться с работой при отсутствии небольшого количества данных. Существует серьезный риск того, что программист, который недостаточно изучил работу радиозондов, произведет на первый взгляд обоснованные упрощения, которые впоследствии, при определенных обстоятельствах, приведут к возникновению весьма значительных ошибок. Например, в том случае, когда прием данных с радиозонда плохой, совершенно неправильно проводить в слишком больших масштабах интерполяцию данных с использованием математических методов; этот способ вполне надежен, когда качество данных в целом хорошее, но становится ненадежным, когда качество данных в целом плохое. Хорошим примером алгоритма, который может перестать быть надежным при плохом качестве сигнала, является коррекция постоянной времени ответной реакции, которая используется некоторыми изготовителями для температуры.

Раньше некоторые проблемы с приемом сигналов и погрешностями измерения давления сразу же после запуска в отдельных случаях компенсировались путем коррекции времени, связанного с получаемыми данными. Это не приводит к возникновению значительных ошибок в результатах измерений, однако может сделать почти невозможной проверку работы датчика радиозонда при сравнительных испытаниях радиозондов.

Таким образом, при разработке программного обеспечения в целях общего контроля чрезвычайно важно воспользоваться услугами специалиста или консультанта по радиозондам.[1] Для подготовки эффективного программного обеспечения необходимо, чтобы над ним работал высококвалифицированный профессиональный программист. Это программное обеспечение должно охватывать средства отображения и интерактивные средства для оператора, которые требуются для оперативного использования. Программное обеспечение обязательно должно быть устойчивым и не должно отказывать при работе неопытных операторов. В последнее десятилетие для разработки большей части программного обеспечения, предназначенного для коммерческих наземных радиозондовых систем, требовалось, по меньшей мере, два или три года. Программное обеспечение разрабатывалось в сотрудничестве с НМГС, проводившими его тестирование. Это тестирование осуществлялась высококвалифицированными операторами и испытателями до тех пор, пока программное обеспечение не становилось абсолютно надежным в оперативной деятельности. После этого программное обеспечение для наземных систем могло использоваться операторами, не обладающими какими-либо особыми навыками работы с компьютерами.

Программное обеспечение для наземной системы должно быть хорошо задокументировано, и должно включать четкое описание используемых алгоритмов.[2] Вся система в целом должна быть разработана таким образом, чтобы обеспечить возможность для моделирования зондирования с целью проверки и сравнения. Было предложено использовать ряды данных о соответствующих диапазонах давления, температуры и влажности для проверки надежности вновь разрабатываемого программного обеспечения. Именно ошибки, связанные с недостатками программного обеспечения, часто ограничивают точность данных, сообщаемых с радиозондов наилучших типов.

---

[1] Рекомендовано КПМН на двенадцатой сессии (1998 г.) в соответствии с Рекомендацией 2 (КПМН-XII).

[2] См. рекомендацию 2 (КПМН-XII).

12.7 ЭКСПЛУАТАЦИЯ РАДИОЗОНДОВ

12.7.1 Контрольное внесение корректирующих поправок непосредственно перед использованием

Перед запуском радиозонда рекомендуется провести проверку точности радиозондовых измерений в контролируемой среде. Эти контрольные проверки должны проводиться в отношении уже готовых к полету радиозондов за несколько минут до их запуска. Задача при этом заключается в предотвращении запуска неисправных радиозондов. Следующая задача может заключаться в повышении точности калибровки путем коррекции небольших изменений в калибровке, которые могли произойти во время транспортировки радиозонда к месту запуска и во время хранения.

Эти контрольные проверки проводятся обычно в помещении. Они могут проводиться в вентилируемой камере с образцовыми датчиками температуры и относительной влажности, точность которых соответствует спецификациям пользователя. Затем может быть проведена проверка относительной влажности в условиях влажности окружающей среды и в случае необходимости при более низкой и более высокой влажности. При отсутствии образцового психрометра можно получить известные значения влажности с помощью насыщенных солевых растворов или силикагеля.

Расхождения между данными радиозондовых измерений и показаниями контрольных приборов могут быть использованы для коррекции характеристик калибровки датчиков до полета. Датчики, используемые для контроля радиозондов, должны регулярно проверяться, чтобы избежать долговременного дрейфа их калибровки. Надлежащая коррекция калибровки радиозондов при помощи программного обеспечения обычно позволяет в некоторой степени улучшить воспроизводимость результатов радиозондовых измерений в ходе полета. Тип необходимой коррекции будет зависеть от причин изменения калибровки после первоначальной калибровки, проводившейся при изготовлении радиозонда, и будет изменяться в зависимости от типа радиозонда.

При обнаружении больших расхождений с контрольными измерениями радиозонд может быть забракован как не отвечающий спецификации его изготовителя и возвращен для замены. Максимально допустимые расхождения при наземных проверках должны согласовываться с изготовителем радиозондов при их приобретении.

Представляется целесообразным осуществлять контроль за работой радиозонда после его доставки на площадку для запуска. Сообщения с радиозонда должны быть проверены на совместимость с результатами приземных наблюдений на станции непосредственно перед запуском.

Учитывая важное значение этого этапа в эксплуатации радиозонда, КПМН рекомендовала следующее:[3]

a) функционирование радиозондовых датчиков давления, температуры и относительной влажности должно проверяться в контролируемой среде, такой как лабораторный шкаф для калибровки или устройство предполетной проверки, до запуска радиозонда;

b) минимально необходимая проверка должна быть по мере возможности автоматизирована, чтобы устранить возможность ошибки оператора;

c) данные наблюдений за температурой и относительной влажностью также должны быть проверены в сравнении со стандартными данными приземных наблюдений за температурой и относительной влажностью на станции непосредственно перед запуском радиозонда;

[3] Рекомендовано КПМН на одиннадцатой сессии (1994 г.) в соответствии с Рекомендацией 9 (КПМН-XI).

d) точность контрольных датчиков должна быть, по крайней мере, такой же, как у датчиков радиозонда, при этом контрольные датчики должны проходить регулярную калибровку в соответствии с инструкциями производителя.

12.7.2 Методы запуска радиозондов

Радиозонды обычно запускаются с помощью газонаполненной оболочки, поднимающейся со скоростью от 5 до 8 м·с$^{-1}$, в зависимости от спецификации и характеристик используемой оболочки (см. том III, глава 8 настоящего Руководства). Такая скорость подъема позволяет проводить измерения своевременно: радиозонду требуется примерно 40 минут, чтобы достичь высоты 16 км, и примерно 90 минут, чтобы достичь высоты более 30 км — таким образом, информация может быть быстро передана в центры прогнозирования. Конструкция и размещение датчиков температуры и относительной влажности на радиозонде предусматривают обычно надлежащую вентиляцию при скорости подъема, равной примерно 6 м·с$^{-1}$. Поправки к данным о температуре, вводимые для устранения погрешностей, связанных с нагревом солнечной радиацией, действительны, как правило, лишь при указанной скорости подъема.

Информация с радиозонда поступает на наземную станцию, которая обычно располагается на фиксированном месте. Однако современные технологии позволяют создавать полностью автоматизированные радиозондовые наземные системы очень маленького размера. Поэтому в настоящее время наземные системы легко разместить в качестве подвижных систем на морских судах или в небольших автофургонах или трейлерах на суше.

При сбрасывании радиозондов с исследовательских воздушных судов используются парашюты, которые позволяют замедлить их спуск. Датчики температуры монтируются внизу сбрасываемого радиозонда. Скорость спуска обычно составляет около 12 м·с$^{-1}$, что позволяет завершить измерение сбрасываемым радиозондом примерно за четверть часа. Благодаря высокой скорости спуска одно воздушное судно имеет возможность сбросить достаточное число радиозондов на надлежащем расстоянии друг от друга по горизонтали (менее 50 км) для проведения мезомасштабных исследований. Сообщения, передаваемые со сбрасываемых радиозондов, могут приниматься и обрабатываться на воздушном судне. Разрабатываемые в настоящее время системы смогут принимать и передавать прямые показания, а также действовать в автоматическом режиме под контролем программы. Кроме того, разрабатываются системы, позволяющие использовать для сбрасывания радиозондов дистанционно пилотируемые воздушные транспортные средства.

12.7.3 Процедуры запуска радиозонда

После того как радиозонд подготовлен к запуску, следует провести проверку, сравнив данные метеорологических измерений с помощью радиозонда с данными приземных измерений, либо внутри камеры для калибровки, либо снаружи, в вентилируемой метеорологической будке. Необходимость такой проверки обусловлена тем, что радиозонд мог быть поврежден во время его транспортировки с места изготовления или не был надлежащим образом изготовлен, или калибровка датчиков могла измениться во время хранения. Если погрешности измерения с помощью радиозонда превышают пределы, указанные в контракте на его приобретение, следует возвратить его изготовителю для замены.

Радиозонды обычно запускают вручную или с использованием вспомогательного устройства для запуска из какого-либо ангара или контейнера. Сложность устройства ангара и процедуры запуска зависят от того, какой газ используется для наполнения шара (см. том III, глава 8 настоящего Руководства), и от скорости и направления приземного ветра в месте запуска. Даже за прошедшее десятилетие на глобальной сети радиозондирования были случаи со смертельным исходом из-за неосторожного обращения с газом водородом. Руководители станций радиозондирования, использующих водород, должны осознавать возможный риск взрыва и должны

обеспечить, чтобы все сотрудники были надлежащим образом информированы и обучены как обращаться с водородом. Исключительно важно, чтобы оборудование для получения водорода содержалось в хорошем состоянии и было правильно организовано его хранение. Неисправное оборудование не должно использоваться. Оборудование для наполнения оболочки должно иметь заземление для предотвращения статического разряда.

В случае запуска при сильном ветре в качестве вспомогательного средства используется размотчик, который замедляет высвобождение идущего к радиозонду соединительного шнура во время запуска. При очень сильном приземном ветре требуются такие размотчики, которые высвобождают соединительный шнур со скоростью 0,5–1 $м \cdot с^{-1}$.

Автоматические системы для запуска радиозондов доступны на коммерческой основе. Эти системы могут оказаться экономически выгодными на тех радиозондовых станциях, на которых персонал используется исключительно для работы с радиозондами. Однако эти системы могут оказаться непригодными для работы в тех местах, где обычно наблюдается очень сильный приземный ветер.

В том случае, когда пользователям требуются точные данные о вертикальной структуре атмосферного пограничного слоя, данные приземных наблюдений, включенные в аэрологическое сообщение, следует получать из пункта, расположенного поблизости от места запуска радиозонда. Место запуска радиозонда также должно быть репрезентативным для условий в пограничном слое, соответствующих наземной синоптической сети в данном районе. Предпочтительно, чтобы оператор (или автоматизированная система) проводили приземные наблюдения сразу же после, а не до запуска шара-зонда. Оператору следует избегать ввода данных приземных наблюдений до запуска шара-зонда, поскольку метеорологические условия могут успеть измениться до запуска в случае, когда происходит значительная задержка запуска (например, из-за разрыва оболочки воздушного шара перед запуском или из-за полетов воздушных судов). Особенно важно обеспечить, чтобы были безошибочными измерения приземного давления, результаты которых вводятся в наземную систему, если измерения давления с помощью системы радиозондирования основаны на ГСОМ.

Скорость реагирования радиозондовых датчиков сегодня такова, что кондиционирование радиозонда перед запуском не настолько критично, как в прошлом. Вместе с тем, когда идет дождь, необходимо предусмотреть определенную защиту для датчиков радиозонда до его запуска.

12.7.4 **Подвеска радиозонда во время полета**

Во время полета радиозонд не должен быть подвешен слишком близко к газонаполненной оболочке. Это условие необходимо соблюдать потому, что оболочка является источником искажений показаний датчика при измерениях температуры и относительной влажности. Во время подъема оболочки позади нее идет спутная струя, воздух в которой нагревается в контакте с поверхностью оболочки в дневное время и охлаждается в некоторой степени в ночное время. Воздух в тепловом следе за оболочкой может также быть загрязнен водяным паром с поверхности оболочки после того, как она прошла сквозь облака. Длина подвески, которая позволяет предотвратить воздействие значительного искажения показаний датчика от идущей за оболочкой спутной струи на радиозондовые измерения, зависит от максимальной высоты наблюдений. Это связано с тем, что воздух, остающийся за газонаполненной оболочкой, при очень низких давлениях нагревается или охлаждается сильнее. Для предотвращения значительных погрешностей измерений при подъеме радиозонда до 20 км достаточной является подвеска длиной 20 м. Однако если радиозонд поднимается на высоту 30 км или выше, то более приемлемой будет подвеска длиной примерно 40 м (см., к примеру, WMO, 1994).

Примечание: при исследовании влияния спутной струи за газонаполненной оболочкой на радиозондовые измерения чрезвычайно важно обеспечить правильное размещение используемых с этой целью датчиков на радиозонде. Датчики должны быть размещены таким образом, чтобы воздух, входящий в контакт с другими

поверхностями на радиозонде, не мог бы попасть на датчики во время подъема. Возможными источниками загрязнения теплом или водяным паром на радиозонде являются внутренние поверхности защитных шахт, держателей датчиков или внешние поверхности корпуса радиозонда.

12.7.5 **Безопасность населения**

Конструкция радиозондов (размер, масса и плотность) должна соответствовать существующим правилам безопасности воздушного движения. Указанные параметры должны быть такими, чтобы радиозонд не мог причинить значительного ущерба при столкновении с воздушным судном или при всасывании его двигателем воздушного судна. Во многих странах национальные органы по управлению воздушным движением издают правила, регулирующие использование шаров-зондов, находящихся в свободном полете. Часто требуется официальная регистрация мест для запусков шаров-зондов в органах, контролирующих воздушное движение. В некоторых местах запуски шаров-зондов могут быть вообще запрещены или возможны лишь при получении специального разрешения у органов, контролирующих воздушное движение. Перед тем как организовывать новый пункт наблюдения, необходимо проверить необходимость санкционирования там запусков радиозондов.

В некоторых странах правила безопасности требуют, чтобы к подвеске радиозонда были также прикреплены парашют или другие средства, уменьшающие скорость его спуска после разрыва шара. Это необходимо для защиты населения от телесных повреждений. Парашют должен уменьшать скорость спуска около поверхности земли до 6 $м \cdot с^{-1}$ и менее. Остатки газонаполненной оболочки после ее разрыва уменьшают скорость спуска на более низких уровнях. Однако при определенных обстоятельствах большая часть оболочки после ее разрыва отделяется от оснастки радиозонда, и если не использовать парашют, то скорость спуска в этом случае будет слишком высокой.

Важно, чтобы радиозонды были экологически безопасными после того, как они упадут на поверхность Земли или в Мировой океан, независимо от того, подберут ли их люди, животные, или они будут оставлены разлагаться. Дополнительные соображения по экологически безопасным радиозондам подробно изложены в Приложении 12.C.

12.8 **СРАВНЕНИЕ, КАЛИБРОВКА И ОБСЛУЖИВАНИЕ**

12.8.1 **Сравнения**

Общее качество данных оперативных радиозондовых измерений геопотенциальной высоты (и, следовательно, данных измерений температуры, осредненной для слоя большой вертикальной протяженности) контролируется в определенных прогностических центрах путем сравнения со значениями геопотенциальных высот на стандартных изобарических поверхностях по данным краткосрочных (6 ч) прогнозов, полученных на основе глобальных моделей ЧПП для той же географической точки. Статистические характеристики обобщаются в виде ежемесячных осредненных данных, которые используются для определения как неудовлетворительного качества измерений, так и значительных систематических изменений в характеристиках радиозонда. Европейский центр среднесрочных прогнозов погоды в Рединге (Соединенное Королевство) является ведущим центром, назначенным в настоящее время КОС ВМО для выполнения этой работы, однако аналогичные статистические данные подготавливают также и другие национальные прогностические центры.

Случайные погрешности в данных измерений геопотенциальной высоты (и, следовательно, температуры) также могут определяться на отдельных станциях на основе анализа изменений временных рядов данных измерений геопотенциальной высоты на уровне 100 гПа или при более низких значениях давления там, где межсуточная изменчивость атмосферы обычно незначительна. Примеры, иллюстрирующие

сопоставимость результатов, полученных при использовании этого метода, и результатов, полученных при сравнении с полями краткосрочных прогнозов, приводятся в публикациях Nash (1984) и WMO (1989*b*, 1993*b*, 1998, 2003).

Статистические данные о точности датчиков относительной влажности также собираются центрами ЧПП, и они тоже сравниваются с данными спутниковых наблюдений.

Рабочие характеристики радиозонда или датчиков радиозонда могут быть исследованы в лаборатории, где имеются оборудованные надлежащим образом испытательные камеры, в которых температура и давление могут регулироваться для имитации условий полета радиозонда.

Подробное изучение рабочих характеристик датчиков температуры, давления и относительной влажности в полете лучше всего проводить при сравнении радиозондов, когда несколько типов радиозондов запускается вместе на одной газонаполненной оболочке. В приложении 12.C приведены рекомендации по организации сравнений радиозондов и учреждению центров проведения испытаний. При испытаниях новых разработок радиозондов рекомендуется иметь как минимум два других типа радиозонда, с которыми можно было бы сравнить новую разработку радиозонда. Характеристики погрешностей этих других радиозондов должны быть уже установлены в ходе проведенных ранее испытаний. Идеальным для проведения сравнительных испытаний радиозондов мог бы стать полигон, где имеется возможность независимым методом измерять высоту, на которой находится радиозонд во время полета. В настоящее время эта задача может быть выполнена путем использования данных измерений от двух различных прошедших испытания радиозондов с ГСОМ.

12.8.1.1 ***Оценка качества с использованием краткосрочных прогнозов***

В лучших глобальных моделях ЧПП случайная ошибка в краткосрочных (6 ч) прогнозах геопотенциальных высот уровня 100 гПа составляет для большинства районов мира от 10 до 20 м. Эти ошибки соответствуют погрешности измерения средней температуры слоя от поверхности до уровня 100 гПа, равной 0,15–0,3 K. Таким образом, сопоставление с полями прогноза обеспечивает хорошую чувствительность при обнаружении ошибок измерения температуры в данных радиозондирования, если ошибки превышают примерно 0,3 K. При таком сравнении в качестве эталона используются прогностические поля вместо полей анализа. Прогностические поля в качестве эталона в меньшей степени подвержены влиянию со стороны систематических погрешностей в значениях геопотенциальной высоты радиозондовых измерений в заданном районе, чем поля метеорологического анализа. Однако для прогностических полей на срок шесть часов характерны небольшие систематические ошибки, и они не могут рассматриваться в качестве абсолютного эталона. Неопределенность систематической ошибки прогностического поля составляет не менее 10 м на уровне 100 гПа. Систематические различия прогностических данных разных прогностических центров от данных измерений для конкретной аэрологической станции колеблются, как минимум, в этих пределах. Кроме того, систематические ошибки прогностических полей по мере совершенствования прогностических моделей и методов усвоения данных со временем могут изменяться в тех же пределах. Как бы то ни было, сравнения с прогностическими полями в ведущих центрах оперативного мониторинга позволяют четко определить те аэрологические станции и те типы радиозондов, для которых характерны значительные систематические ошибки в радиозондовых сводках. В публикации WMO (2003) приведен самый последний опубликованный обзор радиозондовых погрешностей в глобальной сети для высот до 30 гПа, а соответствующие статистические данные мониторинга можно найти на странице ВМО по ссылке: http://www.wmo.int/pages/prog/www/IMOP/monitoring.html.

12.8.1.2 *Оценка качества с использованием временных рядов данных об атмосфере*

Случайные погрешности радиозондовых измерений могут быть оценены на основе использования временных рядов данных измерений геопотенциальных высот в близко расположенных точках на таких изобарических поверхностях, где геопотенциальные высоты со временем изменяются медленно. Подходящими изобарическими поверхностями являются уровни 100, 50 или 30 гПа. Для данных радиозондовых наблюдений, проводимых с интервалами в 12 ч, это достигается путем расчета разности между данными наблюдений в +12 ч и значениями, полученными в результате линейной интерполяции по времени между данными наблюдений в 0 и +24 ч. Далее последовательно рассчитываются расхождения путем приращения с шагом 24 ч через весь временной ряд наблюдений. Найдя среднеквадратическое отклонение этих расхождений, можно получить оценку случайных погрешностей радиозондовых измерений. В течение большей части года для этой процедуры характерна высокая чувствительность к сравнению, проводимому с прогностическими полями. В качестве одного исключения можно назвать зимние условия в средних и высоких широтах, когда геопотенциальные высоты на уровне 100 гПа и до 30 гПа иногда изменяются очень быстро в течение короткого промежутка времени.

Средние значения расхождений, полученных из временных рядов, могут обеспечить информацию о расхождении дневных и ночных данных радиозондовых измерений температуры. Толкование расхождений данных день-ночь учитывает фактическую суточную изменчивость геопотенциальной высоты, вызываемую суточными и полусуточными приливами. Фактические значения таких расхождений между данными наблюдений в 18:00 ч и 06:00 ч по местному времени в средних широтах для геопотенциальных высот на уровне 100 гПа могут достигать 30 м (Nash, 1984), в то время как фактические значения расхождений между данными наблюдений в 12:00 ч и 00:00 ч местного времени составляют, как правило, примерно 0±10 м.

Представляется полезным, чтобы каждая станция радиозондирования вела регистрацию изменений во временных рядах данных измерений геопотенциальной высоты на уровне 100 гПа и приращения геопотенциальной высоты, 100–30 гПа. Это позволяет операторам проводить проверку на наличие крупных аномалий в данных измерений, получаемых по мере подъема радиозонда.

12.8.1.3 *Сравнение данных измерений водяного пара и дистанционного зондирования*

Учитывая, что многие станции радиозондирования имеют сегодня имеют совмещенные с ними датчики водяного пара с ГСОМ, а некоторые имеют совмещенные микроволновые радиометры, целесообразно использовать измерения интегрированного содержания водяного пара от этих двух систем для проверки качества радиозондовых измерений содержания водяного пара, особенно на низких уровнях. Сравнение с измерениями на основе ГСОМ было проведено во время последних сравнений радиозондов ВМО (WMO, 2006*a*, 2011*b*), когда измерения ГСОМ использовались для количественной оценки расхождений в дневных и ночных радиозондовых измерениях относительной влажности. Более масштабное глобальное исследование было проведено в работе Wang и Zhang (2008). Использование микроволновых радиометров для проверки расхождений в дневное и ночное время описано в работе Turner et al.(2003).

Несмотря на то, что идентификация расхождений в дневное и ночное время на основе измерений интегрированного содержания водяного пара является достаточно надежной, это еще не означает, что все расхождения в значениях содержания водяного пара, полученных при помощи радиозондов и методом дистанционного зондирования, обусловлены погрешностями радиозондовых измерений водяного пара, поскольку измерения водяного пара как при помощи ГСОМ, так и микроволнового радиометра имеют погрешности, которые не обязательно остаются постоянными со временем.

12.8.1.4 ***Сравнения радиозондов***

Сравнения радиозондов позволяют провести независимое сравнение точности датчиков давления, температуры и относительной влажности на радиозонде в зависимости от времени. Однако важно, чтобы проект оснастки для радиозондов предусматривал, чтобы перемещение радиозондов под держателями не слишком отличалось от их перемещения на газонаполненной оболочке, и чтобы в дневное время оснастка (включая оболочку) не приводила к периодическому поступлению более теплого воздуха на некоторые датчики.

Лабораторные испытания следует проводить с помощью средств, которые аналогичны средствам, необходимым для проведения тщательной калибровки радиозондов изготовителем. Эти испытания можно использовать для проверки адекватности калибровки радиозондов, например, зависимости калибровки от температуры датчика. Однако в лаборатории трудно воспроизводить реальные атмосферные условия для определения значений погрешностей, обусловленных излучением и увлажнением или обледенением датчиков. Такие погрешности лучше всего изучать при проведении сравнений во время реальных подъемов радиозондов.

Для сравнения данных измерений в процессе подъема радиозондов необходимо, чтобы получение данных от различных систем было как можно более точно синхронизировано, в идеальном варианте до ±1 с. В последние годы были разработаны пакеты программного обеспечения для проведения сравнений радиозондов под эгидой ВМО (WMO, 1996*b*). Они позволяют хранить все радиозондовые измерения в базе данных сравнений, и это дает возможность ученым, осуществляющим проект, сравнивать полученные данные сразу после проведения испытательного полета. Важно, чтобы данные изучались очень быстро во время испытания. Тогда можно быстро обнаруживать любую проблему, возникающую из-за процедуры испытания (например, создание радиозондами взаимных помех), или ошибок в работе самих радиозондов, и инициировать проведение надлежащих дополнительных исследований. Программное обеспечение также позволяет подготовить окончательные статистические данные о сравнении радиозондов в такой форме, которая подходит для публикации.

Начальный этап испытаний радиозондов новой конструкции не требует большого числа сравнительных полетов, поскольку основные недостатки могут быть обнаружены и при небольшом их числе. Однако по мере того как системы получают все более полное развитие, может оказаться обоснованным проведение более крупномасштабных исследований. Так как воспроизводимость результатов измерений большинства современных радиозондов улучшилась, стало возможным получить полезные данные о систематической погрешности измерений температуры и давления примерно за 10–15 полетов для одного параметра полета (например, в одно и то же время суток). Поскольку неправильно было бы предполагать, что в измерениях в дневное время при любой высоте солнца будут одинаковые систематические погрешности, желательно испытания проводить, по меньшей мере, в ходе 10–15 сравнительных полетов при одной и той же высоте солнца. Точность измерений датчика температуры лучше всего оценивать на основании результатов других испытаний путем сравнений, проводимых в ночное время. Эта оценка должна быть основана на результатах измерений с помощью радиозондов с проволочными или алюминированными датчиками, а не с датчиками, для которых характерны значительные погрешности в результате теплообмена в ИК-диапазоне. Если можно обеспечить проведение серии сравнительных полетов (чередующихся в дневное и ночное время), то можно использовать метод временных рядов данных об атмосфере для оценки величины расхождений в измерениях температуры в дневное и ночное время.

Как отмечалось ранее, самой масштабной серией сравнений, проведенных в последние годы, являются международные сравнения радиозондов ВМО. Первичные результаты были представлены в публикациях ВМО (WMO, 1987; 1991; 1996*a*; 2006*a*, 2006*b*, 2006*c*, 2011*b*). Результаты этих испытаний легли в основу информации, представленной в таблицах 12.2 и 12.6–12.8.

Первое международное сравнение радиозондов было проведено в Пайерне (Швейцария) в 1950 г. Средние систематические расхождения в данных измерения давления и

температуры (при давлении выше 100 гПа) составляли 4 гПа и 0,7 K при случайных погрешностях (доверительный интервал в два среднеквадратических отклонения) 14 гПа и 2 K. Эти значения следует сравнить с результатами, полученными с помощью современных систем радиозондирования, которые представлены в таблицах 12.2 и 12.6–12.8. Результаты, полученные в ходе второго сравнения на том же полигоне в 1956 г., показали, что необходимо повышать точность за счет применения к показаниям температуры радиационной поправки. Погрешности измерения давления и температуры на уровне 50 гПа были довольно значительными для большинства радиозондов и быстро возрастали на более высоких уровнях, особенно в дневное время. В 1973 г. в Траппе, Франция, было проведено региональное сравнение. Это сравнение позволило выявить значительные погрешности калибровки некоторых радиозондов, причем погрешность измерения температуры одним биметаллическим датчиком в результате воздействия излучения достигала 10 K.

12.8.2 **Калибровка**

Прежде чем приобретать радиозонды в большом количестве, следует выяснить, какие методы калибровки применялись изготовителями. Кроме того, следует проверить адекватность процедур контроля качества, которые обеспечивают сохранение точности измерений при массовом производстве. Покупателям следует иметь в виду, что некоторые указанные уровни погрешностей и неполадки в работе могут быть неизбежны, если они хотят, чтобы цена на радиозонды оставалась приемлемой. Тем не менее, надежные изготовители должны гарантировать, что показатель отказов в работе радиозондов во время полета не будет превышать 1 % или 2 %.

Если радиозондовые датчики не могут производиться крупными партиями с обеспечением необходимых для пользователей воспроизводимости и точности результатов, следует проводить калибровку приборов и датчиков на индивидуальной основе. Даже если датчики могут производиться крупными партиями, отвечая при этом требованиям принятой стандартной проверки точности измерений, необходимо проводить более тщательную проверку случайно выбранных репрезентативных образцов. В процессе калибровки следует, по мере возможности, воспроизводить условия полета в отношении давления и температуры. Калибровка должна, как правило, проводиться при падении давления и понижении температуры. Относительная влажность будет, вероятно, проверяться на отдельном устройстве. Образцовые датчики, используемые во время калибровки, должны сверяться с национальными контрольными приборами и проверяться через надлежащие интервалы времени в поверочных лабораториях. Образцовые приборы должны эффективно работать во всем диапазоне температур, характерных для радиозондовых измерений.

Конструкция устройства для калибровки зависит в значительной степени от того, должен ли радиозонд проходить калибровку в полной сборке как самостоятельная единица или же должны проверяться лишь блок датчиков или отдельные датчики отдельно от передатчика радиозонда. В последнем случае для калибровки можно использовать гораздо меньшее по размеру устройство. Средства для калибровки должны адекватным образом охватывать тот диапазон значений давления и температуры, с которым вероятнее всего придется столкнуться при проведении реального зондирования. В камере для калибровки должны поддерживаться условия, остающиеся стабильными при любом желаемом значении с точностью выше ±0,2 гПа·мин$^{-1}$ для давления, ±0,25 K·мин$^{-1}$ для температуры и 1 % относительной влажности в минуту. Условия в камере для калибровки должны измеряться с систематическими погрешностями менее ±0,2 гПа для давления; ±0,1 K для температуры и ±1 % относительной влажности. Для определения диапазона изменения температуры в пространстве, в котором находятся подвергаемые калибровке датчики, в камеру для калибровки следует помещать эталонные термометры. Диапазон изменения температуры не должен превышать 0,5 K. Необходимо проводить достаточное число измерений, чтобы калибровочные характеристики представляли функции преобразования датчиков с той точностью, которая необходима пользователям. Датчики давления, в которых изменения температуры компенсируются не в полной мере, должны

проходить калибровку при нескольких значениях температуры. Таким образом, можно считать преимуществом возможность использования одной камеры как для калибровки температуры, так и для оценки датчиков давления.

Калибровка датчиков влажности проводится, как правило, в отдельном устройстве. Она может проводиться в камере, в которой вентилятор быстро прогоняет воздух мимо вентилируемого психрометра или гигрометра для измерения точки росы, а затем через один из четырех сосудов, содержащих соответственно теплую воду, насыщенные растворы нитрата натрия и хлорида кальция и силикагель. Любой из этих сосудов может подсоединяться к системе циркуляции при помощи комбинированного распределителя так, чтобы в камере легко можно было установить относительную влажность, равную 100 %, 70 %, 40 % и 10 %. Среднеквадратическое отклонение изменения относительной влажности в пространстве, в котором датчики проходят калибровку, не должно превышать 1 %.

Альтернативный вариант калибровки датчиков влажности предусматривает использование шахты или камеры, продуваемой смесью воздуха из двух сосудов, в одном из которых воздух увлажняется насыщенным водяным паром, а в другом осушается силикагелем, при этом относительная влажность смеси контролируется вручную при помощи клапана, регулирующего соотношение порций воздуха, поступающего в шахту.

Учитывая важность калибровки типа или партии радиозондов, КПМН настоятельно призывает Членов ВМО проводить проверки на национальном или региональном уровнях отобранных образцов радиозондов в лабораторных условиях, для того чтобы убедиться в правильности калибровки, проведенной изготовителем.[4]

12.8.3 Техническое обслуживание и ремонт

Частота отказов в работе приемных станций, основанных на современной электронике, должна быть низкой при условии обеспечения надежной защиты от ударов молний вблизи антенн. Изготовитель должен предоставить информацию о подходящем комплекте запасных частей для своей системы. Если в наземной системе выходит из строя какой-то модуль, он обычно заменяется запасным модулем, а неисправный возвращается производителю для ремонта.

Требования к техническому обслуживанию и ремонту радиозондовых систем, основанных на радиолокационных измерениях высоты вместо радиозондовых измерений давления, совершенно иные. В этом случае всегда должно обеспечиваться местное обслуживание на всей сети станций с помощью персонала, имеющего хорошую техническую подготовку (как в области механики, так и электрики). Такое обслуживание совершенно необходимо для обеспечения возможностей точно отслеживать радиозонд и во избежание долгосрочного дрейфа систематических погрешностей измерения высоты.

12.9 ВЫЧИСЛЕНИЯ И РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ

Никаких предписанных стандартных процедур для вычислений на основе данных радиозондовых наблюдений не существует. Основная проблема заключается в выборе уровней или представлении данных измерений с достаточной детализацией для точного и эффективного воспроизведения профилей температуры и влажности (таких как высота температурной инверсии) относительно геопотенциала на основе данных радиозондирования. Руководящие указания на этот счет приведены в публикации ВМО (WMO, 1986) и в процедурах кодирования, принятых ВМО (2011*c*) (код FM 35–XI Ext. TEMP). Однако точность этого метода передачи данных была подходящей для работы радиозондов в 1970 г., но не сегодня. Для того, чтобы оправдать стоимость радиозонда, очень важно, чтобы информация радиозонда передавалась с

[4] См. рекомендацию 9 (КПМН-XI), принятую КПМН на ее одиннадцатой сессии в 1994 г.

большей точностью и детализацией, чем в коде TEMP, с использованием соответствующих кодов BUFR. В некоторых случаях при использовании кода BUFR прибегали к сохранению описания подъема только в том виде, который предусмотрен в коде TEMP. В настоящем Руководстве ставится другая задача: следует использовать шаблон BUFR, который дает более подробное представление о вертикальной структуре метеорологических параметров, передаваемых с разрешением, которое не привносит дополнительной погрешности в измерения этих параметров.

12.9.1 Процедуры вычислений и представления результатов радиозондовых измерений

Обычно данные аэрологических измерений вводятся в численные прогнозы погоды в виде ряда усредненных значений для слоев, при этом толщина слоя зависит от масштабов прогнозируемых атмосферных процессов. Середины слоев не обязательно соответствуют изобарическим поверхностям или стандартным высотам, но часто приводятся к уровням, которые изменяются по мере изменения приземного давления. Таким образом, изменение температуры и относительной влажности между стандартными уровнями в аэрологических сводках должно сообщаться с достаточной точностью для того, чтобы точность расчетов средних значений слоев, используемых в численных прогнозах, не снижалась в результате применения процедур для представления результатов радиозондовых измерений.

До 1980 г. большая часть данных радиозондовых измерений обрабатывалась операторами вручную с использованием различных вспомогательных средств. Эти методы были основаны на выборе для представления данных радиозондовых измерений ограниченного числа особых уровней, возможно, примерно 30 особых уровней для полета до высоты 30 км. В кодах ВМО отражены трудности, связанные с необходимостью сжатия большого количества информации о вертикальной структуре в короткое сообщение вручную. Правила кодирования допускали, чтобы данные о высоте, полученные путем линейной интерполяции между особыми уровнями, отличались от первоначальных данных измерений на величину до ±1 K для температуры и ±15 %для относительной влажности в тропосфере и до ±2 K для температуры в стратосфере. Предполагалось, что операторы не допустят значительных ошибок в интерполяции в слоях большой вертикальной протяженности.

Использование в современных наземных радиозондовых системах недорогих, но мощных вычислительных систем означает, что для архивации и обработки данных радиозондовых измерений можно использовать более частые измерения, чем при вычислениях вручную. Обработка данных радиозондовых измерений вручную почти всегда ведет к появлению дополнительных ошибок при расчетах аэрологических параметров, поэтому от ручной обработки данных следует отказаться.

Для существующих алгоритмов автоматизированной обработки аэрологических сводок TEMP часто характерны значительные недостатки. Так, например, когда имеется незначительное число явных отклонений в вертикальном профиле относительной влажности, использование автоматизированных систем часто приводит к тому, что ошибки, полученные при интерполяции температуры, распространяются на несколько километров по вертикали. Кроме того, алгоритмы часто допускают наличие существенных систематических расхождений между результатами измерений относительной влажности и фактическими данными измерений в слоях толщиной до 500 м. Это является неприемлемым для пользователей, особенно в отношении пограничного слоя атмосферы и в тех случаях, когда радиозонд проходит через облака. Данные, полученные в результате интерполяции между значениями, соответствующими уровням, на которых располагаются слои облаков, должны быть близки к максимальному значению относительной влажности, наблюдавшемуся в облаках.

Таким образом, операторам необходимо проверять сводки, поступающие от автоматизированных систем, чтобы установить, не вносят ли процедуры передачи данных значительные систематические расхождения между данными аэрологических сводок и

фактическими данными радиозондовых измерений. Для устранения систематических расхождений оператор может вводить дополнительные значимые уровни. Сводки TEMP с приемлемыми систематическими ошибками часто получают путем внедрения в практику национальных сетей менее строгих, чем это принято в ВМО, ограничений для температуры, доходящих до половины значения. Сегодня развитие средств связи в метеорологии должно обеспечить сокращение применения методов округления при представлении данных аэрологических наблюдений в результате использования надлежащего сообщения в коде BUFR.

С учетом огромного объема денежных средств, которые тратятся ежегодно на расходные материалы для радиозондирования, операторы радиозондов должны срочно перейти на коды BUFR (или эквивалентные коды), что позволит им более точно передавать всю информацию, которая получена в ходе измерений и необходима сообществу пользователей.

12.9.2 **Внесение поправок**

Из вышеизложенного должно быть ясно, что изменение характеристик датчика радиозонда, обусловленное большим диапазоном характеристик внешних условий при подъеме радиозонда, является слишком значительным, чтобы быть представленным простой калибровкой, проведенной при какой-либо заданной температуре. Современная обработка данных позволяет использовать для калибровки более сложные алгоритмы. Это обеспечивает измерения с большей точностью, чем при использовании систем обработки данных вручную. Очень важно, чтобы эти алгоритмы были надлежащим образом задокументированы. Пользователей следует всегда информировать о значительных улучшениях или изменениях алгоритмов. В архивных регистрационных записях, хранящихся на станциях радиозондирования, должны содержаться сведения об используемых радиозондах и основных алгоритмах, примененных при обработке данных.

Всем данным радиозондовых измерений температуры присущи ошибки, связанные с влиянием солнечной радиации. Поэтому рекомендуется при обработке данных всегда применять поправку на воздействие радиации (основанную на ожидаемой точности измерений датчика при обычных условиях), если она известна. Подробные сведения об этой радиационной поправке следует регистрировать и хранить в архиве станции наряду с архивными записями соответствующих первоначальных полученных данных радиозондовых наблюдений, если этого требует национальная практика.

Особую проблему при внесении поправок представляют ошибки, связанные с теплообменом в ИК-диапазоне, поскольку эти ошибки зависят от температуры атмосферы. Таким образом, предпочтительно как можно скорее отказаться от использования белой краски с высокой излучательной способностью в инфракрасной части спектра в качестве покрытия датчиков вместо того, чтобы разрабатывать очень сложные схемы корректировки погрешностей на теплообмен в ИК-диапазоне.

Аналогичным образом нецелесообразно пытаться откорректировать необычно большие ошибки, связанные с нагреванием под воздействием солнечной радиации, при помощи программного обеспечения, вместо того чтобы устранить дополнительные источники нагревания путем правильного размещения датчика по отношению к его опорам, соединительным проводам и корпусу радиозонда.

Для измерений относительной влажности могут применяться поправки на большую инерционность и дневной разогрев датчика влажности. Что касается температуры, то письменные свидетельства о поправках и изменениях в процедурах внесения поправок должны быть известны пользователю и сохраняться в архиве данных наблюдений на станции, желательно вместе с архивом необработанных данных. Подробное описание этих алгоритмов должно быть известно тем, кто закупает новые системы.

Учитывая важность способов внесения поправок, КПМН[5] настоятельно призывает Членов:

a) вносить поправки и предоставлять откорректированные аэрологические данные с различных аэрологических станций Глобальной сети наблюдений;

b) извещать пользователей данных об изменениях в методологии, которая используется для внесения поправок в сводки, с тем чтобы они могли быть по желанию откорректированы;

c) сохранять в архивах как откорректированные, так и неоткорректированные данные аэрологических наблюдений, и вести записи поправок, вводимых для климатологических применений; используемый метод должен быть определен на национальном уровне;

d) информировать ВМО о применяемых методах внесения поправок.

12.10 ВОПРОСЫ, СВЯЗАННЫЕ С ЗАКУПКАМИ

12.10.1 Использование и обновление результатов, полученных во взаимном сравнении высококачественных систем радиозондирования ВМО

Результаты, полученные во взаимном сравнении высококачественных систем радиозондирования ВМО (WMO, 2011*b*), были опубликованы и дают представление о том, как обстояли дела в 2010 г. с относительной точностью измерений с использованием различных систем в тропических условиях. Опубликованный отчет содержит оценку эксплуатационных характеристик систем радиозондирования (см. WMO, 2011*b*, таблица 12.1). Несмотря на то, что многие системы функционировали успешно, некоторые радиозонды имели недостатки в проводимых ими измерениях, в основном при дневной температуре, а также измерениях ночной относительной влажности при температурах выше –40 °C и относительной влажности в ночное время в верхней тропосфере при температурах ниже –40 °C.

Таблица 12.1 упомянутого отчета преследует цель помочь изготовителям выявить, где скрыты наиболее серьезные проблемы. Когда недостатки выявлены, многие из них могут быть устранены, и действительно устраняются, в течение одного или двух лет, как это было с температурой MODEM после того, как неоптимальная точность в ночное время была выявлена во время сравнения радиозондов на Маврикии (WMO, 2006*a*). Поэтому ВМО рекомендует, чтобы изготовители, в особенности получившие отметки ниже 3 согласно таблице 12.1, проводили определенное количество независимых испытаний и предоставляли в ВМО свидетельства того, что точность была улучшена и проблема устранена. В противном случае изготовителям с перспективной продукцией может быть неоправданно отказано в процессе заключения контрактов на поставку.

В публикации WMO (2015*b*) содержатся значения, полученные конкретными радиозондами, которые соответствуют таблицам 12.5–12.16, составленным на основе испытаний в Янцзяне, Китай, и их тоже можно использовать для распознавания систем с небольшим систематическими отклонениями и достаточно малой инерционностью, обеспечивающим небольшую ошибку зондирования в измерениях влажности. Небольшое и устойчивое систематическое отклонение является важным требованием к радиозондовым измерениям для ведения записей климатических данных.

12.10.2 Некоторые вопросы, которые необходимо учитывать при закупках

Первым шагом в процессе закупок должно быть определение того, какого качества радиозонды необходимо использовать в конкретной сети. При этом рекомендуется,

[5] См. рекомендацию 8 (КПМН-XI), принятую КПМН на ее одиннадцатой сессии в 1994 г.

чтобы любой используемый радиозонд удовлетворял приведенным в приложении 12.A требованиям перспективной точности в условиях климата данной страны. Если станция радиозондирования считается важной для климатических записей, то следует рассматривать радиозонд, точность которого близка к оптимальной. В идеале закупки должны проводиться на конкурсной основе. Это может означать сотрудничество с другими странами в аналогичном регионе для приобретения большего количества радиозондов совместно, а также регулярное опробование системы там, где были закуплены радиозонды, например, каждый год или каждые два года. Следует помнить, что системы, которые отличаются друг от друга лишь незначительно по своей точности, при повторных испытаниях могут оказаться в другом порядке относительно друг друга. Поэтому только заметные различия в точности следует воспринимать как значимые, и не следует обращать внимание на небольшие различия в относительной оценке.

Опыт консультаций в ходе региональных учебных семинаров, свидетельствует о том, что есть некоторые вопросы, которые следует учитывать при закупке оборудования:

a) оборудование должно быть способно устойчиво функционировать на протяжении длительного времени. Другими словами, помимо закупки аппаратного и программного обеспечения должны быть предусмотрены механизмы обеспечения долгосрочной поддержки системы либо изготовителем, либо работниками на местах, или и теми и другими;

b) необходимо убедиться, что наземная антенна достаточно чувствительна для получения сигналов при всех условиях в данном месте, независимо от того, являются ли ветры на высотах очень слабыми или очень сильными. Не нужно пытаться сэкономить деньги, покупая дешевую антенну, которая не будет подходить в некоторых условиях;

c) следует принять решение в отношении того, будет ли местный персонал обслуживать вторичный радиолокатор и, следовательно, использовать более дешевые радиозонды без ГСОМ, или же полностью автоматизированные системы радиозондирования с ГСОМ, вероятнее всего, будут эффективными и успешно проработают в течение длительного времени. Обратите внимание на то, что использование данных измерений ветра при помощи радиолокатора приведет к тому, что измерения ветра будут иметь меньшую точность, чем при использовании радиозондов с ГСОМ. Поэтому следует также решить, является ли приемлемой более низкая точность измерений ветра, если вы выбираете радиозонд без ГСОМ;

d) если предстоит закупать систему радиозондирования с ГСОМ, проверьте, нет ли в данном районе источника радиочастотных помех, которые могут вызывать проблемы;

e) необходимо принять решение, какая требуется точность в измерении высоты, и определить, какие размеры радиозондов и оболочек подходят (если радиозонды не используются при давлении ниже 30 гПа, то существует больший выбор подходящих радиозондов, см. таблицы 12.5–12.8);

f) необходимо принять решение, какая требуется точность датчика относительной влажности (к примеру, станция ГРУАН или ГУАН (аэрологическая сеть ГСНК) требует более высокого стандарта, чем обычная станция ГСНК) на основе таблицы 12.1 WMO (2011*b*) и таблиц 12.11–12.16 настоящего Руководства;

g) если метеорологические условия часто бывают влажными и облачными, то следует конкретно указать, чтобы радиозондовые датчики имели защиту от влажности и загрязнения и попросить представить свидетельства того, как такая защита работает;

h) следует обратиться с просьбой о договоре компенсации, если слишком большое количество радиозондов дают отказы во время полетов;

i) необходимо запросить свидетельства, подтверждающие, что изготовитель ранее надежно обеспечивал поставки радиозондов другим пользователям, в тех объемах, которые будут использоваться на станции;

j) следует убедиться, что наземное оборудование может производить сообщения, которые делают возможным передачу данных с более высоким разрешением по сравнению с прежними сообщениями TEMP. Эти сообщения должны быть подходящими для передачи с использованием средств связи, имеющихся в данном месте, и должны удовлетворять потребности пользователя в данных с хорошим вертикальным разрешением;

k) необходимо обеспечить, чтобы компьютеры в составе наземного оборудования были совместимы с местной телекоммуникационной системой (включая интернет связь, если необходимо).

ПРИЛОЖЕНИЕ 12.A. СОВРЕМЕННЫЕ ТРЕБОВАНИЯ К ПЕРСПЕКТИВНОЙ И ОПТИМАЛЬНОЙ ТОЧНОСТИ РАДИОЗОНДОВЫХ ИЗМЕРЕНИЙ

Примечание: при существующих технологических возможностях согласно оценкам Восьмого международного взаимного сравнения радиозондов ВМО в Янцзяне, Китай (WMO, 2011*b*). Применяются для радиозондовых измерений в области синоптической и климатической метеорологии.

Параметр	*Высота (км) (температура (°C), в случае влажности)*	*Требование к перспективной точности*[a,b]	*Требование к оптимальной погрешности*[b]
Давление	1	3 гПа	2 гПа
	10	3 гПа	1 гПа
	16	2 гПа	0,6 гПа
	24	1 гПа	0,2 гПа
	32	0,4 гПа	0,1 гПа
Температура	от 0 до 16	1 K	0,4 K
	выше 16	2 K	0,8 K
Относительная влажность	от 0 до 12 (от 40 до –50 °C)[c]	15% ОВ	6% ОВ
(только в тропопаузе)	от 12 до 17 (от –50 до –90 °C)[c]	30% ОВ	10% ОВ
Коэффициент перемешивания нижняя стратосфера (специализированные системы)	от 12 до 25	20% ppmv[d]	4% ppmv
Направление ветра	от 0 до 16	10°, скорость < 10 м·с$^{-1}$ 4° при больших скоростях	5°, скорость < 10 м·с$^{-1}$ 2° при больших скоростях
	выше 16	20°, скорость < 10 м·с$^{-1}$ 8° при больших скоростях	5°, скорость < 10 м·с$^{-1}$ 2° при больших скоростях
Скорость ветра	от 0 до 16	2 м·с$^{-1}$	1 м·с$^{-1}$
	выше 16	4 м·с$^{-1}$	1 м·с$^{-1}$

Параметр	*Высота (км) (температура (°C), в случае влажности)*	*Требование к перспективной точности*[a,b]	*Требование к оптимальной погрешности*[b]
Компоненты ветра	от 0 до 16	2 м·с$^{-1}$	1 м·с$^{-1}$
	выше 16	3 м·с$^{-1}$	1 м·с$^{-1}$
Геопотенциальная высота на уровне особых точек	1	30 гп. м	20 гп. м
	5	40 гп. м	20 гп. м
	10	60 гп. м	20 гп. м
	16	120 гп. м	40 гп. м
	20	200 гп. м	40 гп. м
	32	240 гп. м	60 гп. м

Примечания:

[a] Значения получены для основных целевых применений радиозондов.

[b] Выражается как расширенная погрешность ($k = 2$), которая охватывает приблизительно 95 % варьирования результатов в условиях зондирования, включая все существенные источники погрешности (например, динамические и радиационные условия).

[c] Изменение ожидаемой точности датчика относительной влажности лучше согласуется с температурой, чем с высотой в тропосфере.

[d] ppmv = частей на миллион по объему.

ПРИЛОЖЕНИЕ 12.B. ОЦЕНКИ ЦЕЛЕВОЙ, ПЕРСПЕКТИВНОЙ И ПОРОГОВОЙ ТОЧНОСТИ ИЗМЕРЕНИЙ ВЕТРА И ТЕМПЕРАТУРЫ НА ВЫСОТАХ, ОТНОСИТЕЛЬНОЙ ВЛАЖНОСТИ И ГЕОПОТЕНЦИАЛЬНОЙ ВЫСОТЫ (НА ОСНОВЕ РЕГУЛЯРНОГО ОБЗОРА ПОТРЕБНОСТЕЙ ВМО В АЭРОЛОГИЧЕСКИХ НАБЛЮДЕНИЯХ)

a) *Целевая точность* — оптимальное требуемое значение, выше которого дальнейшее улучшение не требуется.

b) *Перспективная точность* — промежуточный уровень между пороговой и целевой точностью, достижение которого приведет к значительному улучшению в целевом применении. Промежуточный уровень можно считать оптимальным требованием с точки зрения соотношения затрат и результатов при планировании или проектировании систем наблюдения.

c) *Пороговая точность* — минимальное требование, которое должно быть выполнено для того, чтобы данные были полезными;

Рекомендуется считать затраты на радиозонды оправданными, если достигнутые точность и вертикальное разрешение соответствуют пороговым значениям или лучше их и максимально близки к целевым значениям, насколько это приемлемо по затратам.

Таблица 12.B.1. Перечень предельных значений, принятых ГСНК/ВМО для погрешности (векторная погрешность СКО, $k = 2$) и вертикального разрешения для измерений ветра на высотах

Слой		*Целевая точность для ЧПП*	*Целевая точность для климата*	*Перспективная точность для ЧПП*	*Перспективная точность для климата*	*Пороговая точность для ЧПП*	*Пороговая точность для климата*
Нижняя тропосфера	Погрешность	1[a]–2 м·с$^{-1}$	1,4[b]–4[c] м·с$^{-1}$	4 м·с$^{-1}$	6 м·с$^{-1}$	10 м·с$^{-1}$	10 м·с$^{-1}$
	Вертикальное разрешение	200 м	50[b]–500[c] м	300 м	800 м	500 м	2 км
Верхняя тропосфера	Погрешность	1[b]–2[c] м·с$^{-1}$	1,4[b]–4[c] м·с$^{-1}$	4 м·с$^{-1}$	6 м·с$^{-1}$	10 м·с$^{-1}$	10 м·с$^{-1}$
	Вертикальное разрешение	500 м	50[b]–500[c] м	700 м	800 м	1 км	2 км
Нижняя стратосфера	Погрешность	2 м·с$^{-1}$	1,4[b]–4[c] м·с$^{-1}$	4 м·с$^{-1}$	6 м·с$^{-1}$	10 м·с$^{-1}$	10 м·с$^{-1}$
	Вертикальное разрешение	1 км	250[b]–500[c] м	2 км	800 м	3 км	2 км
Верхняя стратосфера	Погрешность	2 м·с$^{-1}$	1,4[b]–4[c] м·с$^{-1}$	6 м·с$^{-1}$	8 м·с$^{-1}$	16 м·с$^{-1}$	10 м·с$^{-1}$
	Вертикальное разрешение	1 км	250[b]–500[c] м	2 км	800 м	3 км	2 км
Долгосрочная устойчивость			0,1 м·с$^{-1}$ в течение 10 лет				

Примечания:

[a] Предельное значение, полученное в исследованиях атмосферной изменчивости (WMO, 1970).

[b] Предельное значение, основанное на требованиях к наблюдениям опорной аэрологической сети ГСНК (WMO, 2009).

[c] Предельное значение, полученное из базы данных с потребностям ВМО в отношении наблюдений (OSCAR/Потребности; см. WMO, 2014), которая ведется в рамках регулярного обзора потребностей КОС, по состоянию на август 2011 г.

Таблица 12.B.2. Перечень принятых ГСНК/ВМО предельных значений погрешности и вертикального разрешения (k = 2) для измерения температуры на высотах (Примечание: эти предельные значения относятся к температуре на конкретной высоте и могут быть другими, когда температуры интегрируются по относительно мощным слоям, например, см. таблицу 12.B.4 в отношении перспективной точности на основе требований к определению геопотенциальной высоты поверхности 100 гПа)

Слой		*Целевая точность для ЧПП*	*Целевая точность для климата*	*Перспективная точность для ЧПП*	*Перспективная точность для климата*	*Пороговая точность для ЧПП*	*Пороговая точность для климата*
Нижняя тропосфера	Погрешность	0,6[a]–1[c] K	0,2[b]–1[c] K	1,8 K	1,2 K	6[c] K (внетропические районы) 3[a] K (тропики)	2 K
	Вертикальное разрешение	100 м	100 м	200 м	800 м	1 км	2 км
Верхняя тропосфера	Погрешность	0,6[a]–1[c] K	0,2[b]–1[c] K	1,8 K	1,2 K	6[c] K (внетропические районы) 3[a] K (тропики)	2 K
	Вертикальное разрешение	300 м	100 м	400 м	800 м	1 км	2 км
Нижняя стратосфера	Погрешность	1[c] K	0,4[b]–1[c] K	1,8 K	1,2 K	6[c] K (внетропические районы) 3[a] K (тропики)	2 K
	Вертикальное разрешение	1 км	100[b]–500[c] м	1,5 км	800 м	3 км	2 км
Верхняя стратосфера	Погрешность	1[c] K	0,4[b]–1[c] K	2,8 K	1,2 K	6 K	2 K
	Вертикальное разрешение	1 км	100[b]–500[c] м	1,5 км	800 м	3 км	2 км
Долгосрочная устойчивость			0,05 K в течение 10 лет[b]				

Примечания:

[a] Предельное значение, полученное в исследованиях атмосферной изменчивости (WMO, 1970).

[b] Предельное значение, основанное на требованиях к наблюдениям опорной аэрологической сети ГСНК (WMO, 2009).

[c] Предельное значение, полученное из базы данных с требованиями ВМО в отношении наблюдений (OSCAR/Потребности; см. WMO, 2014), которая ведется в рамках регулярного обзора потребностей КОС, по состоянию на август 2011 г.

Таблица 12.B.3. Перечень предельных значений, принятых ГСНК/ВМО для аэрологических измерений влажности приборами

Слой		*Целевая точность для ЧПП*	*Целевая точность для климата*	*Перспективная точность для ЧПП*	*Перспективная точность для климата*	*Пороговая точность для ЧПП*	*Пороговая точность для климата*
Нижняя тропосфера	Погрешность	2[a]–4[c] % ОВ	4 % ОВ	16 % ОВ	6 % ОВ	40 % ОВ	10 % ОВ
	Вертикальное разрешение	100 м	50[b]–500[c] м	200 м	800 м	1 км	2 км
Верхняя тропосфера	Погрешность	4 % ОВ	4 % ОВ	16 % ОВ	6 % ОВ	40 % ОВ	10 % ОВ
	Вертикальное разрешение	300 м	100[b]–500[c] м	500 м	800 м	1 км	2 км
Нижняя стратосфера	Погрешность	10 % коэффициент перемешивания ppmv	4 % коэффициент перемешивания ppmv	16 % коэффициент перемешивания ppmv	6 % коэффициент перемешивания ppmv	40 % коэффициент перемешивания ppmv	10 % коэффициент перемешивания ppmv
	Вертикальное разрешение	1 км	100[b]–500[c] м	1,5 км	800 м	3 км	2 км
Верхняя стратосфера	Погрешность	не установлена	4 % коэффициент перемешивания ppmv	не установлена	6 % коэффициент перемешивания ppmv	не установлена	10 % коэффициент перемешивания ppmv
	Вертикальное разрешение	не установлена	100[b]–500[c] м	не установлена	800 м	не установлена	2 км
Долгосрочная устойчивость			0,3 % в течение 10 лет[b]				

Примечания:

[a] Предельное значение, полученное в исследованиях атмосферной изменчивости (WMO, 1970).

[b] Предельное значение, основанное на требованиях к наблюдениям опорной аэрологической сети ГСНК (WMO, 2009).

[c] Предельное значение, полученное из базы данных с требованиями ВМО в отношении наблюдений (OSCAR/Потребности; см. WMO, 2014), которая ведется в рамках регулярного обзора потребностей КОС, по состоянию на август 2011 г.

Примечание: требования регулярного обзора потребностей и ГСНК относятся к удельной влажности, однако это приводит к слишком строгим предельным значениям в слоях, в которых относительная влажность слишком низкая в нижней и средней тропосфере. Поэтому значения приводятся в виде приблизительно эквивалентной относительной влажности, а коэффициент перемешивания следует использовать при очень низких температурах или в стратосфере.

Таблица 12.B.4. Перечень предельных значений для погрешности (k = 2) и вертикального разрешения для геопотенциальной высоты поверхности 100 гПа и уровней особых точек в соответствии с предельными значениями, принятыми ГСНК/ВМО для измерений температуры на высотах

Слой		*Целевая точность для ЧПП*	*Целевая точность для климата*	*Перспективная точность для ЧПП*
Поверхность до 100 гПа	Погрешность	24 гп. м (= 0,4 K температуры слоя)	12 гп. м (= 0,2 K температуры слоя)	50 гп. м (= 0,8 K температуры слоя)
Нижняя тропосфера	Погрешность в измерении температуры[a]	40 гп. м	16 гп. м в среднем	120 гп. м
	Погрешность для нижней границы облака[b]	30 гп. м		
Верхняя тропосфера	Погрешность в измерении температуры[a]	40 гп. м	14 гп. м в среднем	120 гп. м
Нижняя стратосфера, экваториальная зона	Погрешность в измерении температуры[a]	70 гп. м	48 гп. м	200 гп. м
Нижняя стратосфера, внетропические районы	Погрешность в измерении температуры[a]	100 гп. м	68 гп. м	300 гп. м
Верхняя стратосфера	Погрешность в измерении температуры[a]	80 гп. м	60 гп. м	240 гп. м
Долгосрочная устойчивость			4–8 гп. м в течение 10 лет	

Примечания:

[a] Предельное значение для ошибки определения высоты дает типичную ошибку определения температуры, равную половине значения, указанного в таблице 12.B.2 для предельных значений температуры.

[b] Предельное значение, установленное для обеспечения соответствия с измерениями при помощи оперативных лазерных облакомеров в нижней тропосфере.

ПРИЛОЖЕНИЕ 12.C. БЕЗОПАСНЫЕ ДЛЯ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ РАДИОЗОНДЫ

Ежегодно во всем мире запускается около 620 000 радиозондов. После запуска радиозонд поднимается в атмосферу до тех пор, пока оболочка шар-зонда не разрывается, и радиозонд падает на землю. Все радиозонды вместе с фрагментами оболочки и контейнерами с аппаратурой падают на землю или в океан и, таким образом, загрязняют окружающую среду.

Переносимые на шарах-зондах отработанные средства радиозондирования способны достигать весьма удаленных районов и часто являются единственным источником отходов человеческой деятельности в замкнутых местностях, незатронутых деятельностью человека, природных заповедниках и других экологически уязвимых районах.

Радиозонды, оснащенные подвеской с контейнерами и аппаратурой, представляют особую экологическую проблему. Часто переносимые ими средства радиозондирования застревают в деревьях, на линиях электропередач и конструкциях башенного типа или плавают в океанских водах, возможно, оставаясь там в течение многих лет. Их подвески с аппаратурой представляют собой долгосрочную угрозу для дикой природы на суше и в океанах.

Основная трудность в производстве безопасных для окружающей среды радиозондов заключается в определении материалов, которые одновременно отвечают функциональным требованиям и обладают способностью к разложению окружающей средой. Большинство современных частей радиозондов изготавливаются из не поддающихся разложению окружающей средой материалов. Существуют разлагаемые окружающей средой пластмассы, но в настоящее время только один производитель радиозондов продемонстрировал подвеску радиозонда, изготовленную из таких материалов. Другим производителям рекомендуется использовать биодеградируемые пластмассы, или иные подходящие материалы для радиозондов.

Радиозонды различаются по размеру и весу. По мере того как более крупные и тяжелые радиозонды опускаются, они представляют собой угрозу для людей и животных. Современные технологии позволяют изготавливать радиозонды меньшего размера и более легкие. Всем производителям рекомендуется уменьшить размеры и вес их радиозондов при сохранении функциональности. Преимущество более легких радиозондов состоит в том, что можно использовать оболочку шар-зонда меньшего размера, поэтому требуется меньше газа. Уменьшенный размер оболочки шар-зонда также означает меньшее количество загрязняющих веществ.

Системы крепления подвески со средствами радиозондирования часто изготавливаются из не поддающихся разложению окружающей средой кордов, такого как нейлон, который может сохраняться в окружающей среде десятилетиями. Рекомендуется заменить материал для корда радиозонда на разлагаемые окружающей средой канатно-верёвочные изделия, такие как хлопчатобумажный шпагат или полипропилен без защиты от ультрафиолета. Это снизит риск запутывания обитателей дикой природы в океанах и на суше и приведет к более быстрому высвобождению подвески со средствами радиозондирования, застрявших в деревьях, линиях электропередач и других сооружениях.

Оболочки шар-зонда из синтетического латекса имеют гораздо более медленную скорость разложения, чем латекс из натурального каучука, поэтому предпочтительнее использовать последний.

Радиозондовые батареи всех типов, например, щелочные, литиевые и активируемые водой батареи, содержат токсичные и агрессивные химические вещества. В настоящее время не существует экологически чистых батарей, однако литиевые батареи оказывают

меньшее воздействие. Поскольку производители снижают энергопотребление радиозондов, это позволит использовать батареи меньшего размера и еще больше сократить общий объем загрязняющих веществ.

Операторы и производители радиозондов должны поощрять сбор и возврат или утилизацию радиозондов в соответствии с местными нормативами обращения с электронными и химическими отходами. Оболочку и подвеску радиозонда следует утилизировать как обычные отходы. Обработка на местах сводит к минимуму любое дополнительное воздействие на окружающую среду, связанное с транспортировкой использованных корда и подвески радиозонда.

ПРИЛОЖЕНИЕ 12.D. РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ОРГАНИЗАЦИИ СРАВНЕНИЙ РАДИОЗОНДОВ И УЧРЕЖДЕНИЮ ЦЕНТРОВ ПРОВЕДЕНИЯ ИСПЫТАНИЙ

Примечание: На основе *Сокращенного окончательного отчета с резолюциями и рекомендациями двенадцатой сессии Комиссии по приборам и методам наблюдений* (ВМО-№ 881), дополнение II, и последующих обновлений.

ЧАСТЬ I — РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ОРГАНИЗАЦИИ СРАВНЕНИЙ РАДИОЗОНДОВ

1. Введение

1.1 Настоящие рекомендации исходят из того, что процедуры, которые применяются различными центрами испытаний, соответствуют процедурам, принятым другими национальными и международными организациями. При этом также предполагается, что Организационный комитет будет сформирован из участников (Членов), заинтересованных в проведении сравнений радиозондов, и что, по крайней мере, один из членов комитета не будет представлять ни одного из участников испытаний для того, чтобы обеспечивать руководство проведением сравнений радиозондов. Привлечение такого независимого от участия в испытаниях члена комитета является важным для того, чтобы избежать предвзятости при планировании сравнений. Необходимо также обязательно предусмотреть либо активное участие в сравнениях сотрудников производителей радиозондов, либо проведение подготовки и запуска таких радиозондов независимым оперативным персоналом организации, принимающей у себя в стране сравнения радиозондов.

1.2 Все сравнения различаются между собой до определенной степени, поэтому настоящие рекомендации должны толковаться только в качестве обобщенного перечня задач, которые необходимо выполнить. Если потребуется, Организационному комитету следует вносить изменения, но не в ущерб достоверности результатов и научной оценки испытаний.

1.3 Итоговые отчеты проводившихся ранее сравнений и отчеты организационных совещаний других организационных комитетов могут быть использованы в качестве примера методов проведения сравнений. Секретариат ВМО должен сохранять эти предыдущие отчеты и обеспечивать доступ к ним.

2. Цели сравнений

2.1 Цели сравнений должны быть ясно сформулированы, содержать перечень ожидаемых результатов сравнений и определять, каким образом будут распространяться полученные результаты. Перед Организационным комитетом стоит задача рассмотреть ожидаемые результаты сравнений радиозондов, заранее выявить и предугадать любые потенциальные проблемы. Роль Организационного комитета заключается в обеспечении руководства, но он также обязан вырабатывать ясные и подробные формулировки основных целей, а также критерии для оценки полученных результатов. Организационный комитет должен также определять, как наилучшим образом обеспечить успешное проведение сравнений путем использования имеющихся фундаментальных знаний и накопленного опыта проведения сравнений.

3. Место, время и продолжительность проведения сравнений

3.1 Принимающая организация должна предоставить Организационному комитету и участникам описание предложенного места и условий (местоположение

и др.) проведения сравнений, характеристик окружающей среды, климатологических параметров и рельефа местности. Принимающая организация должна также сообщить имя руководителя или администратора проекта, который будет отвечать за оперативную деятельность во время проведения сравнений и выступать в роли контактного лица для оказания необходимого содействия.

3.2 Организационный комитет должен посетить предложенный центр проведения сравнений, чтобы выяснить, соответствуют ли задачам его технические возможности и, если это необходимо, предложить внести изменения. После того как Организационный комитет признает адекватность предложенного центра и его возможностей, руководитель проекта должен подготовить описание места и окружающей его среды для распространения среди участников сравнений. Руководитель проекта, знакомый с графиком работы принимающей организации, должен определить дату начала сравнений и их продолжительность. Копия этого графика должна быть предоставлена Организационному комитету.

3.3 Помимо даты начала сравнений руководитель проекта должен предложить дату, когда его полигон проведения испытаний будет предоставлен для установки оборудования участников, и организовать подключение к системе сбора данных. Необходимо предусмотреть выделение времени всем участникам для проверки и тестирования оборудования до начала сравнений, а также предоставить им дополнительное время для того, чтобы операторы ознакомились с действующим порядком выполнения работ на полигоне.

4. Участие в сравнениях

4.1 В соответствии с требованиями руководитель проекта и/или Организационный комитет должны пригласить через Генерального секретаря ВМО страны-члены принять участие в сравнениях. Однако, как только участники определены, руководитель проекта должен взять на себя все последующие шаги по взаимодействию с участниками.

4.2 Руководитель проекта должен составить подробный вопросник, который рассылается Генеральным секретарем ВМО всем участникам с целью получения информации о каждом типе приборов, предложенных для сравнений. Предполагается, что участники предоставят информацию о необходимых размерах помещения для оборудования, средствах связи, особых требованиях к подключению аппаратуры и характеристиках программного обеспечения. Они также должны предоставить соответствующую документацию с описанием своего наземного и подвешенного к газонаполненной оболочке контрольно-измерительного оборудования.

4.3 Важно, чтобы участники предоставили информацию о методике калибровки своих радиозондов, отвечающей стандартам образцовых средств измерений. Хотя и ожидается, что в сравнениях будут участвовать оперативные радиозонды, это не всегда обязательно; новые или исследовательские типы радиозондов могут быть допущены к участию в испытаниях по согласованию со всеми участниками сравнений, руководителем проекта и Организационным комитетом.

5. Обязательства

5.1 *Участники*

5.1.1 Участники отвечают за перевозку своего оборудования и расходы, связанные с такой перевозкой.

5.1.2 Участники устанавливают и демонтируют свое собственное оборудование по согласованию с руководителем проекта. Принимающая организация в случае необходимости оказывает помощь в распаковке и упаковке оборудования.

5.1.3 Участники обеспечивают свои системы всем необходимым вспомогательным оборудованием, крепежными приспособлениями для наземного оборудования, сигнальными и силовыми кабелями, запасными частями и расходными материалами. Участники обеспечивают доступ (если возникает необходимость в оказании помощи со стороны принимающей организации) к подробным инструкциям и руководствам, необходимым для установки, эксплуатации и обслуживания оборудования, а также, в случае необходимости, калибровки.

5.1.4 Участники подписывают соглашение о протоколе передачи данных в рамках проводимого сравнения.

5.2 *Организация, принимающая у себя сравнения*

5.2.1 Принимающая организация при необходимости оказывает помощь участникам в распаковке и установке оборудования и предоставляет возможности для хранения необходимого имущества, такого как расходные материалы, запасные части и техническая документация.

5.2.2 Принимающая организация, при необходимости, предоставляет вспомогательное оборудование, если такое имеется у нее.

5.2.3 Принимающая организация, при необходимости, оказывает помощь участникам в подключении к оборудованию принимающей организации для сбора данных.

5.2.4 Принимающая сторона гарантирует надлежащее соблюдение всех правовых обязательств, связанных с проведением аэрологических измерений (например, авиационные правила и правила использования радиочастот страны проведения сравнений).

5.2.5 Принимающая организация может предоставлять информацию по таким вопросам, как размещение участников, местный транспорт и повседневная логистическая поддержка, но она не обязана финансировать покрытие расходов, связанных с размещением персонала.

6. Регламент проведения сравнений

6.1. Руководитель проекта осуществляет контроль за всеми испытаниями и ведет регистрацию каждой связки радиозондов наряду со всей соответствующей информацией о радиозондах, находящихся в полете, а также метеорологических условий.

6.2 Замены оборудования или программного обеспечения разрешаются по согласованию с руководителем проекта. Необходимо уведомить об этом других участников. Руководитель проекта заполняет журнал, содержащий записи обо всем оборудовании, задействованном в проведении сравнений, и обо всех произведенных заменах.

6.3 Разрешается проведение незначительных ремонтных работ (например, замена предохранителя и др.), не оказывающих влияние на точность измерений аппаратуры. Руководитель проекта должен быть осведомлен о таких незначительных ремонтных работах, о чем делается соответствующая запись в журнале.

6.4 Проверка настройки и обслуживание оборудования участниками испытаний, требующие привлечения специалистов или специального оборудования, разрешаются после уведомления об этом руководителя проекта.

6.5 Любая проблема, которая ставит под угрозу полученные результаты сравнений или работу любого оборудования, должна быть рассмотрена руководителем проекта.

7. Сбор данных

7.1 Организационный комитет должен согласовать соответствующие процедуры сбора данных, таких как частота проведения измерений, интервалы между измерениями, осреднение данных, предварительная обработка данных (может быть ограничена в силу функциональных возможностей отдельных участников), форматы данных, оперативный контроль качества, контроль качества полученных результатов и статистическая отчетность.

7.2 Действующий на начальном этапе Международный организационный комитет принимает решение относительно оборудования и программного обеспечения для сбора данных во время испытания. Все это должно быть тщательно протестировано перед началом сравнений, и предпочтение следует отдавать широко известному программному обеспечению для обработки данных типа того, которое описано в WMO (1996*b*).

7.3 Задержка по времени между проведением наблюдений и предоставлением данных руководителю проекта устанавливается руководителем проекта по согласованию с участниками. Задержка в один час после окончания наблюдений (разрыв оболочки) считается приемлемой.

7.4 Ответственность за уточняющие данные перед проведением анализа, последующий контроль качества данных и за предоставление итоговых данных остается за руководителем проекта.

7.5 Руководитель проекта принимает решение о выборе носителя информации для хранения данных, принимая во внимание возможности принимающей организации, но применяемые носители информации для предоставления участникам итоговых данных могут различаться в зависимости от компьютерных возможностей каждого участника испытаний. Руководитель проекта должен быть осведомлен о таких требованиях.

7.6 Руководитель проекта отвечает за предоставление итоговых данных всем участникам, поэтому принимающая организация должна быть в состоянии получить все индивидуальные файлы данных от каждого участника.

8. Обработка и анализ данных

8.1 *Анализ данных*

8.1.1 Основные принципы анализа данных должны быть рассмотрены и одобрены заблаговременно до начала проведения сравнений. Эти основные принципы следует включить в программу испытаний в качестве ее составной части.

8.1.2 Между участниками должно быть достигнуто согласие в отношении метода преобразования данных, алгоритмов калибровки и внесения поправок, терминов и сокращенных наименований, постоянных величин и исчерпывающего описания предложенных методов статистического анализа. Принципиально важно, чтобы обработка данных осуществлялась опытными специалистами, назначенными ВМО.

8.1.3 Организационный комитет должен проверять пригодность применения выбранных процедур проведения анализа.

8.1.4 Результаты сравнений должны быть изучены Организационным комитетом, который рассматривает содержание окончательного отчета и приведенные в нем рекомендации.

8.2 *Обработка данных и доступность базы данных*

8.2.1 Все существенные метеорологические данные и данные об окружающей среде должны храниться в базе данных для дальнейшего использования и анализа участниками. Руководитель проекта осуществляет контроль за этими данными.

8.2.2 После окончания сравнений руководитель проекта предоставляет каждому участнику полный комплект данных всех участников сравнений.

9. Окончательный отчет о проведении сравнений

9.1 Руководитель проекта готовит проект окончательного отчета, который предоставляется Организационному комитету и участникам сравнений для комментариев и дополнений. Необходимо оговорить временной период для получения ответа.

9.2 Комментарии и дополнения должны быть направлены руководителю проекта и в копии в Организационный комитет.

9.3 После внесения дополнений в проект окончательного отчета он должен быть представлен на рассмотрение Организационного комитета, который может пожелать собраться для его обсуждения, если это необходимо, или может одобрить этот окончательный документ.

9.4 После утверждения Организационным комитетом окончательного документа для его публикации, он направляется в Секретариат для публикации и распространения ВМО.

9.5 Воспроизведение для коммерческих целей любых графиков или таблиц из окончательного отчета не разрешается без специального разрешения ВМО.

10. Заключительные примечания

10.1 Организационный комитет может согласиться с тем, что промежуточные результаты могут быть предоставлены только руководителем проекта, и что участники могут представлять ограниченные данные на технических конференциях, за исключением их собственных данных, полученных в ходе испытаний, которые могут быть использованы ими без ограничений. Как только Секретариат ВМО включит в график публикацию окончательного отчета, ВМО обеспечивает доступ к этим данным всем Членам, которые попросят об этом. После этого Члены имеют право анализировать эти данные и представлять результаты на совещаниях и в публикациях.

ЧАСТЬ II — РЕКОМЕНДАЦИИ ПО УЧРЕЖДЕНИЮ ЦЕНТРОВ ПРОВЕДЕНИЯ ИСПЫТАНИЙ

1. Введение

1.1 Для поддержания долгосрочной стабильности глобальной системы аэрологических наблюдений важно сохранять возможность проведения количественных сравнений радиозондов. Существующие и новые оперативные системы радиозондирования должны на регулярной основе подвергаться проверке с использованием контрольных приборов во время полетов. Члены должны обеспечивать сохранение минимального числа центров проведения испытаний с необходимой инфраструктурой для проведения сравнительных испытаний радиозондов.

1.2 Опыт проведения после 1984 г. серии сравнений радиозондов ВМО показывает, что необходимо иметь ряд центров для того, чтобы проводить сравнения радиозондов при разнообразных полетных условиях.

1.3 Работа датчика относительной влажности особенно зависит от условий во время испытаний, например, количества облачности и дождевых осадков во время подъема радиозонда, или от того, высокая или низкая влажность у поверхности.

1.4 Погрешности в измерении температуры в дневное время зависят от солнечного альбедо и тем самым от альбедо поверхности и облачного покрова. Таким образом, погрешности в определении температуры в прибрежных и континентальных районах могут значительно различаться. Погрешности, обусловленные влиянием ИК-излучения на датчик температуры, будут зависеть не только от состояния подстилающей поверхности и распределения облачности, но и от температуры атмосферы. Поэтому погрешности в определении температуры в результате влияния инфракрасного излучения в тропиках (например, вблизи тропопаузы) будут совершенно другими по сравнению с погрешностями в средних широтах.

1.5 Погрешности при наблюдениях за ветром на высотах с помощью многих аэрологических систем зависят от удаленности радиозонда от места его запуска (а также угла наклона траектории полета радиозонда). Поэтому сравнения должны проводиться в условиях как слабого, так и сильного ветра на высотах.

2. Требования к материально-технической базе центра

2.1 Центр, подходящий для проведения испытаний, должен иметь достаточно зданий/помещений для обеспечения работы, как минимум, четырех различных систем.

2.2 Центр должен обеспечивать возможности для измерения с хорошим качеством приземной температуры, относительной влажности, давления и ветра вблизи площадок для запуска радиозондов. Возможность проведения дополнительных образцовых измерений температур, давления и относительной влажности давало бы преимущество такому центру.

2.3 Центр проведения испытаний должен иметь средства для обеспечения прямых измерений геопотенциальной высоты во время испытательных полетов (возможно с использованием радиозонда с ГСОМ, позволяющей определять высоту с высокой точностью).

2.4 Центр проведения испытаний должен иметь успешно функционирующий наземный датчик с ГСОМ для измерения интегрального содержания водяного пара или наземные радиометры и интерферометры.

2.5 В центре проведения испытаний желательно иметь системы наблюдений за облаками, такие как лазерный высотомер для измерения нижней границы облачности, и радиолокаторы, определяющие характеристики облачности.

2.6 Лидар для измерений аэрозолей и лидар для измерения относительной влажности, могут также оказаться полезными в центре проведения испытаний.

2.7 Центр проведения испытаний должен быть одобрен национальными органами по контролю за воздушным пространством для запусков больших газонаполненных оболочек (вес оболочки 3 000 гр) с полезной грузоподъемностью до 5 кг. Ангары для наполнения оболочек должны позволять запускать такие большие оболочки.

3. Предлагаемые географические регионы для испытаний

3.1 Для того чтобы способствовать проведению испытаний основными производителями радиозондов целесообразно сохранять или создать центры для испытаний в средних широтах в Северной Америке, Европе и Азии. В идеале каждый из этих регионов должен иметь, как минимум, два центра, один с прибрежными (морскими) условиями и другой внутри континента.

3.2 Кроме того, целесообразно определить минимум два центра в тропиках, особенно для испытаний датчиков относительной влажности.

3.3 Если упомянутые выше главные центры проведения испытаний не обеспечивают адекватные экстремальные условия для испытания датчиков относительной влажности (например, условия с очень низкой влажностью на малых высотах), может возникнуть необходимость выбрать дополнительные центры проведения испытаний в засушливых районах или там, где приземные температуры воздуха очень низкие (ниже –30 °C зимой). Возможно, некоторые из них могут быть выбраны из уже функционирующих центров ГРУАН.

ЧАСТЬ III — РУКОВОДЯЩИЕ УКАЗАНИЯ ПО ИСПЫТАНИЯМ ОПЫТНЫХ ОБРАЗЦОВ

1. Введение

1.1 Крупные сравнения радиозондов ВМО организуются приблизительно каждые 5–6 лет, то есть, когда большая группа изготовителей может извлечь пользу из крупномасштабного испытания систем, которые уже прошли прототипные испытания. Для новых проектов или тех изготовителей, которые работают над устранением проблем, выявленных во время сравнений радиозондов ВМО, необходимо проводить менее масштабные и более дешевые испытания.

1.2 Возможно для изготовителей, пытающихся продемонстрировать, что проблема была устранена, лучше всего проводить испытания на одном из испытательных полигонов КПМН, специально выделенных для этих целей.

1.3. С другой стороны, при разработке и выборе новых конструкционных решений для радиозондов на национальном уровне имеет смысл проводить испытания опытного образца на подходящих национальных площадках.

2. Рекомендуемая процедура

2.1 Испытания для подтверждения того, что проблемы были устранены, должны проводиться с использованием стандартов и методов, аналогичных тем, которые используются в сравнениях радиозондов ВМО. Для этого требуется, чтобы на каждом испытательном полигоне КПМН работал персонал, который хорошо знаком с процедурами и методами сравнений радиозондов ВМО, а также необходимо использовать два типа радиозондов, качество работы которых хорошо известно, в качестве рабочих стандартов/радиозондов связи с результатами сравнений радиозондов ВМО.

2.2 Для национальных испытаний опытного образца очень важно сравнивать результаты измерений, полученных в совместном полете радиозондов под одной газонаполненной оболочкой. В идеале радиозонды следует подвешивать таким образом, чтобы они могли свободно вращаться в полете, поскольку именно это происходит во время отдельных подъемов. Радиочастотные характеристики нового радиозонда должны быть достаточно хорошими с тем, чтобы не происходило дрейфа частоты и не создавались помехи для радиозонда, с которым проводится сравнение. Сравнение результатов должно проводиться в зависимости от времени от начала полета, поскольку

неразумно полагать, что определение высоты/давления при измерениях температуры и относительной влажности характеризуется пренебрежимо малой погрешностью. Число испытательных полетов вначале может быть достаточно небольшим, поскольку некоторые первоначальные погрешности зачастую бывают большими и могут быть выявлены достаточно быстро даже путем сравнения с отечественным радиозондом более низкого качества.

2.3 Однако, если стоит задача улучшить новую конструкцию национального радиозонда таким образом, чтобы качество его измерений приблизилось к высококачественным радиозондам, испытанным во взаимных сравнениях высококачественных систем радиозондирования ВМО, тогда будет необходимо использовать один из радиозондов более высокого качества в качестве испытательного эталона. Всегда следует выполнять инструкции изготовителя при подготовке радиозонда более высокого качества к испытательным полетам. Испытания должны проводиться в дневное и ночное время, поскольку требуется выявить погрешности радиозонда для дневных температур, вместе с тем в ночное время погрешности измерения относительной влажности часто бывают хуже, чем в дневное время.

2.4 Окончательные испытания опытного образца необходимо проводить в такое время года, когда колебания относительной влажности по вертикали и со временем являются большими на всех уровнях в тропопаузе.

3. Архивирование результатов

3.1 Результаты испытаний в центрах проведения испытаний КПМН должны быть направлены в соответствующую группу экспертов КПМН для проверки и размещения на веб-сайтах КПМН.

3.2 После того, как новая национальная разработка полностью отработана, желательно также в дальнейшем направлять результаты сравнительных испытаний в соответствующую группу экспертов КПМН.

СПРАВОЧНАЯ И ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ЛИТЕРАТУРА

Всемирная метеорологическая организация, 1992: Международный метеорологический словарь (ВМО-№ 182). Женева.

———, 2011*a*: *Технический регламент* (ВМО-№ 49), том I, приложение A. Женева.

———, 2011*c (обновлено в 2017 г.)*: *Наставление по кодам* (ВМО-№ 306), том I.1. Женева.

———, 2015*a* (обновлено в 2017 г.): *Наставление по Интегрированной глобальной системе наблюдений ВМО* (ВМО-№-1160). Женева.

Fujiwara, M., M. Shiotani, F. Hasebe, H. Vömel, S.J. Oltmans, P.W. Ruppert, T. Horinouchi and T. Tsuda, 2003: Performance of the Meteolabor "Snow White" chilled-mirror hygrometer in the tropical troposphere: Comparisons with the Vaisala RS80 A/H-Humicap sensors. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 20:1534–1542.

Hyland, R.W. and A. Wexler, 1983: Formulations for the thermodynamic properties of the saturated phases of H2O from 173.15 K to 473.15 K. *ASHRAE Transactions*, 89(2A):500–519.

Immler, F.J., J. Dykema, T. Gardiner, D.N. Whiteman, P.W. Thorne and H. Vömel, 2010: Reference quality upper-air measurements: guidance for developing GRUAN data products. *Atmospheric Measurement Techniques*, 3:1217–1231.

Kitchen, M., 1989: Representativeness errors for radiosonde observations. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 115:673–700.

Kursinski, E.R., G.A. Hajj, J.T. Schofield, R.P. Linfield and K.R. Hardy, 1997: Observing Earth's atmosphere with radio occultation measurements using the Global Positioning System. *Journal of Geophysical Research*, 102:23429–23466.

List, R.J., 1968: *Smithsonian Meteorological Tables*. Washington, Smithsonian Institution Press.

Luers, J.K. and R.E. Eskridge, 1998: Use of radiosonde temperature data in climate studies. *Journal of Climate*, 11:1002–1019.

McIlveen, J.F.R. and F.H. Ludlam, 1969: The lag of the humidity sensor in the British radiosonde. *Meteorological Magazine*, 98:233–246.

Miloshevich, L.M., A. Paukkunen, H. Vömel and S.J. Oltmans, 2004: Development and validation of a time-lag correction for Vaisala radiosonde humidity measurements. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 21:1305–1327.

Miloshevich, L.M., H. Vömel, D.N. Whiteman and T. Leblanc, 2009: Accuracy assessment and correction of Vaisala RS92 radiosonde water vapor measurements. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 114(D11305).

Nash, J., 1984: *Compatibility of Radiosonde Measurements in the Upper Troposphere and Lower Stratosphere for the Period 1 November 1981 to 31 October 1982*. Meteorological Office, Bracknell, OSM No. 24.

Nash, J., J.B. Elms and T.J. Oakley, 1995: Relative humidity sensor performance observed in recent international radiosonde comparisons. *Ninth AMS Symposium on Meteorological Observations and Instrumentation*, Charlotte, North Carolina, pp. 43–48.

Paukkunen, A., 1995: Sensor heating to enhance reliability of radiosonde humidity measurement. *Ninth AMS Symposium on Meteorological Observations and Instrumentation*, Charlotte, North Carolina, pp. 65–69.

Philipona, R., A. Kräuchi, G. Romanens, G. Levrat, P. Ruppert, E. Brocard, P. Jeannet, D. Ruffieux and B. Calpini, 2013: Solar and thermal radiation errors on upper-air radiosonde temperature measurements. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 30:2382–2393.

Schmidlin, F.J., H. Sang Lee and B. Ranganayakamma, 1995: Deriving the accuracy of different radiosonde types using the three-thermistor radiosonde technique. *Ninth AMS Symposium on Meteorological Observations and Instrumentation*, Charlotte, North Carolina, pp. 27–31.

Shimizu, K. and F. Hasebe, 2010: Fast-response high-resolution temperature sonde aimed at contamination-free profile observations. *Atmospheric Measurement Techniques*, 3:1673–1681.

Sonntag, D., 1994: Advancements in the field of hygrometry. *Zeitschrift für Meteorologie*, 3(2):51–66.

Turner, D.D., B.M. Lesht, S.A. Clough, J.C. Liljegren, H.E. Revercomb and D.C. Tobon, 2003: Dry bias and variability in Vaisala RS80-H radiosondes: The ARM experience. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 20:117–132.

Turtiainen, H., S. Tammela and I. Stuns, 1995: A new radiosonde temperature sensor with fast response time and small radiation error. *Ninth AMS Symposium on Meteorological Observations and Instrumentation*, Charlotte, North Carolina, pp. 60–64.

Vömel, H., D.E. David and K. Smith, 2007*a*: Accuracy of tropospheric and stratospheric water vapor measurements by the cryogenic frost point hygrometer: Instrument details and observations. *Journal of Geophysical Research*, 112(D08305).

Vömel, H., H. Selkirk, L. Miloshevich, J. Valverde-Canossa, J. Valdés, E. Kyrö, R. Kivi, W. Stolz, G. Peng and J.A. Diaz, 2007*b*: Radiation dry bias of the Vaisala RS92 humidity sensor. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 24:953–963.

Wade, C.G., 1995: Calibration and data reduction problems affecting national weather service radiosonde humidity measurements. *Ninth AMS Symposium on Meteorological Observations and Instrumentation*, Charlotte, North Carolina, pp. 37–42.

Wang, J. and L. Zhang, 2008: Systematic errors in global radiosonde precipitable water data from comparisons with ground-based GPS measurements. *Journal of Climate*, 21:2218–2238.

Wexler, A., 1976: Vapor pressure formulation for water in range 0 to 100 °C. A revision. *Journal of Research of the National Bureau of Standards – A. Physics and Chemistry*, 80A(5 and 6):775–785.

———, 1977: Vapor pressure formulation for ice. *Journal of Research of the National Bureau of Standards – A. Physics and Chemistry*, 81A(1):5–20.

World Meteorological Organization, 1970: *Performance Requirements of Aerological Instruments: an Assessment Based on Atmospheric Variability* (C.L. Hawson). Technical Note No. 112 (WMO-No. 267, TP. 151). Geneva.

———, 1975: *Upper-Air Sounding Studies* (A.H. Hooper). Technical Note No. 140 (WMO-No. 394), Volume I. Geneva.

———, 1986: *Algorithms for Automatic Aerological Soundings* (A.H. Hooper). Instruments and Observing Methods Report No. 21 (WMO/TD-No. 175). Geneva.

———, 1987: *WMO International Radiosonde Comparison (UK 1984, USA 1985): Final Report* (J. Nash and F.J. Schmidlin). Instruments and Observing Methods Report No. 30 (WMO/TD-No. 195). Geneva.

———, 1989*a*: SRS-400: The new Swiss radiosonde (B. Hoegger, A. Heimo, G. Levrat and J. Rieker). Paper presented at the Fourth WMO Technical Conference on Instruments and Methods of Observation (TECIMO-IV). Instruments and Observing Methods Report No. 35 (WMO/TD-No. 303). Geneva.

———, 1989*b*: *Compatibility of Radiosonde Geopotential Measurements* (M. Kitchen). Instruments and Observing Methods Report No. 36 (WMO/TD-No. 344). Geneva.

———, 1991: *WMO International Radiosonde Comparison – Phase III, Dzhambul (USSR), 1989: Final Report* (A. Ivanov, A. Kats, S. Kurnosenko, J. Nash and N. Zaitseva). Instruments and Observing Methods Report No. 40 (WMO/TD-No. 451). Geneva.

———, 1993*a*: *Historical Changes in Radiosonde Instruments and Practices* (D.J. Gaffen). Instruments and Observing Methods Report No. 50 (WMO/TD-No. 541). Geneva.

———, 1993*b*: *Report by the Rapporteur on Radiosonde Compatibility Monitoring*. Part A: WMO Catalogue of Radiosondes and Upper-air Wind Systems in Use by Members (1993), Part B: Compatibility of Radiosonde Geopotential Measurements 1990, 1991 and 1992 (T. Oakley). Instruments and Observing Methods Report No. 56 (WMO/TD-No. 587). Geneva.

———, 1994: The difference in observed temperatures from radiosondes suspended 10 m and 40 m beneath a 1400 g balloon (J.B. Elms, J. Nash and G. Williams). Paper presented at the WMO Technical Conference on Instruments and Methods of Observation (TECO-94). Instruments and Observing Methods Report No. 57 (WMO/TD-No. 588). Geneva.

———, 1996*a*: *WMO International Radiosonde Comparison – Phase IV, Tsukuba (Japan), 1993: Final Report* (S. Yagi, A. Mita and N. Inoue). Instruments and Observing Methods Report No. 59 (WMO/TD-No. 742). Geneva.

———, 1996*b*: *Description and User Guide for the Radiosonde Comparison and Evaluation Software Package (RSKOMP – Version 3/Version 4)* (S. Kurnosenko and T. Oakley). Instruments and Observing Methods Report No. 60 (WMO/TD-No. 771). Geneva.

———, 1998: *Report by the Rapporteur on Radiosonde Compatibility Monitoring*. Part A: WMO Catalogue of Radiosondes and Upper-air Wind Systems in Use by Members (1998), Part B: Compatibility of Radiosonde Geopotential Measurements 1995, 1996 and 1997 (T. Oakley). Instruments and Observing Methods Report No. 72 (WMO/TD-No. 886). Geneva.

———, 2003: *WMO Catalogue of Radiosondes and Upper-air Wind Systems in Use by Members in 2002 and Compatibility of Radiosonde Geopotential Measurements for Period from 1998 to 2001* (J. Elms). Instruments and Observing Methods Report No. 80 (WMO/TD-No. 1197). Geneva.

———, 2006*a*: *WMO Intercomparison of Radiosonde Systems – Vacoas (Mauritius), 2005* (J. Nash, R. Smout, T. Oakley, B. Pathack and S. Kurnosenko). Instruments and Observing Methods Report No. 83 (WMO/TD-No. 1303). Geneva.

———, 2006*b*: *The WMO Radiosonde Humidity Sensor Intercomparison* (A. Balagurov, A. Kats and N. Krestyannikova (Phase I, Russian Federation) and F. Schmidlin (Phase II, USA)). Instruments and Observing Methods Report No. 85 (WMO/TD-No. 1305). Geneva.

———, 2006*c*: *WMO Intercomparison of GPS Radiosondes – Alcântara (Brazil), 2001* (R. da Silveira, G.F. Fisch, L.A.T. Machado, A.M. Dall'Antonia, L.F. Sapucci, D. Fernandes, R. Marques and J. Nash). Instruments and Observing Methods Report No. 90 (WMO/TD-No. 1314). Geneva.

———, 2006*d*: Recent application of the Accurate Temperature Measuring (ATM) radiosonde (F.J. Schmidlin). Paper and posters presented at the WMO Technical Conference on Meteorological and Environmental Instruments and Methods of Observation (TECO-2006). Instruments and Observing Methods Report No. 94 (WMO/TD-No. 1354). Geneva.

———, 2009: *GRUAN Implementation Plan 2009–2013*. GCOS-134 (WMO/TD-No. 1506). Geneva.

———, 2010: A new operational radiosonde for the UK. Procurement testing at Camborne Met Office, September–October 2009 (J. Nash, M. Smees et al.). *Papers and posters presented at the WMO Technical Conference on Meteorological and Environmental Instruments and Methods of Observation (TECO-2010)*. Instruments and Observing Methods Report No. 104 (WMO/TD-No. 1546). Geneva.

———, 2011*b*: *WMO Intercomparison of High Quality Radiosonde Systems – Yangjiang (China), 2010* (J. Nash, T. Oakley, H. Vömel and L. Wei). Instruments and Observing Methods Report No. 107 (WMO/TD-No. 1580). Geneva.

———, 2014: Observing Systems Capability Analysis and Review Tool (OSCAR): user requirements for observation, http://www.wmo-sat.info/oscar/observingrequirements.

———, 2015*b*: *Measurement of Upper-air Pressure, Temperature and Humidity* (J. Nash). Instruments and Observing Methods Report No. 121. Geneva.

ГЛАВА 13. ИЗМЕРЕНИЕ ВЕТРА НА ВЫСОТАХ

13.1 ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

13.1.1 Определения

Нижеследующие определения взяты из *Наставления по Глобальной системе наблюдений* (ВМО, 2010):

Шаропилотное наблюдение. Определение ветра на высотах путем прослеживания при помощи оптического прибора траектории свободного полета шара-пилота.

Радиоветровое наблюдение. Определение ветра на высотах путем прослеживания траектории свободного полета шара-пилота при помощи электронных средств.

Радиоветровое зондирование. Сочетание радиозондовых и радиоветровых наблюдений.

Аэрологическое наблюдение. Метеорологическое наблюдение, производимое в свободной атмосфере прямо или косвенно.

Наблюдение за ветром на высотах. Наблюдение на данной высоте или результаты завершенного зондирования направления и скорости ветра в атмосфере.

В этой главе рассматриваются, в первую очередь, радиоветровые и шаропилотные наблюдения. Методы использования шаров-зондов, а также измерения с использованием специальных платформ, специализированного оборудования или произведенные косвенным образом с помощью методов дистанционного зондирования, рассматриваются в различных главах тома III настоящего Руководства. В настоящее время большое количество наблюдений получают с коммерческих воздушных судов, а также с помощью профилометров ветра и метеорологических радиолокаторов. Данные шаров-зондов собираются, главным образом, посредством использования методов радиоветрового зондирования, хотя в тех случаях, когда требуются дополнительные данные о ветре на высотах без больших затрат на запуск радиозонда, можно использовать шаропилотные и радиоветровые наблюдения.

13.1.2 Единицы измерения ветра на высотах

Скорость ветра на высотах обычно измеряется в метрах в секунду или в узлах, но может измеряться и в километрах в час. Направление, откуда приходит воздушный поток, измеряется в градусах от севера: 90° соответствует ветру с востока, 180° — с юга, 270° — с запада и 0/360° — с севера. В сводках TEMP направление ветра округляется до ближайших 5°. Измерение с таким разрешением понижает точность, которую можно достичь с помощью самых современных систем, особенно при сильном ветре на высотах. Данные этих систем, кодируемые в коде BUFR, обеспечивают более точную информацию о направлении и скорости ветра на высотах.

В пределах широты 1° от Северного или Южного полюса в сводках о приземном ветре используется направление, при котором ноль азимутного круга совпадет с 0° по Гринвичскому меридиану. Такая система координат должна использоваться на всех стационарных и мобильных аэрологических станциях, расположенных в пределах 1° от Северного или Южного полюса, для направления ветра на всех уровнях полного зондирования, даже если шар движется далеко за пределы широты 1° от полюса. В коде сообщения при этом должно быть указано, что в данной аэрологической сводке используется другая система координат, в частности, если кодирование осуществляется в традиционных буквенно-цифровых кодах. Местоположение станции в коде BUFR автоматически указывает на использование другой системы координат.

Высота, указываемая при сообщении данных измерений радиоветрового наблюдения/зондирования, является геопотенциальной высотой, так что измерения ветра производятся на тех же высотах, что и радиозондовые измерения температуры и относительной влажности (см. настоящий том, глава 12, 12.3.6). Геопотенциальная высота, преобразованная из геометрической высоты, измеренной радиозондом ГСОМ или радиолокатором, является функцией гравитационного поля в данном месте и не зависит от профилей температуры и ветра. Гравитационная потенциальная энергия единицы массы (Φ) — это интеграл нормальной силы тяжести от высоты СУМ ($z_{\text{geometric}} = 0$) по высоте, на которой расположена масса ($z_{\text{geometric}} = Z$), как описано в уравнении 13.1.

$$\Phi = \int_0^z \gamma(z_{\text{geometric}}, \varphi) dz_{\text{geometric}} \tag{13.1}$$

где $\gamma(z_{\text{geometric}}, \varphi)$ — нормальная сила тяжести над геоидом. Это функция геометрической высоты $z_{\text{geometric}}$ и геодезической широты φ.

Для того, чтобы получить геопотенциальную высоту, используемую ВМО, этот геопотенциал делят на нормальную силу тяжести на широте 45° следующим образом:

$$z\left(z_{\text{geometric}}, \varphi\right) = \Phi\left(z_{\text{geometric}}, \varphi\right) / \gamma_{45^\circ} = \left(\int_0^z \gamma\left(z_{\text{geometric}}, \varphi\right) dz_{\text{geometric}}\right) / \gamma_{45^\circ} \tag{13.2}$$

где γ_{45° — по определению равна 9,80665 м·с$^{-2}$.

Таким образом, единицей высоты является стандартный геопотенциальный метр. В тропосфере значение геопотенциальной высоты является хорошим приближением к высоте, выраженной в метрах (см., например, настоящий том, глава 12, таблица 12.4). Значения геопотенциальной высоты, используемые в сводках, содержащих данные о ветре на высотах, отсчитываются от уровня моря, хотя во многих системах расчеты геопотенциальной высоты первоначально выполняются применительно к высоте над уровнем станции.

Метод преобразования геометрической высоты в геопотенциальную более подробно описан в настоящем томе, глава 12, где приводятся соответствующие выражения, описывающие зависимость гравитационного поля от высоты и широты.

13.1.3 Метеорологические требования

13.1.3.1 *Области применения в метеорологической практике*

Наблюдения за ветром на высотах имеют большое значение для глобального оперативного прогнозирования погоды в любом масштабе и часто наиболее эффективны при проведении параллельно с одновременными измерениями полей характеристик воздушных масс (температуры и относительной влажности):

a) в пограничном слое значения ветра на высотах, обеспечивающие надежные измерения вертикального сдвига ветра, существенны для прогнозирования загрязнения окружающей среды;

b) они чрезвычайно важны для обеспечения безопасности и экономичности полетов воздушных судов;

c) точные измерения ветра на высотах, а также измерения вертикального сдвига ветра критически важны при запуске космических аппаратов и других типов ракет;

d) погрешности данных о ветре на высотах ограничивают точность современной артиллерии, и поэтому эти данные важны с точки зрения безопасности при проведении военных операций;

e) скорость ветра на высотах является одной из важнейших климатических переменных.

13.1.3.2 *Усовершенствование процедур передачи сообщений*

В численных прогнозах погоды обычно используются значения ветра на высотах, усредненные по слоям; при этом толщина слоев зависит от масштабов прогнозируемых атмосферных движений. Эти значения не всегда используются при стандартных уровнях по давлению или высоте; обычно эти значения относятся к барометрическим высотам, которые изменяются по мере изменения давления у поверхности Земли в месте наблюдения. Таким образом, исключительно важно, чтобы изменения ветра между стандартными уровнями были с хорошей точностью представлены в сводках, содержащих значения ветра на высотах. Это внесет дополнительный вклад в повышение точности значений ветра, передаваемых для стандартных уровней.

В современных системах радиоветрового зондирования имеется возможность при помощи компьютеров без задержки передавать данные обо всех деталях вертикальной структуры, представляющих интерес для метеорологической деятельности и научных исследований. Сводки о ветре на высотах должны содержать достаточно информации, для того чтобы определить вертикальный сдвиг ветра на границе слоев с различными характеристиками воздушных масс. Например, данные о сдвиге ветра через инверсии температуры или о значительном сдвиге ветра, связанном с существенными изменениями относительной влажности с высотой, следует сообщать во всех случаях, когда это возможно.

Когда данные о ветре на высотах сообщаются с использованием кода FM 35-XI Ext. TEMP или FM 32-XI Ext. PILOT (ВМО, 2011*a*), значения скорости ветра могут отклоняться до 5 $м \cdot с^{-1}$ от линейной интерполяции между значимыми уровнями. Использование автоматизированных алгоритмов с таким установленным пределом отклонения может вызывать ошибки при передаче сообщений, которые будут значительно превышать ошибки наблюдений. Иногда процедура кодирования может также привести к уменьшению точности до такой степени, что не будут удовлетворяться требования к точности, изложенные в настоящем томе, глава 12.

Это должно быть предотвращено в максимально короткие сроки путем представления сводок с использованием соответствующего кода BUFR, позволяющего сообщать данные о вертикальном профиле ветра с высоким разрешением в дополнение к значимым уровням в целях удовлетворения потребностей пользователей. Однако пока это не будет достигнуто, установленный предел отклонения для скорости ветра, равный 3 $м \cdot с^{-1}$ вместо 5 $м \cdot с^{-1}$, можно принять в качестве национальной практики для сообщений TEMP и PILOT. Сужение установленного предела должно привести в среднем приблизительно к одному сообщению, содержащему данные о ветре на значимом уровне на километр по вертикали. Сводки TEMP или PILOT должны быть визуально сверены с результатами детализированных измерений ветра на высотах, и передаваемые сообщения должны быть отредактированы, с тем чтобы избежать недопустимых ошибок перед их выпуском.

В прежние годы значения ветра на высотах обычно обрабатывались вручную или с использованием небольшого вычислительного устройства, и было нецелесообразно выпускать подробные сводки о вертикальной структуре поля ветра — отсюда использование значимых уровней и довольно приблизительный установленный предел отклонения, не соответствующий качеству наблюдений, проводимых при помощи современных систем радиоветрового зондирования.

13.1.3.3 *Требования к точности*

Требования к точности измерений ветра на высотах представлены применительно к скорости и направлению ветра, а также ортогональным составляющим ветра, в настоящем томе, глава 12, приложение 12.A. Большинство систем измерения ветра на высотах должны позволять проводить измерения ветра в диапазоне от 0 до 100 $м \cdot с^{-1}$. Для систем, предназначенных для измерения ветра на нижних уровнях, такой широкий диапазон необязателен. Систематические ошибки измерения направления ветра должны быть по возможности минимальными — определенно значительно меньшими 5 %, особенно

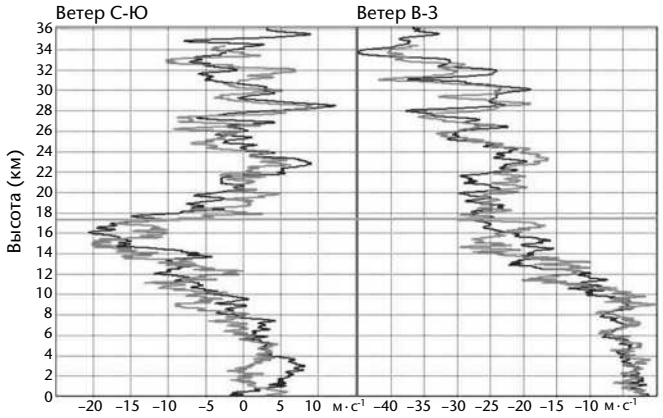
в тех районах, где на высотах, как правило, наблюдаются сильные ветры. В 1990-е годы большинство оперативных систем с хорошими эксплуатационными характеристиками обеспечивали предоставление данных о ветре на высотах со среднеквадратической векторной ошибкой (2σ), равной 3 м·с$^{-1}$ и более в нижней тропосфере, и 5–6 м·с$^{-1}$ в верхней тропосфере и стратосфере (Nash, 1994). Появление очень надежных систем обнаружения ветра ГСОМ означает, что многие современные системы способны обеспечить еще более высокую точность со среднеквадратической векторной ошибкой ($k = 2$) менее 1 м·с$^{-1}$ и незначительным уменьшением точности измерений по вертикали (см. результаты проведенного под эгидой ВМО в Янцзяне, Китай, взаимного сравнения систем высококачественных радиозондов (WMO, 2011*b*)).

Примеры вертикальных профилей горизонтального ветра, полученных в Янцзяне, Китай, и Соединенном Королевстве, показаны на рисунке 13.1. Эти измерения проводились с вертикальным разрешением выше 150 м. На рисунке 13.1(a) показаны результаты двух измерений, проведенных в Янцзяне с интервалом в 6 часов. Тонкая структура по вертикали не является результатом шума, а отражает истинную структуру атмосферы, полученную также при измерении другими системами радиоветрового зондирования во время соответствующих запусков. В ходе этого испытания наблюдались очень сильные восточные ветры в верхних слоях стратосферы (связанные с восточной фазой квазидвухлетнего колебания). Более сильные северные ветры, связанные со струйным течением на высоте около 16 км, наблюдались до высоты примерно 21 км и, соответственно, выше тропопаузы на высоте 17,5 км. Детали структуры поля ветра в стратосфере на высоте между 22 и 34 км в целом сохранялись в течение более 7 часов, указывая на постоянный характер большинства деталей структуры поля ветра и, в силу этого, необходимость их архивирования и передачи сообщений о них.

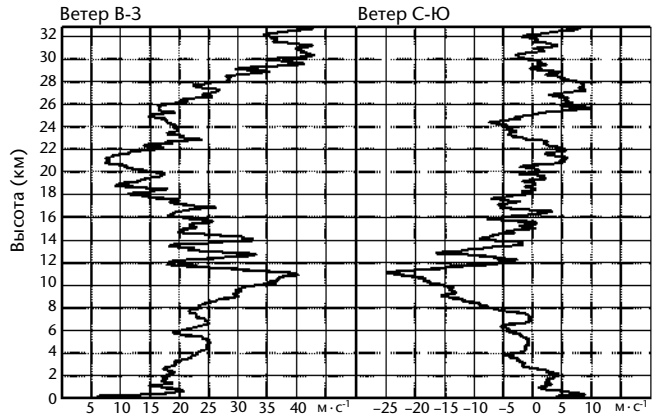
На рисунке 13.1(b) показаны результаты измерений, полученные в начале зимы в Соединенном Королевстве, когда тропопауза находилась намного ниже, на высоте примерно 11 км, однако и здесь сильный ветер, связанный со струйным течением в верхней тропосфере, наблюдается до высоты, как минимум, 16 км. Сильные возмущения в профиле ветра, вызванные гравитационными волнами непосредственно над тропопаузой, не будут представлены при вертикальном разрешении 1 км. В данном случае существует еще одно струйное течение, связанное с циркуляцией вокруг околополярного вихря на высоте примерно 30 км. На рисунке 13.1(c) показаны результаты измерений, полученные в Соединенном Королевстве в летний период. В этом случае наблюдается значительный сдвиг ветра в тропопаузе. Восточные ветры преобладают в стратосфере на высоте больше примерно 16 км, и они не превышают по интенсивности западные ветры в зимний период. Однако между высотами 20 и 32 км вновь наблюдаются значительные возмущения в профиле ветра в летний период.

Таким образом, хотя потребности пользователей в данных о вертикальном разрешении при измерении ветра на высотах, определенные в части I, глава 12, приложение 12.B, таблица 12.B.1, составляют 200–500 м в тропосфере и 1 км в стратосфере, на практике существует информация радиоветрового зондирования, которая должна архивироваться и передаваться для нужд, отличных от анализа ЧПП. Поэтому рекомендуется проводить измерения с максимально возможным в настоящее время разрешением, при этом вертикальное разрешение должно быть выше или равно 200 м в нижней тропосфере и выше 300 м в верхней тропосфере и нижней стратосфере. Как можно видеть, вблизи максимальных значений интенсивности струйного течения существуют сильные сдвиги ветра, для надежного представления которых требуется вертикальное разрешение выше 500 м, как определено в таблице 12.B.1.

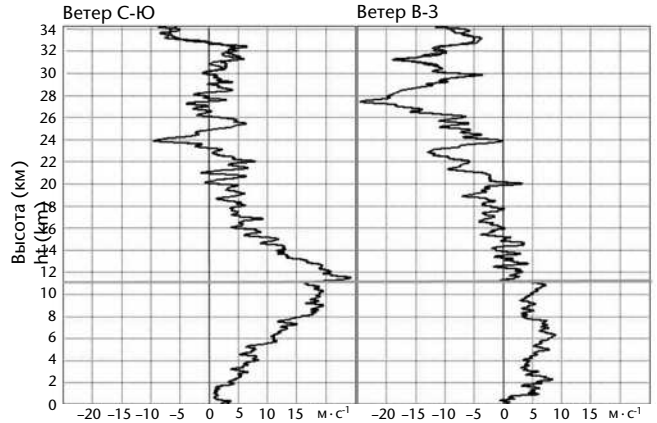
Вертикальное разрешение от 50 до 150 м может оказаться полезным для метеорологических применений общего характера в пограничном слое атмосферы (до высоты 2 км над поверхностью). Однако используемая система слежения должна обеспечивать поддержание приемлемой точности измерения ветра при более высоком вертикальном разрешении, если увеличение разрешения представляется целесообразным.



a) Полет 1 в 08:00 (черный цвет) и полет 3 в 14:48 (серый цвет) 14 июля 2010 г. по данным взаимного сравнения ВМО систем высококачественных радиозондов в Янцзяне, Китай



b) Измерения, сделанные в ноябре в Камборне, Соединенное Королевство; данные двух различных радиозондов наложены друг на друга. (Примечание: на данной вставке изменены местами зональный и меридиональный компоненты ветра, т. е. зональный компонент изображен слева)



c) Измерения, сделанные в июле в Камборне, Соединенное Королевство; данные двух различных радиозондов наложены друг на друга

Рисунок 13.1. Примеры вертикальных профилей горизонтального ветра, полученные с вертикальным разрешением примерно 150 м в Янцзяне, Китай, и в начале зимы и летом в Соединенном Королевстве. Серой горизонтальной линией показана высота тропопаузы.

Очень высокая точность измерения ветра на высотах часто устанавливается при проведении операций на полигонах, таких как запуск ракет. В этом случае должны использоваться специальные шары-зонды с отражающей поверхностью, которые следуют за ветром более точно, чем стандартные метеорологические шары-зонды. Программы наблюдений, которые должны удовлетворять требованиям очень высокой точности, следует тщательно планировать, поскольку наблюдения необходимо проводить близко к требуемому месту и в пределах установленных временных рамок. Можно привести следующие характеристики атмосферной изменчивости. Среднеквадратическая разность векторов между двумя безошибочными наблюдениями ветра на высотах на одной и той же высоте (при вертикальном разрешении, равном 300 м), как правило, составляет менее 1,5 $м \cdot с^{-1}$, если измерения производятся одновременно и на расстоянии менее 5 км по горизонтали. Это верно также в том случае, когда измерения производятся в одном и том же месте, но разделены по времени интервалом менее, чем в десять минут (получено по аналогичным исследованиям, более подробным, чем исследования репрезентативности Китчена (Kitchen,1989)).

13.1.3.4 *Требования к максимальной высоте*

Измерения ветра с помощью аппаратуры, установленной на шаре-зонде, рассматриваемые в данной главе, могут потребоваться на высотах до 35 км и выше в ряде пунктов, особенно в тех, которые входят в ГСНК. Для того чтобы достичь этих высот, могут понадобиться более дорогие шары-зонды, чем более дешевые небольшие шары-зонды, поднимающие системы радиоветрового зондирования на высоты 20–25 км.

Идеальная сеть наблюдения за ветром на высотах должна адекватно отражать движение воздушных масс любого масштаба — от планетарного до мезомасштаба, в тропосфере и нижней стратосфере. На станциях наблюдательной сети также определяются значимые мелкомасштабные ветровые структуры с помощью систем дистанционного зондирования с высоким временным разрешением. Однако в средней и верхней стратосфере для решения метеорологических задач интерес представляют, прежде всего, более крупномасштабные движения воздушных масс, главным образом планетарного масштаба и более крупного синоптического масштаба. Таким образом, на всех пунктах аэрологических наблюдений национальной сети с распределением станций, оптимальным для проведения наблюдений в тропосфере, необязательно проводить измерения на высотах более 25 км. Общие оперативные расходы могут быть ниже, если использовать сочетание наблюдательных систем, описанных в этой главе, с системами зондирования, описанными в томе III настоящего Руководства. В этом случае национальная техническая инфраструктура должна позволять обеспечивать адекватную эксплуатацию различных задействованных систем.

13.1.4 **Методы измерений**

Данные о ветре на высотах, получаемые с помощью систем, установленных на шаре-зонде, собираются, главным образом, посредством использования методов радиоветрового зондирования, хотя в тех случаях, когда требуются дополнительные данные о ветре на высотах без больших затрат на запуск радиозонда, можно использовать наблюдения с помощью шаров-пилотов и радиоветровые наблюдения. Наблюдения, производимые на аэрологических станциях Глобальной системы наблюдений, дополняются над сушей измерениями с самолетов, с помощью измерителей профиля ветра, а также доплеровских метеорологических радиолокаторов. В районах, где совершается большое количество полетов воздушных судов, информация, получаемая с воздушных судов и радаров, преобладает над информацией, получаемой при помощи радиозондов, до высоты 12 км. Над морем данные о ветре на высотах производятся, прежде всего, с гражданских воздушных судов, пролетающих на крейсерской высоте. Они дополняются вертикальными профилями, получаемыми с радиоветровых зондов, запускаемых с судов или удаленных островов, а также в результате слежения за облачностью или структурами полей водяного пара, наблюдаемыми с геостационарных метеорологических спутников. В будущем ожидается, что измерения ветра с помощью установленных на спутниках лидаров и

радиолокаторов улучшат глобальный охват существующих систем наблюдений. При измерении ветра с высоким временным разрешением для конкретных применений используются также содары (радиолокаторы звукового обнаружения и определения дальности), лидары и змейковые анемометры. Для применения в метеорологических целях разрабатывается экономичная технология использования беспилотных воздушных судов.

Выбор метода радиоветрового зондирования для измерения скорости и направления ветра на высотах обычно зависит от наблюдений, получаемых либо в результате перемещения запущенного свободного шара-зонда при более или менее одинаковой скорости подъема, либо при падении под действием силы тяжести объектов, таких как зонды, сбрасываемые с парашютом. В случае если нужно измерить горизонтальное перемещение воздушной массы, отслеживаемая мишень не должна существенно перемещаться по горизонтали относительно наблюдаемой воздушной массы. Основная информация, которая требуется от систем непосредственного слежения, включает высоту мишени и данные о ее планируемой траектории или в качестве альтернативы ее горизонтальной скорости в известные временные интервалы. Требования к точности, изложенные в настоящем томе, глава 12, приложение 12.A, включают влияние ошибок определения высоты или давления при измерении ветра. Маловероятно, чтобы общие оперативные требования к точности могли выполняться для уровней, расположенных выше пограничного слоя атмосферы, при использовании какого-либо метода слежения, который должен скорее предполагать скорость подъема шара-зонда, чем использовать данные о высоте, полученные с помощью системы слежения или с помощью радиозонда, связанного с мишенью.

Системы дистанционного зондирования позволяют измерять перемещение атмосферных масс в результате рассеяния электромагнитного излучения (ЭМИ) или звука с одной или нескольких мишеней: гидрометеоров, пыли, аэрозоля или неоднородностей индекса рефракции, обусловленных мелкомасштабной атмосферной турбулентностью или самими молекулами воздуха.

В методах прямого обнаружения ветра, рассматриваемых в этой главе, используются мишени, положение которых может непрерывно отслеживаться. Хотя существует много методов, с помощью которых может производиться слежение за мишенями, здесь будут рассмотрены только два наиболее широко используемых.

13.1.4.1 *Слежение с использованием радионавигационных сигналов*

Радиозонд, способный получать сигналы от системы навигационных радиопередатчиков, прикрепляется к мишени (либо к поднимающемуся шару-зонду, либо к парашюту сбрасываемого зонда). В наиболее часто применяемых системах используются сигналы с навигационных спутников. На практике это означает, что в настоящее время используются сигналы ГСОМ со спутника НАВСТАР, однако в будущем могут использоваться и другие недавно введенные в действие спутниковые радионавигационные службы. Сигналы со спутников поступают на специальную антенну радиозонда. В систему также должна входить антенна ГСОМ для приема образцовых сигналов, расположенная на земной поверхности. Устройство ГСОМ, расположенное либо на земле, либо на радиозонде, декодирует сигналы или дает возможность рассчитать местоположение радиозонда в трех измерениях как функции времени.

Слежение с использованием радионавигационных сигналов впервые стало широко применяться с введением в действие навигационных цепей наземной системы «Омега», однако после выведения ее из строя большинство этих операторов радиозондов перешли на системы определения параметров ветра ГСОМ. Использовались также наземные сигналы дальней навигации системы «Лоран», описанные в публикации ВМО (WMO, 1985). Покрытие, обеспечиваемое системой «Лоран-С» совместно с российской системой «Чайка», в последние годы сократилось, и в настоящее время эти системы используются в основном только в Восточной Европе, когда функционирует «Чайка».

В повседневной метеорологической практике шире стала использоваться навигационная система слежения ГСОМ, что связано с высокой степенью автоматизации, которая может быть достигнута при выборе этого типа системы измерения ветра. Масштаб работ, связанных с обслуживанием наземного оборудования данной системы, также весьма незначителен. Измерения высоты радиозондами ГСОМ обеспечивает наилучший метод определения высот для точных измерений стратосферных температур при исследованиях климата.

Все первые радиозонды ГСОМ использовали для передачи данных на наземные системы полосу частот Вспомогательной службы метеорологии (ВСМ) с центром на 403 МГц, однако существует несколько стран, для которых широкомасштабное гражданское радиозондирование в этой полосе частот является невозможным, поэтому были также разработаны радиозонды ГСОМ, использующие полосу более высоких частот ВСМ с центром на 1 680 МГц.

13.1.4.2 ***Слежение с использованием направленной антенны***

На многих крупных национальных сетях в связи с более высокой стоимостью расходных материалов радиозондов ГСОМ продолжают использовать радиозонды, не оборудованные системой ГСОМ, с наземной системой, позволяющей следить за мишенью с помощью направленной антенны, определяющей азимут и любые два из следующих параметров: угол места, наклонная дальность и высота. Измерения в основном проводятся с использованием радиотеодолита или вторичного радиолокатора (см. 13.2.3.2) для слежения за радиозондом, прикрепленным к шару-зонду. В некоторых случаях для слежения за шаром-зондом используется оптический теодолит. Первичный радиолокатор (см. 13.2.3.1) также может следить за отражающей мишенью, прикрепленной к шару-зонду, однако, несмотря на довольно широкое применение в прошлом, в настоящее время эта система обычно не применяется. Разница между первичным и вторичным радиолокаторами заключается в том, что первичный радиолокатор улавливает импульсы, отраженные от своей мишени, тогда как вторичный радиолокатор только передает импульсы и не улавливает отраженный сигнал. В случае со вторичным радиолокатором радиозонд/приемоответчик, прикрепленный к шару-зонду, получает импульсы от радиолокатора и затем передает информацию о времени получения на наземную радиолокационную станцию. Точность слежения за углом места и азимутом при использовании радиолокационных и радиотеодолитных систем обычно имеет порядок 0,1°, в то время как для радиолокационных систем ошибка по дальности обычно должна составлять менее 30 м.

Современные радиотеодолитные системы с антенной, размером менее 2 м, наиболее подходят для измерений ветра на высотах, когда угол места шара-зонда превышает 10–15°. Системы вторичных радиолокаторов продолжают использовать на национальных сетях, где имеется достаточно широкий спектр радиочастот в полосах частот, выделенных для метеорологических целей. Эффективные направленные антенны используются в основном в полосе частот 1 680 МГц, поскольку размер антенны, необходимой для непосредственного слежения на частоте 403 МГц, слишком велик для большинства видов оперативных применений.

Выбор между использованием радиотеодолита или радиозонда ГСОМ для измерения ветра на высотах будет частично зависеть от максимальной наклонной дальности, ожидаемой в месте наблюдения. Система измерения ветра ГСОМ обеспечит хорошую точность измерений при очень большой дальности. Максимальная дальность существенно изменяется в зависимости от широты, при этом дальность 70 км достаточна в экваториальных и полярных районах, но она может достигать по меньшей мере 200 км в некоторых среднеширотных зонах. В таблице 13.1 представлена повторяемость зондирований с превышением определенной наклонной дальности для шара-зонда на высоте 30 км. Данные приводятся по станциям, расположенным в Европе в зоне 50–60° с. ш. Число зондирований дается за целый год, но следует отметить, что зондирования с превышением пределов наклонной дальности в основном приходятся на зимний период.

Таблица 13.1. Повторяемость зондирований с превышением наклонной дальности (для шара-зонда на высоте 30 км)

Превышенная наклонная дальность (км)	140	160	175	190
Повторяемость (%)	5	2	1	0,5

13.2 ДАТЧИКИ И ПРИБОРЫ ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ВЕТРА НА ВЫСОТАХ

Системы радиоветрового зондирования первоначально стали применяться для проведения измерений ветра на высотах при наличии облачности. Они также позволяют достичь высокой точности измерений при большой дальности для слежения за шарами-зондами на высотах до 30 км. Использование этих систем в настоящее время позволяет удовлетворять большую часть современных требований к точности измерения ветра на высотах. Высокая степень автоматизации, возможная в случае применения наиболее современных систем радиоветрового зондирования, исключила необходимость вмешательства оператора в большую часть цикла измерений. Преимущество этих систем заключается также в том, что их использование позволяет сократить расходы при метеорологических работах.

13.2.1 Оптический теодолит

Оптические теодолиты могут использоваться для слежения за шарами-зондами, когда расходы на проведение радиоветровых измерений не могут быть оплачены, например, в промежутках между основными подъемами или в других местах страны для заполнения пробелов в данных на сети на нижних уровнях (см. WMO, 2008). Операторам требуется значительная подготовка и профессионализм, чтобы не происходило быстрого увеличения ошибок измерений ветра на высотах при подъеме шара-зонда выше пограничного слоя, однако в некоторых частях Южной Америки и Африки достигнута приемлемая длительность периодов наблюдений.

Оптическая система шаропилотного теодолита должна быть такой, чтобы ось окуляра оставалась горизонтальной независимо от направления оптической трубы. Предпочтительно использовать пятиугольную, а не прямоугольную призму, так как незначительное смещение первой не влияет на перпендикулярность обеих частей оптической оси.

Труба, фокусирующая окуляр, который должен быть снабжен пересекающимися линиями или сеткой нитей, должна иметь увеличение в 20–25 раз по диаметру и угол зрения не менее 2°. Конструкция основания теодолита должна быть прочной. Следует обеспечить возможность быстрого вращения теодолита вручную или медленного, с помощью фрикционной и червячной передач на азимутальных и вертикальных кругах. Эти круги должны быть подразделены на сектора с ценой деления не более 1° и снабжены верньерами или ручными колесиками микрометра, позволяющими определять углы с точностью до 0,05° и возможной погрешностью до 0,01°. Расположение шкал и их освещение должны обеспечивать возможность для считывания показаний днем и ночью. Люфт приводного механизма кругов не должен превышать 0,025°. Ошибки горизонтальной и вертикальной юстировки не должны превышать 0,1°.

Для облегчения слежения за быстро перемещающимся шаром-зондом теодолит должен быть оснащен визир-искателями. Также полезно для этой цели использовать вторую трубу с широким углом зрения — не менее 8°.

Основание теодолита должно быть смонтировано так, чтобы его можно было крепить к стандартной треноге или на другую опору. Он должен быть снабжен устройством для точной установки горизонтального положения. Штатив должен регулироваться по росту наблюдателя. Теодолит должен иметь прочную конструкцию и защиту от коррозии.

Система должна использоваться вместе с соответствующей компьютерной программой для ввода и проверки данных наблюдений на наличие ошибок.

13.2.2 **Радиотеодолит**

Определение ветра с помощью радиотеодолита наиболее подходит для ситуации, когда угол места шара-зонда по отношению к наземной станции достаточно велик на протяжении всего полета. Если угол места шара-зонда превышает приблизительно 16°, большая часть требований к точности измерений ветра на высотах, изложенных в настоящем томе, глава 12, может быть удовлетворена с помощью относительно небольших антенн слежения. При малых углах места шара-зонда ошибки измерений с использованием радиотеодолитов быстро возрастают с уменьшением угла места даже при больших антеннах слежения (см. 13.5.3). При постоянно сильном ветре на высотах крайне трудно удовлетворять требованиям к точности, изложенным в настоящем томе, глава 12, используя радиотеодолит, если не применять приемоответчик для обеспечения измерения наклонной дальности (см. 13.2.3.2).

Радиотеодолит обычно используется для отслеживания излучения радиозонда, подвешенного к метеорологическому шару-зонду. Направленная антенна, соединенная с радиопередатчиком, вращается вокруг вертикальной и горизонтальной осей для определения силы максимального сигнала с помощью соответствующих сервомеханизмов. Обычно используется радиочастота 1 680 МГц. Хорошо сконструированная антенна диаметром около 2 м должна иметь низкую чувствительность в области боковых лепестков относительно основного луча; при таком размере может быть достигнута точность углового слежения, равная 0,1°. В этом случае радиотеодолит должен иметь возможность обеспечивать слежение при малых углах места (6°–10°) без интерференции сигналов, получаемых непосредственно от радиозондов и отраженных от примыкающих поверхностей. Интерференция между прямыми и отраженными сигналами называется многолучевой интерференцией и обычно ограничивает возможности слежения с помощью радиотеодолита при малом угле места шара-зонда. Величина многолучевой интерференции в значительной степени зависит от позиционирования антенны в зависимости от соответствующих отражающих поверхностей вне зависимости от того, располагается радиотеодолит на крыше или на поверхности земли.

Подробное описание характеристик радиотеодолитной антенны, системы обнаружения, серво-контроля, а также алгоритмов обработки данных следует получить от производителя до покупки. При использовании современных переносных радиотеодолитов с антенной размером менее 2 м можно столкнуться с проблемами многолучевой интерференции при угле места порядка 16°. Когда происходит многолучевая интерференция, как правило, невозможно поймать максимальный сигнал в направлении шара-зонда. Ошибка по высоте изменяется с течением времени, поскольку изменяются условия многолучевой интерференции по мере перемещения радиозонда; это может привести к большим систематическим ошибкам при измерении ветра (более 10 $м \cdot с^{-1}$).

Во время слежения за радиозондом с помощью радиотеодолита наблюдаемые азимут и угол места передаются с радиотеодолита на наземную компьютерную систему. По результатам измерений, поступающих с радиозонда, со временем можно получить данные об изменении геопотенциальной высоты, соответствующей наблюдаемым направлениям. Затем может быть рассчитана скорость изменения положения шара-зонда. Компьютер должен представлять результаты измерений ветра на высотах в табличной или графической форме. Непрерывность данных о ветре по вертикали позволит оператору проверить ошибки в слежении. Если оператор удовлетворен качеством слежения, может выпускаться соответствующая сводка о ветре на высотах для потребителей.

Иногда вскоре после запуска направление перемещения шара-зонда меняется на противоположное из-за значительного сдвига ветра, наблюдаемого непосредственно над поверхностью земли. Если при этом радиотеодолит должен обеспечивать автоматизированное слежение с хорошей точностью, он должен обладать очень высокой скоростью сканирования при определении азимута и угла места. Это ведет к повышению требований к техническим характеристикам по сравнению с теми, которые необходимы для большинства полетов, когда шар-зонд находится на большем удалении. Для того чтобы снизить требования к механическим характеристикам, необходимым для точного слежения, несколько современных конструкций радиотеодолитов включают интерферометрическое слежение. В этих системах интерферометр сравнивает фазы сигналов, поступающих на различные участки антенны слежения для того, чтобы определить положение передающего источника по отношению к ориентации антенны. На практике фазовые данные измеряются с высокой скоростью с использованием микропроцессоров, в то время как простой сервомеханизм ориентирует антенну приблизительно в направлении радиозонда. Приближенная ориентация антенны необходима для обеспечения хорошего соотношения сигнала и шума для интерферометра и для минимизации отражений, получаемых от земли. Угол места и азимут затем рассчитываются на основе сочетания положений антенны, в то время как направление на источник выводится интерферометром на основе фазовых измерений. Достигаемая точность измерений аналогична точности лучших стандартных радиотеодолитов. Системы интерферометрических радиотеодолитов часто являются более надежными и, таким образом, более дешевыми в эксплуатации.

13.2.3 Радиолокатор

13.2.3.1 *Первичные радиолокаторы*

Отличительной особенностью метода слежения с помощью радиолокатора по сравнению с методом, предполагающим использование радиотеодолита, является возможность измерения наклонной дальности непосредственно вместе с азимутом и углом места. Первичный радиолокатор основан на эффекте обнаружения импульсов ультракоротких радиоволн, отраженных от соответствующей мишени, поднимаемой шаром-зондом. При наличии надежного первичного радиолокатора требования к точности для измерения ветра на высотах, изложенные в настоящем томе, глава 12, могут быть удовлетворены почти при всех обстоятельствах. Очень высокие точностные характеристики при измерении ветра на высотах могут достигаться путем прослеживания с помощью прецизионных радиолокаторов, однако на практике они очень дороги в использовании. Для обеспечения точности измерений выше приблизительно 1 $м \cdot с^{-1}$ важно использовать шары-зонды с отражающей поверхностью (которые являются очень дорогими), а не стандартные метеорологические шары-зонды.

При измерении ветра с помощью первичного радиолокатора не требуется использование радиозонда — достаточно соответствующего отражателя. Существенная экономия от минимизации расходов на радиозонды возможна в тех случаях, когда существуют структуры технической поддержки по эксплуатации радиолокатора и расходы на персонал невысоки. Однако в развивающихся странах использование первичного радиолокатора в качестве устройства для измерения параметров ветра в обеспечение низкой стоимости оперативных измерений не имело успеха из-за недостаточного уровня технической поддержки. В большинстве стран в настоящее время используют радиозонды ГСОМ или радиотеодолиты.

13.2.3.2 *Вторичные радиолокаторы*

В системах вторичной радиолокации импульсы энергии, передаваемые с наземной станции, принимаются системой ответчика, подвешенной к шару-зонду. Ответчик может представлять собой отдельный блок или включаться в основную конструкцию радиозонда. Частота обратного сигнала может отличаться от частоты излучаемого сигнала. Время

между передачей импульса и реакцией ответчика позволяет измерять непосредственно наклонную дальность. Система такого типа до сих пор широко используется на крупных национальных сетях.

Преимущество этого метода над методом первичной радиолокации состоит в возможности обеспечения большей дальности слежения для заданной выходной мощности наземного передатчика. Это происходит потому, что энергия, передаваемая ответчиком, не зависит от энергии, которую он получает от наземного передатчика, а обычно и превышает ее. Таким образом, энергия, получаемая наземным приемником, обратно пропорциональна квадрату наклонной дальности цели. В случае первичной радиолокации получаемая энергия обратно пропорциональна четвертой степени наклонной дальности.

По сложности конструкции и эксплуатационным требованиям система вторичной радиолокации, как правило, находится между радиотеодолитами и системами первичной радиолокации. Операторы сети должны иметь возможность обеспечить хорошее обслуживание этих систем. Например, в Российской Федерации некоторые более старые системы (см. таблицу 13.4), которые обладают хорошими характеристиками слежения и широко используются, но трудны в обслуживании, заменяют на относительно более легкие в обслуживании усовершенствованные системы наземного слежения (см. WMO, 2005).

13.2.4 **Навигационные системы слежения**

В навигационных системах слежения в радиозонд встроена антенная система, которая принимает сигналы с радионавигационной системы. Эта радионавигационная система предназначена для использования агентствами, не зависящими от национальных метеорологических служб. В настоящее время в качестве навигационных систем, применяемых для оперативного измерения параметров ветра, применяются спутниковые ГСОМ с глобальным охватом и системы «Лоран», в которых используются наземные передатчики с очень ограниченным районом охвата.

Одним из основных преимуществ навигационных систем является простота наземной системы, в которой отсутствуют передвижные части и не требуется очень точная настройка антенн слежения. В связи с этим такие системы пригодны для установки на воздушных и морских судах, а также на наземных системах определения ветра.

Для минимизации расходов на обработку сигналов большая часть обработки с целью получения данных о ветре с помощью сигналов системы «Лоран» осуществляется после ретрансляции радиозондом навигационных сигналов обратно на наземную систему. Таким образом, для этой системы обнаружения ветра является существенным хороший прием сигналов, поступающих с радиозонда; выбор местоположения антенн наземной системы должен обеспечивать прямую видимость радиозонда во всех направлениях. Поскольку стоимость устройств ГСОМ, обрабатывающих сигналы ГСОМ, снижается, появилась возможность осуществлять основную обработку сигналов ГСОМ на радиозонде, хотя обработка на земле также необходима для учета информации об образцовых сигналах ГСОМ, получаемых локальной антенной на земной поверхности. При нормальном функционировании точность определения положения радиозонда при помощи систем ГСОМ не уменьшается существенным образом в зависимости от дальности (см. WMO, 2011*b*).

Основные проблемы оперативного использования современных радиозондов ГСОМ возникают, когда в непосредственной близости расположен радиопередатчик, работающий на частоте, создающей помехи для получения радиозондом сигналов ГСОМ.

Высота определяется на основе радиозондовых измерений геопотенциала. Крайне важно, чтобы время определения обработанных ветровых данных, полученных с помощью навигационной системы наземной системой, точно соответствовало времени определения данных измерений высоты радиозонда.

13.2.4.1 *Использование навигационных сигналов в будущем*

Международные навигационные системы перешли, главным образом, на навигацию с использованием сигналов, поступающих от группировки навигационных спутников ГСОМ, вращающихся вокруг Земли. Использование спутниковых сигналов в значительной мере заменило практику использования сигналов, поступающих от фиксированных наземных передатчиков. Еще одной системой спутниковой навигации является система ГЛОНАСС в Российской Федерации. Также недавно введены в действие системы «Бэйдоу» (КОМПАСС) в Китае и «Галилео» в Европе, и ведется подготовка к началу их использования в качестве глобальных служб до 2020 г. Ограниченное число стран предпочли сохранить наземные навигационные системы «Лоран» для региональных и национальных навигационных сетей. Следует проконсультироваться с руководящими органами в области навигации в отношении использования этих сигналов в будущем до того, как будет рассмотрен вопрос о долгосрочных вложениях в данную систему.

Несмотря на то, что расчет данных о ветре в случае использования навигационной системы ГСОМ является более сложным, чем в случае получения сигналов навигационных систем с наземных передатчиков, поскольку спутники постоянно перемещаются относительно радиозондов, темпы разработки систем радиозондов ГСОМ возрастают, так что 11 систем разных производителей прошли тестирование при проведении взаимных сравнений систем радиозондирования в Янцзяне, Китай (см. WMO, 2011*b*). Лишь у немногих конструкций были выявлены какие-либо значительные проблемы; большинство же достаточно адекватно принимают сигнал (с пяти до восьми спутников одновременно в конкретный момент времени) и имеют соответствующие алгоритмы обработки данных, связывающие сигналы ГСОМ, принимаемые радиозондом, с сигналами, получаемыми опорной антенной на поверхности земли.

13.2.4.2 *Глобальная система определения местоположения*

Радиозонды ГСОМ в настоящее время применяются примерно на половине активных станций глобальных сетей радиозондирования.

НАВСТАР ГСОМ является очень точной радионавигационной системой, основанной на использовании радиосигналов, передаваемых группировкой из 25 спутников, находящихся на околоземной орбите в шести плоскостях. Плоскость каждой орбиты пересекает экватор на расстоянии 60° друг от друга, при этом плоскости наклонены под углом в 55° к полярной оси. Период обращения спутника составляет около 11 ч 58 мин. Конфигурация этой системы спутников такова, что в любом месте на земном шаре как минимум четыре спутника находятся над горизонтом круглосуточно, однако в некоторых ситуациях в пределах радиовидимости с поверхности Земли может находиться до восьми спутников.

Сигналы, передаваемые с этих спутников, контролируются атомными эталонами частоты, предназначенными для обеспечения стабильности по частоте с точностью, превышающей $1 \cdot 10^{-13}$. Каждый спутник передает два уникальных псевдослучайных цифровых дальнометрических кода, наряду с информацией, включающей данные о прохождении спутников системы, эфемериды, ВСВ и рабочие параметры спутников. Дальнометрические коды и данные о системе передаются с использованием двухфазной цифровой технологии расширения спектра. Уровень мощности сигналов дальнометрических кодов составляет –130 дБм, т. е. значительно ниже теплового фонового шума.

Принимаются во внимание следующие коды:

a) Код грубого разрешения передается на несущей частоте 1 575,42 МГц. Эта частота модулируется специальным спутниковым кодом псевдослучайного шума с частотой модулирующего сигнала в 1,023 МГц. Такая модуляция эффективно расширяет спектр полосы кода грубого разрешения до 2 МГц;

b) Код высокого разрешения может заменяться контролируемым военным кодом Y в те периоды, когда задействовано устройство для защиты от помех. Код высокого разрешения и данные о системе передаются когерентно на несущих частотах L1 (1 575 МГц) и L2 (1 228 МГц).

Длины волн для сигналов ГСОМ значительно меньше, чем для системы «Лоран». Для приема сигналов ГСОМ используются гораздо меньшие антенны, устанавливаемые на верхней части корпуса радиозонда таким образом, чтобы во все стороны по направлению к горизонту отсутствовали какие-либо экранирующие элементы. Небольшая антенна лучше защищена от помех, возникающих за счет атмосферного электричества, чем антенны систем «Лоран». Хотя монтаж антенны ГСОМ может вызвать сложности с размещением на радиозонде датчика температуры, в существующих сейчас конструкциях эта проблема устранена.

Сигналы ГСОМ нуждаются в предварительной обработке на радиозонде, для того чтобы сократить информацию ГСОМ до таких сигналов, которые могут передаваться на наземную станцию на несущей частоте радиозонда (либо в виде аналоговой информации, как это делалось в случае применения систем «Лоран», либо в виде потока цифровых данных). Предварительная обработка может обеспечиваться различными методами. Современные радиозонды ГСОМ используют код высокого разрешения в дифференциальном режиме. Это требует одновременного приема сигналов ГСОМ приемником наземной станции и приемником на радиозонде. Точные расчеты ветра требуют получения сигналов как минимум с четырех спутников. В дифференциальном режиме фазовое смещение сигналов, принимаемых радиозондом, соотносится с принимаемыми на наземной станции. Это особенно удобно, когда радиозонд находится около наземной станции, поскольку ошибки по определению местоположения, возникающие за счет задержки при распространении радиоволн со спутника до приемников или из-за устройства для защиты от помех, аналогичны для обоих приемников и могут быть в значительной степени устранены.

Системы слежения, использующие ГСОМ, могут обеспечивать точное слежение при очень большом числе измерений (каждые несколько секунд). Поэтому можно измерять изменение истинной горизонтальной скорости, так как радиозонд раскачивается как маятник под шаром-зондом с периодом колебаний примерно 10–15 с. В основном небольшие различия в измерениях ветра радиозондами ГСОМ, проводимых в Янцзяне, Китай, явились результатом использования алгоритмов отфильтровывания движений шара-зонда, отличных от алгоритма, часто специально подгоняемого к конкретной конфигурации подвески радиозонда, и не применявшегося при сравнении радиозондов (WMO, 2011*b*).

Одной из практических проблем в отношении радиозондов ГСОМ является время, которое требуется для того, чтобы устройство слежения ГСОМ, установленное на радиозонде, синхронизировалось с сигналами, получаемыми со спутников. Не рационально запускать радиозонд до завершения синхронизации. Данный процесс может потребовать размещения радиозонда снаружи на несколько минут перед запуском или, в качестве альтернативы, использования метода для передачи сигналов ГСОМ на радиозонд в место осуществления предварительной подготовки.

13.2.4.3 ***Цепи передатчиков «Лоран-С»***

Система «Лоран-С» представляет собой средство, функционирующее с помощью навигационных систем, которое имеет относительно большой радиус действия и действует в полосе низких частот с центром на 100 кГц (длина волны 3 км). Поскольку в основном эта система используется для морской навигации, в частности, в прибрежных и континентальных шельфовых районах, она применяется только в определенных частях земного шара. Это, в основном, морские районы северного полушария. Некоторые передатчики цепи «Лоран» были модернизированы новыми собственниками для обеспечения региональной и национальной морской навигационной сети.

Передача «Лоран-С» состоит из групп восьми или девяти импульсов несущей частоты 100 кГц, длительность каждого из которых составляет 150 мкс. Каждая цепь передатчиков состоит из одной ведущей станции и двух или более смежных. По существу, последовательность цепи устанавливается относительно передачи ведущей станции. Каждая смежная станция передает свои группы импульсов в строго фиксированные интервалы времени после ведущей со скоростью, которая определена для данной цепи, — обычно один раз в каждые 100 мкс.

Сигналы «Лоран-С» распространяют как приземные, так и пространственные волны, отраженные от ионосферы. Распространение приземных волн относительно стабильно. Имеются только очень небольшие фазовые коррекции, которые зависят от того, распространяются сигналы вдоль суши или моря. Скорость изменения фазовой коррекции по мере изменения положения радиозонда обычно не настолько велика, чтобы влиять на точность измерения ветра. Распространение пространственных волн является более изменчивым, поскольку оно зависит от состояния ионосферы и времени суток. Сигналы приземных волн, поступающие от передатчика, существенно сильнее, чем сигналы пространственных волн, но пространственные волны затухают значительно медленнее, чем приземные волны. Таким образом, для системы измерения ветра «Лоран-С» ситуация является наилучшей, когда в сигналах, получаемых радиозондом со всех передатчиков, преобладают приземные волны. Это может быть достигнуто в части районов, охватываемых системой «Лоран-С», но не везде в пределах теоретического охвата системы.

Радиозонд системы «Лоран-С» получает сигналы через свою собственную антенну и затем модулирует несущую частоту радиозонда, с тем чтобы передать сигналы приемнику радиозонда. Устройство слежения «Лоран», используемое для определения времени поступления импульсов системы «Лоран», должно позволять в определенной степени дифференцировать сигналы приземных и пространственных волн. Это достигается посредством определения времени поступления ведущих частей импульсов. Современные устройства слежения «Лоран» могут работать в режиме пересечения цепей, когда сигналы от более чем одной цепи «Лоран» могут использоваться вместе. Эта аппаратура важна для качественных измерений ветра во многих частях районов, обслуживаемых системой «Лоран-С». Данные о ветре рассчитываются на основании скорости изменения во времени разностей поступления сигнала между парами передатчиков «Лоран-С». В расчетах используются все имеющиеся надежные сигналы «Лоран-С», а не минимальный набор из трех сигналов.

Определение местоположения с использованием системы «Лоран» для работающих радиозондов в настоящее время очень ограничено.

13.3 МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЙ

13.3.1 Общие сведения, касающиеся обработки данных

Современные датчики слежения могут производить отсчеты не за интервалы в 1 мин, как это обычно делалось на использовавшихся ранее неавтоматических системах, а намного чаще. Обработка данных о ветре, как правило, будет полностью автоматизирована при использовании включенного в систему наземного компьютера. Данные о ветре на высотах будут накапливаться и демонстрироваться оператором на экране в целях проверки до того, как информация будет выпускаться для пользователей.

Таким образом, отбор данных по слежению оптимально производится с интервалами в 10 с и менее. Отбор данных должен производиться с наиболее высокой частотой, которая считается полезной для получения информации по системе слежения. Высокая интенсивность производства наблюдений облегчает контроль за качеством данных с помощью автоматизированных систем обработки. После редактирования данные слежения могут быть сглажены с использованием методов математической статистики и использованы для определения изменения местоположения со временем, если это

требуется. Применяемое сглаживание позволит определить толщину атмосферного слоя, к которому относится измерение ветра на высотах. Сглаживание часто необходимо будет изменять для отдельных участков полета с учетом различных потребностей пользователей в отношении данных для различных высот и ограничений используемой системы измерения ветра на высотах. Если точность измерения на верхних уровнях становится слишком низкой, то вертикальное разрешение производимых измерений может быть установлено ниже оптимальных требований, для того чтобы ошибка измерений ветра находилась в приемлемых пределах.

В эффективных алгоритмах для редактирования и сглаживания можно использовать многочлены низшего порядка (Acheson, 1970) или кубические сплайны (de Boor, 1978). Алгоритмы для расчета ветра по данным радиолокационных и радиотеодолитных наблюдений могут быть найдены в публикации ВМО (WMO, 1986). В целом ветер может определяться или по изменению местоположения, рассчитанному с помощью данных слежения, или по степени изменения сглаженных измеряемых переменных системы слежения (см. Passi, 1978). Многие современные системы используют последнюю методику, однако при этом необходимы такие алгоритмы, которые позволяют решить проблемы, связанные с некоторыми особенностями измеряемых переменных, например, в тех случаях, когда шар перемещается с большим углом места в обратном направлении над площадкой, с которой проводится слежение.

Когда ветер рассчитывается по данным слежения и демонстрируется для проверки, то важно при этом указать те районы полета, для которых данные слежения отсутствуют или считается, что шум слишком велик, чтобы эти данные можно было использовать. Некоторые из алгоритмов, применяемых для интерполяции, могут быть недостаточно стабильными в тех случаях, когда имеются пробелы в данных слежения. Важно проводить различие между надежными измерениями вертикального сдвига ветра и ложными сдвигами, которые являются результатом автоматической обработки данных, когда данные слежения отсутствуют. Часто в начале подъема шара качество данных слежения достаточно низкое. В случае если система измерения ветра на высотах не позволяет произвести корректного измерения ветра вскоре после запуска, предпочтительно оставить пробел в сообщаемых данных по ветру до того момента, к которому будут получены корректные данные слежения. Это обусловлено тем, что интерполяция между поверхностью и первыми уровнями достоверных данных часто требует интерполяции по слоям, в которых отмечается вертикальный сдвиг ветра. При таких условиях автоматизированная система обработки редко функционирует удовлетворительно.

13.3.2 **Шаропилотные наблюдения**

Точная установка по уровню и ориентирование оптического теодолита относительно истинного севера выполняется заведомо до наблюдений за азимутом и углами места движущегося шара. Отсчеты азимута и угла места должны производиться с интервалами не менее 1 мин. Азимут должен отсчитываться с точностью до десятой доли градуса. При подъеме шара-пилота угол места отсчитывается с точностью до десятой доли градуса при значениях 15° или больше. Если угол места составляет менее 15°, необходимо измерять его с точностью до 0,05°.

Если при подъеме радиозонда дополнительно используется оптический теодолит, можно получить большую точность измерений ветра на меньших высотах. Таким образом, углы места должны отсчитываться до десятой доли градуса, когда их значения превышают 20°, с точностью до 0,05° при их значениях 20° или менее, но более 15° и с точностью до 0,01°, когда углы места составляют 15° или менее. Отсчет времени может осуществляться либо с помощью секундомера, либо с помощью специального таймера, который подает звуковые сигналы через заданные промежутки времени.

Определение скорости и направления ветра при наблюдениях с использованием одного теодолита основано на тригонометрических вычислениях ежеминутных изменений положения шара-пилота в горизонтальной плоскости. Для этого лучше всего использовать соответствующее компьютерное программное обеспечение.

Если необходима более высокая точность, то следует использовать метод двух теодолитов. Длина базисной линии между приборами должна составлять, по крайней мере, 2 км и располагаться по возможности под прямым углом к направлению преобладающего в данный момент ветра. Расчеты упрощаются, если обе площадки для слежения находятся на одном уровне. Связь между двумя площадками с помощью радио или наземной линии помогает синхронизировать наблюдения с обоих мест. Синхронизация необходима в том случае, если нужно произвести измерения с высокой точностью. Регистрирующие теодолиты, в которых отсчеты записываются с помощью электроники, будут также полезны для достижения большей точности измерений.

Для слежения с помощью нескольких теодолитов могут использоваться альтернативные процедуры оценки. Избыточность, которая обеспечивается всеми данными слежения, позволяет повысить точность измерений, однако дополнительная проблема при этом заключается в том, что вычисления должны выполняться с помощью персонального компьютера (см. Lange, 1988; Passi, 1978).

13.3.3 Наблюдения с использованием направленной антенны

Системы измерения ветра, которые обеспечивают слежение посредством использования направленных антенн, требуют очень тщательного соблюдения процедур установки и технического обслуживания. Необходимо приложить все усилия для обеспечения точного измерения угла места и азимута, что требует точного соблюдения горизонтальности установки и тщательного технического обслуживания, для того чтобы обеспечить такое положение, при котором электрическая ось антенны находится в положении, близком к положению механической оси. Это можно проверить различными методами, включая наведение на местные передатчики или цели, местоположение которых известно. В последние годы плохая ориентация по азимуту вызывала дополнительные ошибки при измерениях ветра на многих аэрологических станциях.

Калибровка наклонной дальности первичного радиолокатора может быть проверена посредством использования соответствующих стационарных мишеней, если таковые имеются. Проверка слежения радиолокатора в целом может быть осуществлена посредством сравнения геопотенциальных высот, полученных с помощью радиолокатора, с данными одновременных радиозондовых измерений. Вопрос о поправках к данным измерений высот радиолокатором за счет ошибок слежения, обусловленных атмосферной рефракцией, излагается в 13.7.

Сравнение значений высоты, полученных с помощью радиолокатора, со значениями высоты геопотенциала, полученными с помощью радиозондов ГСОМ, может быть использовано для выявления случаев, когда слежение с помощью радиолокатора не удовлетворяет стандартным требованиям. Более того, если известно, что измерения радиолокатором наклонной дальности надежны, то можно определить небольшие систематические ошибки по углу места посредством сравнения высот, измеренных с помощью радиолокатора, с высотами, полученными с помощью радиозонда, как функцию котангенса угла места. Типичные ошибки при определении радиозондом ГСОМ высоты геопотенциала были определены ВМО для большинства используемых радиозондов (WMO, 2011*b*).

При использовании как радиолокационных, так и радиотеодолитных систем, встречаются трудности при попытке слежения за мишенью на малом расстоянии. Это обусловлено тем, что сила сигнала, принимаемого боковым лепестком антенны, может быть достаточно большой для поддержания автоматического слежения на малом расстоянии, однако при слежении на боковом лепестке сила принимаемого сигнала затем быстро уменьшается, и через несколько минут мишень, очевидно, будет потеряна. После потери мишени, возможно, будет сложно восстановить слежение с помощью некоторых систем при наличии на пусковой площадке низкой облачности, дождя или тумана. Поэтому необходимо иметь метод проверки того, что мишень находится в центре главного лепестка в начале полета. Такая проверка может проводиться оператором с использованием визира, телескопа или видеокамеры, ориентированных по оси антенны. Смещение

слежения труднее проверить с помощью интерферометрического радиотеодолита, когда механическое слежение радиотеодолита необязательно совпадает точно с наблюденным направлением перемещения шара.

13.3.4 Наблюдения с использованием радионавигационных систем

О развитии наблюдений с определением параметров ветра по ГСОМ впервые упоминают Call (WMO, 1994) и Kaisti (1995). Эти системы не декодировали поступающие сигналы ГСОМ, однако в настоящее время вместо них все шире используются радиозонды ГСОМ, которые эти сигналы декодируют.

Геометрия использования сигналов спутниковой навигации такова, что алгоритмы обнаружения ветра с использованием ГСОМ представляются наиболее надежными в том случае, если сигналы поступают, по меньшей мере, с пяти спутников в процессе подъема. Для определения периодов, в которые геометрия расположения спутников не обеспечивает возможности обнаружения ветра, следует использовать данные о прохождении спутников ГСОМ. На практике, при существующих конфигурациях спутников такие ситуации происходят достаточно редко, а с современными радиозондами используется хорошая антенна для приема спутниковых сигналов.

При проведении измерения ветра на высотах с использованием систем слежения с помощью навигационных средств наземная аппаратура навигационного слежения должна быть точно синхронизирована с передачами сигналов навигационных средств еще до запуска. Синхронизация обычно достигается путем использования сигналов, принимаемых местной антенной, связанной с приемником наземной системы. Эта антенна должна обеспечивать прием адекватных сигналов для синхронизации при любых погодных условиях, которые, возможны в данном пункте. Наземная система должна также обеспечивать оператору четкую индикацию поступающих сигналов навигационных систем для определения ветра как до запуска, так и в ходе полета радиозонда. Когда радиозонд ГСОМ используется для проведения измерений высоты в ходе оперативного подъема, важно точно определить и внести в программное обеспечение обработки данных наземной станции высоту локальной антенны ГСОМ относительно поверхности земли.

После запуска системы определения ветра с помощью навигационных средств работают в значительной степени в автоматизированном режиме. Однако оценки ожидаемых ошибок при измерениях, основанные на конфигурации и качестве принимаемых сигналов навигационных средств, будут полезны для операторов. В ходе полета оператор должен выявлять радиозонды, имеющие отказы, с плохими характеристиками приема или передачи, данные наблюдений которых явно не удовлетворяют стандартным требованиям. Эти данные наблюдений необходимо исключать и по мере необходимости пытаться произвести повторный запуск.

Для того, чтобы удовлетворительным образом произвести аэрологические измерения при помощи наземных радионавигационных систем «Лоран», необходимо, чтобы радиозонд принимал сигналы, по крайней мере, с трех станций «Лоран». Разность во времени поступления навигационных сигналов, принимаемых радиозондом после когерентной передачи из двух мест, определяет местоположение или линию положения (см. WMO, 1985). Линия положения представляет собой гиперболу на плоскости (хотя становится эллипсом на поверхности сферы). Поэтому навигационные системы, использующие данный метод, называют гиперболическими. Двух пересекающихся линий положения достаточно для определения положения на плоскости. Однако при этом может возникнуть большая ошибка в определении положения, связанная с небольшой ошибкой во времени поступления сигналов, если линии местоположения близки к параллельным, когда они пересекаются. В отношении навигационных систем измерения ветра на высотах «Лоран» было четко продемонстрировано, что все имеющиеся навигационные сигналы данного типа (обычно, по крайней мере, четыре или пять) должны использоваться для улучшения надежности слежения. Один тип алгоритма, использовавшийся для всех имеющихся навигационных сигналов, был описан в работе Karhunen (1983).

13.4 РАЗМЕЩЕНИЕ НАЗЕМНОГО ОБОРУДОВАНИЯ

Соответствующая площадка для радиотеодолита или радиолокатора располагается на высоком, по возможности открытом месте. Не должно быть обширных препятствий, закрывающих угол более 6° в точке наблюдения. Идеальным местом может быть симметричный холм с пологими (около 6°) склонами протяженностью 400 м в лощине, окруженной холмами, склоны которых поднимаются под углом 1°–2°.

Для установки системы слежения необходим надежный фундамент, на котором можно монтировать оборудование. Проведение измерений с помощью навигационных средств будет успешным в случае хорошего приема сигналов местной антенной навигационных средств и антенной наземной системы для радиозонда. Эти антенны должны монтироваться на площадке для проведения аэрологических наблюдений, где обеспечена открытость горизонта для хорошего приема со всех направлений.

Результаты измерений ветра на высотах обычно сообщаются вместе с результатами измерений приземного ветра. Предпочтительно, чтобы приземный ветер наблюдался с площадки, расположенной близко к месту запуска шара-пилота. Площадка для запуска должна выбираться таким образом, чтобы получаемые данные о ветре соответствовали целям проведения измерений ветра на высотах. Например, в случае если данные о ветре на высотах необходимы для определения локальных воздействий в масштабе аэродрома, оптимальное местоположение площадки может отличаться от того, которое необходимо для наблюдения за движениями мезо-масштаба и синоптического масштаба.

13.5 ИСТОЧНИКИ ОШИБОК

13.5.1 Общие положения

Ошибки при измерении ветра на высотах представляют собой сочетание ошибок, связанных с несовершенным слежением за горизонтальным перемещением мишени, ошибок определения высоты мишени и различий между движением мишени и фактическим движением атмосферы.

13.5.1.1 *Ошибки при слежении за мишенью*

Взаимосвязь между ошибками измерения ветра и ошибками слежения зависит от применяемого метода наблюдения. Для некоторых систем, таких как радиотеодолиты, ошибки определения ветра значительно изменяются в зависимости от дальности, азимута и угла места даже в тех случаях, когда ошибки определения этих параметров остаются постоянными во времени. В то же время при использовании навигационных средств слежения ошибки измерения ветра обычно не изменяются слишком сильно при разных значениях дальности или высоты.

Неопределенности, обусловленные расчетом ветра вручную, были оценены в публикации ВМО (WMO, 1975). Был сделан вывод о том, что риск внесения существенных ошибок за счет использования ручных методов расчета ветра (таких как методы, предусматривающие применение планшетов, логарифмических линеек и прочее) слишком велик и что расчеты ветра на высотах следует автоматизировать в возможно большей степени.

Точность систем измерения ветра на высотах время от времени изменяется. Это изменение может происходить в короткие периоды времени в ходе конкретного полета мишени, когда слежение временно ухудшается, или в ходе всего запуска, например, в том случае, если сигналы, передаваемые с зонда, использующего навигационные средства, являются дефектными. В некоторых местах точность измерения ветра на высотах может постепенно уменьшаться со временем в течение нескольких месяцев в связи с нестабильностью работы системы слежения или с неправильной наладкой наземной системы. Во всех случаях было бы полезно рассчитывать оценки точности измерений ветра с помощью

систем измерения ветра на высотах в реальном масштабе времени для дополнения этой информацией сообщаемых данных измерений ветра на высотах. Информация об ошибках позволила бы выявлять результаты измерений более низкого качества, и при численном анализе им мог бы придаваться меньший вес. Сообщения об ошибках могли бы обеспечиваться на практике посредством использования соответствующих кодов TEMP или PILOT и таблиц BUFR (ВМО, 2011*a*).

Когда ошибки слежения за мишенью начинают приводить к неприемлемым ошибкам в результатах измерения ветра при конкретном вертикальном разрешении, то обычно приходится использовать меньшее вертикальное разрешение.

Практика ступенчатого уменьшения вертикального разрешения при измерениях ветра на высотах в верхней тропосфере и нижней стратосфере в основном принималась для преодоления ограничений по слежению, присущих радиотеодолитам. Такая практика не оправдана фактической вертикальной структурой атмосферы. Многие из наиболее значительных вертикальных сдвигов ветра обнаруживаются в верхних слоях струйных течений на высотах 10–18 км (см., например, вертикальные профили ветра, представленные в работе Nash, 1994).

13.5.1.2 ***Ошибки определения высоты***

Ошибки определения высоты при радиоветровом зондировании в тропосфере и нижней стратосфере будут такими же, как и ошибки при измерениях высоты, описанные в настоящем томе, глава 12. Эти ошибки будут самыми большими для радиозондов, в которых используются датчики давления в верхней стратосфере, и были бы самыми значительными для данных ЧПП или при климатических исследованиях при наличии значительного вертикального сдвига ветра как, например, в околополярном вихре (см. рисунок 13.1(b)).

При слежении за шаром-пилотом с использованием одного теодолита высота рассчитывается по времени нахождения шара в полете, а скорость подъема определяется предположительно. На практике запуск шара-пилота с точно определенной скоростью подъема является сложной задачей. Поэтому там, где имеется значительный вертикальный сдвиг ветра в нижних слоях, возможно связанный со значительными различиями в вертикальной скорости из-за термиков, ошибки определения высоты могут оказывать отрицательное воздействие на результаты шаропилотных наблюдений.

Опытная эксплуатация полностью автоматизированных систем измерения ветра на высотах часто показывает расхождения между временем, определенным для проведения наблюдений за ветром, и временем, установленным для связанных с ними радиозондовых измерений. В некоторых случаях начало измерений ветра не совпадает с началом радиозондовых измерений, в других – синхронизация нарушается в ходе полета по ряду причин. Время, установленное для сообщений о ветре, не всегда соответствует времени получения данных, используемых для расчета ветра, а скорее соответствует времени начала или завершения отбора данных. Все виды ошибок, связанных с согласованием по времени, могут приводить к серьезным ошибкам определения высоты, на которой производились измерения ветра. Такие ошибки должны быть устранены в ходе опытной эксплуатации, если целью является достижение надежного функционирования.

13.5.1.3 ***Движение мишени по отношению к атмосфере***

Движение мишени относительно воздуха имеет наибольшее значение для систем, обладающих высокой точностью слежения и самым большим вертикальным разрешением. Например, раскачивание радиозонда ГСОМ под шаром-пилотом отчетливо прослеживается с помощью ГСОМ и должно отфильтровываться в возможно большей степени.

Ошибки, обусловленные движением шара-пилота относительно атмосферы, возникающим из-за распространения вихрей от спутного потока шара, могут достигать 1–2 м·с$^{-1}$ (уровень 2σ) при отслеживании небольших шаров-пилотов (массой 50 г) при вертикальном разрешении 50 м. В случае повседневных оперативных измерений (вертикальное разрешение около 300 м) при использовании шаров большего размера (массой более 350 г) ошибки, связанные с движением шара, меньше.

Горизонтальное движение зондов, сбрасываемых с парашютом относительно атмосферы, также может ограничить точность измерений сбрасываемыми зондами, слежение за которыми производится с помощью ГСОМ. Скорость спуска сбрасываемых зондов обычно вдвое больше скорости подъема оперативных шаров-радиозондов.

13.5.2 **Ошибки при шаропилотных наблюдениях**

Инструментальные погрешности хорошего оптического теодолита желательно не должны превышать ±0,05°. Эти погрешности могут медленно изменяться с изменением азимута или угла места, но они невелики по сравнению с ошибками, которые вносятся наблюдателем. Погрешности шкал отсчета не должны превышать 0,1°. Значение этих погрешностей возрастает при большой дальности и при работе с малыми углами места.

При слежении за подъемом с помощью одного теодолита источником наибольших ошибок является неопределенность скорости подъема шара. Эта неопределенность возникает из-за различий в заполнении шара газом, формы шара и скорости вертикальных движений воздуха в атмосфере, в которой поднимается шар. Соответствующая ошибка определения скорости подъема дает в результате пропорциональную ошибку определения высоты, на которой находится шар, и, следовательно, с учетом изменения угла места, пропорциональную ошибку определения скорости ветра.

При отслеживании подъема с помощью двух теодолитов погрешности системы зависят от принятого метода оценки. Анализ погрешностей был представлен в работе Schaefer and Doswell (1978).

13.5.3 **Ошибки систем, в которых используется направленная антенна**

Связь между ошибками по вектору ветра и ошибками фактических измерений слежения может быть выражена как приближенная функция высоты и средней скорости ветра (или отношения последней к средней скорости подъема шара-зонда). Выражения для случайных ошибок при измерениях ветра с помощью первичных радиолокаторов и радиотеодолитов имеют следующий вид:

a) для первичного или вторичного радиолокатора, измеряющих наклонную дальность, азимут и угол места:

$$\varepsilon_{\text{v}}{}^2 = 2 \cdot \left[\varepsilon_{\text{r}}{}^2 \cdot Q^2 \Big/ \left(Q^2 + 1 \right) + \varepsilon_\theta{}^2 \cdot h^2 + \varepsilon_\varphi{}^2 \cdot h^2 \cdot Q^2 \right] \Big/ \tau^2 \qquad (13.3)$$

b) для оптических теодолитов или радиотеодолитов и радиозондов, измеряющих азимут, угол места и высоту:

$$\varepsilon_{\text{v}}{}^2 = 2 \cdot \left[\varepsilon_h{}^2 \cdot Q^2 + \varepsilon_\theta{}^2 \cdot h^2 \cdot \left(Q^2 + 1 \right)^2 + \varepsilon_\varphi{}^2 \cdot h^2 \cdot Q^2 \right] \Big/ \tau^2 \qquad (13.4)$$

где ε_{v} — векторная ошибка расчета ветра; ε_{r} — случайная ошибка измерения наклонной дальности; ε_θ — случайная ошибка измерения угла места; ε_φ — случайная ошибка измерения азимута; ε_h — случайная ошибка измерения высоты (рассчитанная по измеренному значению давления); Q — отношение величины среднего вектора ветра до высоты h к средней скорости подъема шара-зонда до высоты h; τ — интервал времени между измерениями.

Таблица 13.2 демонстрирует различие точности определения вектора ветра с помощью указанных выше двух методов при измерении ветра на высотах. Средняя скорость

Таблица 13.2. 90 % векторная ошибка (м·с$^{-1}$) как функция высоты и отношения Q среднего ветра к скорости подъема

	Радиолокатор						*Радиотеодолит*					
Q	ε_v *5 км*	ε_v *10 км*	ε_v *15 км*	ε_v *20 км*	ε_v *25 км*	ε_v *30 км*	ε_v *5 км*	ε_v *10 км*	ε_v *15 км*	ε_v *20 км*	ε_v *25 км*	ε_v *30 км*
1	1	1	1,5	1,5	2,5	2,5	1	1,5	3	5,5	9	25
2	1	1,5	2,5	3	4	4	5	4	6,5	11	19	49
3	1,5	2,5	3	4	5	6	4	7	11	19	30	76
5	1,5	3	5	6	8	10	9	18	27	42	59	131
7	2,5	5	7	9	11	13	18	34	51	72	100	194
10	3	6,5	10	13	16	19	34	67	100	139	182	310

Примечания:

a Данная таблица не включает дополнительные ошибки, вызванные многолучевой интерференцией при радиотеодолитных наблюдениях, которые возможны при значениях Q, равных 7–10.

b На практике радиотеодолитные ветровые наблюдения сглаживаются по большим по вертикали слоям, чем указано в этих расчетах, для всех высот за исключением 5 км. Таким образом, ошибки радиотеодолитов на высотах 15 км и более должны делиться на коэффициент, равный, по крайней мере, четырем для соответствия оперативной практике.

подъема, принимаемая при измерении ветра на высотах, обычно должна составлять 5–8 м·с$^{-1}$. Значения ошибок вектора ветра рассчитываются по уравнениям (13.3) и (13.4) для различных высот и значений Q для системы слежения со следующими характеристиками: ε_r = 20 м; ε_θ = 0,1°; ε_φ = 0,1°; ε_h — ошибка измерения высоты, соответствующая ошибке определения давления, равной 1 гПа; τ = 1 мин.

Из таблицы 13.2 видно, что точность измерения ветра с помощью радиотеодолита (или оптического теодолита) при заданной точности слежения, безусловно, меньше точности измерений с помощью первичных или вторичных радиолокаторов.

В выражениях для векторной ошибки рассчитанных значений ветра в уравнениях 13.3 и 13.4 первые два члена в квадратных скобках представляют собой радиальную ошибку и ошибку в значениях ветра, наблюдавшегося с тем же азимутом, что и у следящей антенны. Третий член в квадратных скобках представляет собой тангенциальную ошибку — ошибку в значениях ветра, наблюдавшегося под прямым углом к азимуту следящей антенны. Для этих типов систем измерения ветра на высотах распределение ошибок не является независимым от направлений и не может адекватно представляться одним параметром. Таким образом, значения в таблице 13.2 указывают размер ошибок, но не направление, в котором, они действуют.

Когда тангенциальные и радиальные ошибки очень сильно различаются по величине, распределение является в значительной степени эллиптическим, и совместные ошибки имеют тенденцию концентрироваться или параллельно оси следящей антенны, или перпендикулярно к этой оси. В таблице 13.3 приведены некоторые значения отношения тангенциальных ошибок к радиальным, которые совместно дают векторные ошибки, представленные в таблице 13.2. Значения более 3 в таблице 13.3 указывают на ситуации, когда доминирует компонент тангенциальной ошибки. Таким образом, при радиолокационном измерении ветра тангенциальные ошибки доминируют при больших расстояниях (высокие значения средней скорости ветра и, следовательно, высокие значения Q плюс самые большие высоты). При радиотеодолитном измерении ветра радиальные ошибки доминируют при больших расстояниях, и соотношения становятся гораздо меньше единицы. Ошибки по углу места вносят существенный вклад в радиальные ошибки радиотеодолитов. Однако случайные ошибки определения высоты радиозонда вносят наиболее значительный вклад на больших высотах, когда значения Q малы.

Таблица 13.3. Соотношение компонентов ошибок при измерении ветра на высотах ($\alpha_{\varepsilon v}$ = равно отношению тангенциальной ошибки к радиальной α)

	Радиолокатор						*Радиотеодолит*					
Q	$\alpha_{\varepsilon v}$ *5 км*	$\alpha_{\varepsilon v}$ *10 км*	$\alpha_{\varepsilon v}$ *15 км*	$\alpha_{\varepsilon v}$ *20 км*	$\alpha_{\varepsilon v}$ *25 км*	$\alpha_{\varepsilon v}$ *30 км*	$\alpha_{\varepsilon v}$ *5 км*	$\alpha_{\varepsilon v}$ *10 км*	$\alpha_{\varepsilon v}$ *15 км*	$\alpha_{\varepsilon v}$ *20 км*	$\alpha_{\varepsilon v}$ *25 км*	$\alpha_{\varepsilon v}$ *30 км*
1	1/2	1	1	1	1	1	1/3	1/2	1/3	1/4	1/5	1/13
2	1	1	2	2	2	2	1/3	1/3	1/3	1/4	1/6	1/13
3	1	2	2	3	3	3	1/4	1/4	1/4	1/5	1/6	1/13
5	1	3	4	4	5	5	1/5	1/5	1/6	1/6	1/7	1/14
7	3	5	5	6	6	7	1/7	1/7	1/7	1/7	1/9	1/14
10	4	7	8	9	9	9	1/10	1/10	1/10	1/11	1/11	1/16

Результаты, приведенные в таблицах 13.2 и 13.3, основаны на теоретической оценке ошибок по различным видам систем. Однако предполагается, что ветер рассчитывается просто по разности между данными двух дискретных отсчетов слежения. При этом не принимается во внимание возможность повышения точности за счет вычисления скорости изменения местоположения по большому объему информации по слежению при высоком временном разрешении. В таблице 13.4 содержатся оценки точности фактических измерений, полученные по ряду радиолокаторов и радиотеодолитов в ходе четырех фаз международных сравнений радиозондов ВМО (см. 13.6.1.2 с информацией по тестам).

Из трех радиотеодолитов, тестированных в ходе международных сравнений радиозондов ВМО, японская система наилучшим образом зарекомендовала себя при высоких значениях Q, но позже этой системой для измерения угла превышения в большом объеме использовалось сглаживание, и точность измерения скорости вертикальных движений в верхних слоях струйных течений была недостаточно высокой. Для портативного радиотеодолита меньшего размера, установленного США в Японии, характерны самые большие ошибки измерения ветра при высоких значениях Q в связи с проблемами, обусловленными многолучевой интерференцией.

Эллиптичность распределения ошибок радиолокационных и радиотеодолитных наблюдений продемонстрировала тенденции, предсказанные для высоких значений Q. Однако эллиптичность была не столь высокой, как указано в таблице 13.3, вероятно, в связи с тем, что случайные ошибки скорости изменения азимута и угла превышения, полученные на практике, были меньше принятых для таблицы 13.3.

В ходе взаимного сравнения систем высококачественных радиозондов ВМО в Янцзяне, Китай, (WMO, 2011*b*) Китай использовал современный вторичный радиолокатор, работающий на частоте 1 680 МГц с системой радиозондов «Дацяо». При сильном ветре в нижней тропосфере значения Q на высоте около 4 км составляли от двух до трех; дальность — около 15 км, а среднеквадратическая векторная ошибка (k = 2) измерений ветра — от 1 до 1,2 м·с$^{-1}$ при эллиптичности от 1 до 1,3. К концу полетов в стратосфере Q вновь стало равным в среднем примерно 2,5, но при большей дальности (от 70 до 100 км) значение ε_v для k = 2 составляло около 2,7 м·с$^{-1}$, а эллиптичность была равна двум. За эталонный ветер в Янцзяне был принят ветер, измеренный по ГСОМ с высоким вертикальным разрешением более 150 м, тогда как в Казахстане вертикальное разрешение рабочего эталона не превышало 300 м. Таким образом, современный китайский вторичный радиолокатор показал хорошие результаты и является существенным продвижением по сравнению с предыдущей системой, работающей на частоте 403 МГц.

Таблица 13.4. Оценки типичных случайных векторных ошибок (уровень 2σ, единица: м·с$^{-1}$) при измерениях ветра на высотах, полученные в ходе сравнений радиозондов ВМО (включаются оценки типичных значений Q и $\alpha_{\varepsilon v}$ для каждой из четырех фаз)

Система	ε_v *3 км*	$\alpha_{\varepsilon v}$ *3 км*	Q *3 км*	ε_v *18 км*	$\alpha_{\varepsilon v}$ *18 км*	Q *18 км*	ε_v *28 км*	$\alpha_{\varepsilon v}$ *28 км*	Q *28 м*	*Место испытания*
Первичный радиолокатор (Соединенное Королевство)	1,1	1	3,5	2,1	1,3	5	2,7	1,6	5	Соединенное Королевство[a]
Радиотеодолит (Соединенные Штаты Америки)	2,1	≈ 1	1,5	4,8	≈ 1	2,5	5,2	≈ 1	1	Соединенное Королевство
Радиотеодолит (Соединенные Штаты Америки)	2,8	≈ 1	2,5	10,4	0,4	6	9	0,33	4	Соединенные Штаты Америки
Портативный радиотеодолит	1,5	≈ 1	< 1	4,8	≈ 1	3	5,8	≈ 1	1,5	Казахстан
Портативный радиотеодолит	2,2	≈ 1	1,5	12	0,31	5,5	9	0,23	4	Япония
Радиотеодолит (Япония)	1,7	≈ 1	1,5	6,4	0,48	5,5	4,7	0,48	4	Япония
Вторичный радиолокатор (АВК, Россия)	1,5	≈ 1	< 1	2,6	≈ 1	3	2,6	≈ 1	1,5	Казахстан
Вторичный радиолокатор (Китай)	1,5	≈ 1	< 1	3,8	≈ 1	3	3,4	≈ 1	1,5	Казахстан

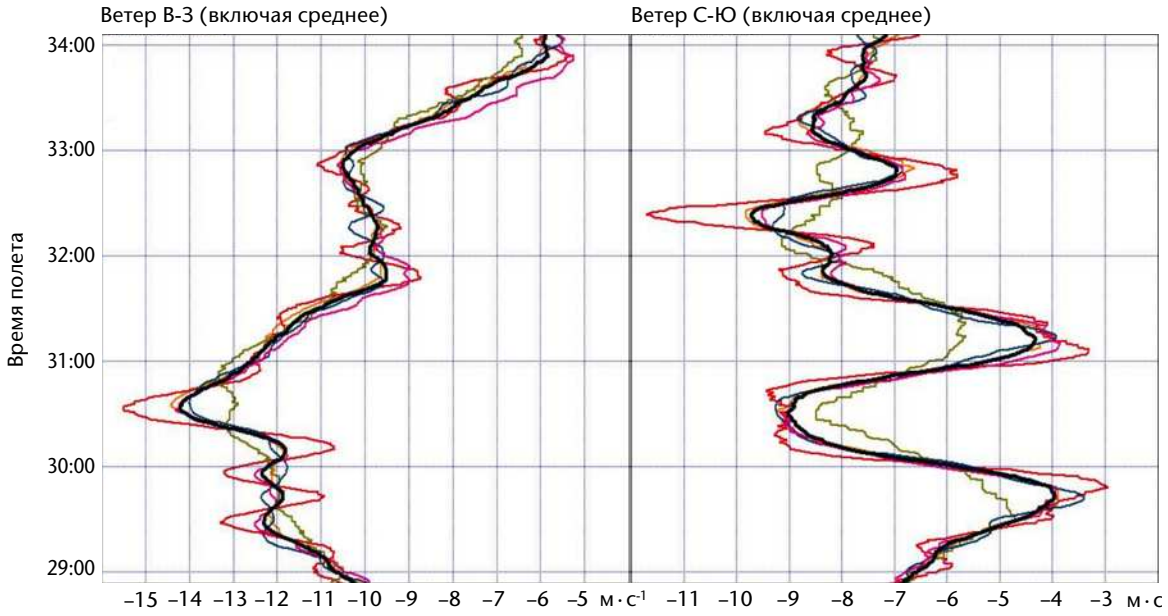
Примечание:

a Данные, полученные в ходе испытаний в Соединенном Королевстве после фазы I международного сравнения радиозондов ВМО (см. Edge et al., 1986).

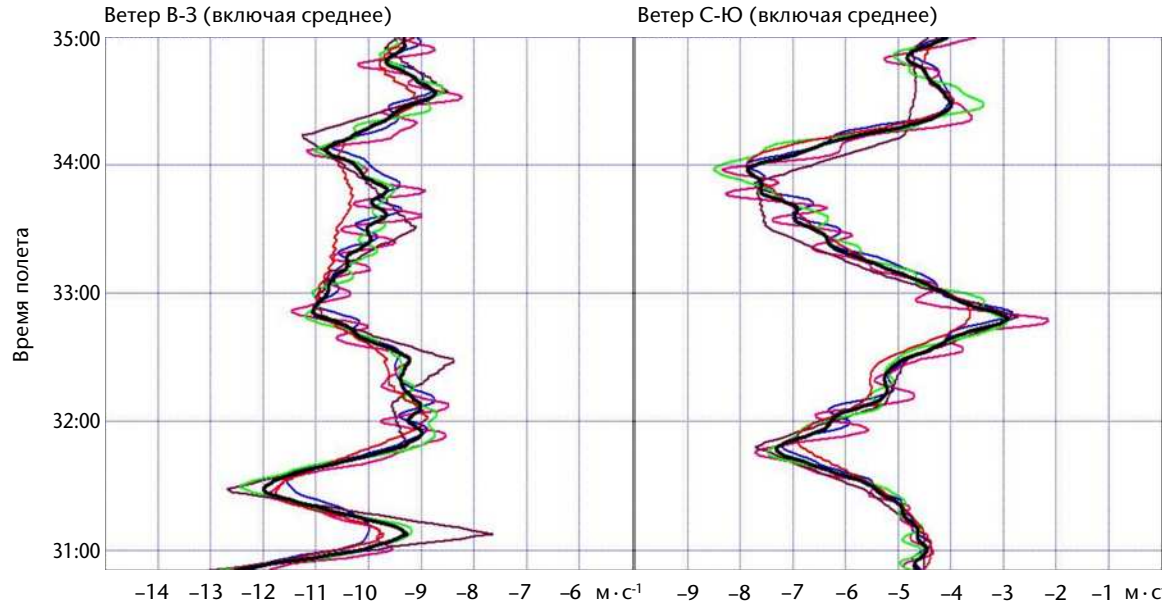
13.5.4 Ошибки систем для измерения ветра, использующих Глобальную систему определения местоположения

Теоретически система обнаружения ветра ГСОМ, использующая коды дальности грубого разрешения в дифференциальном режиме, должна обладать возможностью измерения ветра с неопределенностью 0,2 м·с$^{-1}$. Оценки точности, приведенные в таблице 13.5, были сделаны на основе недавно проведенных ВМО тестов радиозондов ГСОМ. Основное различие между системами заключается в различной фильтрации, применяемой в отношении ветра для устранения движения радиозонда по отношению к шару-зонду. Это движение складывается из регулярного маятникового движения радиозонда под шаром-зондом и дополнительного неоднородного вращения и перемещения вследствие того, что на шар и радиозонд действуют разные ветры по ходу подъема шара-зонда.

Примеры одновременных измерений ветра в верхней тропосфере, производившихся с помощью радиозондов ГСОМ в ходе взаимного сравнения систем высококачественных радиозондов ВМО, приведены на рисунке 13.2. На рисунке приведены только выборки полетов, поскольку различия можно увидеть лишь при рассмотрении небольших выборок данных, так как общее совпадение результатов значительно выше по сравнению со стандартами, предусмотренными для более ранних измерений параметров ветра.



a) Полет 33: Цзинья, ИнтерМет, Локхид Мартин – Сиппикан, МОДЕМ и Вайсала



b) Полет 34: Чанфэн, Грав, Хуаюнь, Мейсей и Метеолабор

Рисунок 13.2. Выборка результатов взаимного сравнения измерений параметров ветра с помощью ГСОМ, проводившихся в Янцзяне, Китай, в ходе взаимного сравнения систем высококачественных радиозондов ВМО (WMO, 2011*b*).

Выборки, представленные на рисунке 13.2, демонстрируют довольно хорошую согласованность определения вертикальной структуры почти всеми системами при пиках волн, отделенных интервалом примерно в 90 секунд, хотя и не такую хорошую, как для колебаний при пиках, отделенных интервалом в 40 секунд и меньше. Таким образом, длины вертикальных волн, в основном отображаемых однозначно, составляют 600 м, а длины волн, отображаемых со значительной неоднозначностью, — 200 м и менее. График одной из систем на рисунке 13.2(a) слишком сглажен по сравнению с графиками других, а один из графиков на рисунке 13.2(b) стремится к аппроксимации прямой линией измерений с помощью ГСОМ. В обоих случаях это ведет к появлению значений, резко отклоняющихся от корректных величин.

Таблица 13.5. Случайная векторная ошибка (k = 2) и систематическая ошибка высококачественных навигационных систем определения ветра с помощью ГСОМ, полученные в ходе проведенного под эгидой ВМО в Янцзяне, Китай, взаимного сравнения систем высококачественных радиозондов

Диапазон высот	*Систематическая ошибка, ($м \cdot с^{-1}$)*	*Среднеквадратическая векторная ошибка при вертикальном разрешении 2 км, ($м \cdot с^{-1}$)*	*Среднеквадратическая векторная ошибка при вертикальном разрешении 300 м, ($м \cdot с^{-1}$)*	*Среднеквадратическая векторная ошибка при вертикальном разрешении 100 м, ($м \cdot с^{-1}$)*
Нижняя тропосфера 0–8 км	до ±0,05	0,06–0,15	0,12–0,50	0,3–0,7
Верхняя тропосфера 8–17 км	до ±0,10	0,1–0,4[a]	0,3–0,9[a]	0,4–1,4[a]
Стратосфера 17–34 км	до ±0,15	0,15–0,40[b]	0,3–0,8[b]	0,4–1,1[b]

Примечания:
[a] Худший результат на высоте около 16 км
[b] Худший результат на высоте более 28 км

Данные выборки, иллюстрирующие не самые лучшие, но и не самые худшие результаты, показывают относительно высокое качество обработки измерений ветра с помощью ГСОМ, а также то, что большое количество производителей достигли удовлетворительных результатов. Это подтверждается данными статистической обработки 60 полетов оперативных радиозондов ГСОМ в Янцзяне (см. таблицу 13.5). В этой таблице представлены данные о ветре, полученные по результатам примерно 30 сравнительных полетов, осредненные по двухминутным, тридцати- и десятисекундным интервалам, и показано, что лучшими показателями обладают системы с наименьшей среднеквадратической разностью векторов ветра. Ошибки, представленные в таблице 13.5, достаточно малы для того, чтобы удовлетворить потребности пользователей в точности измерений ветра, описанных в настоящем томе, глава 12, приложение 12.A.

Со временем различия в отфильтрованных результатах определения местоположения по ГСОМ для сведения к минимуму влияния движений радиозонда по отношению к шару-зонду, вероятно, будут уменьшаться по сравнению с диапазонами, указанными в таблице 13.5. Однако нерегулярные движения (в отличие от относительно сглаженных маятниковых движений) радиозонда по отношению к шару-зонду будут ограничивать согласованность измерений двух радиозондов, которые могут быть получены в ходе одного полета. По этой же причине можно ожидать, что ошибки измерений по отдельному радиозонду будут выше расчетных при ожидаемой точности определения положения радиозонда по спутниковым навигационным системам.

В Китае внешняя оболочка шаров-зондов с двойной оболочкой часто разрывалась на высоте около 16 км, в результате чего помехи стабильному передвижению радиозонда могли привести к самым высоким среднеквадратическим векторным ошибкам на высоте около 16 км, представленным в таблице 13.5. Результаты тестов (60 полетов) двух радиозондов ГСОМ различных производителей для нижней тропосферы и стратосферы, проходивших в Соединенном Королевстве в течение нескольких сезонов 2009/2010 гг., сходны с результатами тестирования тех же радиозондов в Янцзяне, представленными в таблице 13.5. Однако СКО вектора ветра в верхней тропосфере находится в пределах 0,3–0,6 $м \cdot с^{-1}$ при вертикальном разрешении 100 м и 0,2–0,5 $м \cdot с^{-1}$ при вертикальном разрешении 300 м. Таким образом, для этих двух систем результаты измерений с более высоким разрешением в верхней тропосфере, проходившие в Соединенном Королевстве, соответствовали друг другу гораздо лучше, чем результаты измерений в Янцзяне.

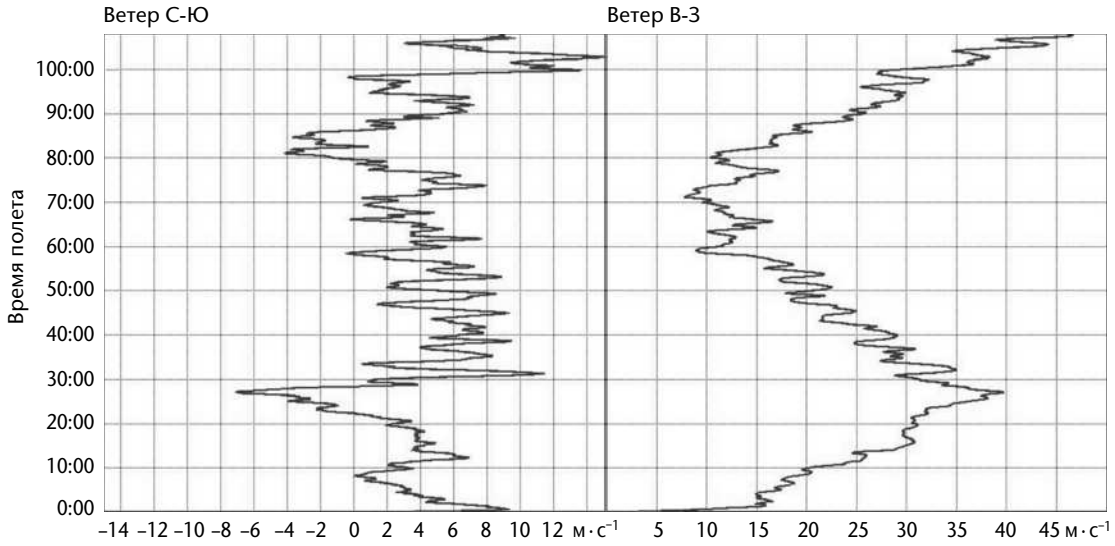


Рисунок 13.3. Примеры вертикальных профилей ветра, полученных независимо при помощи радиозондов ГСОМ двух различных производителей в Камборне, Соединенное Королевство, демонстрирующие мелкомасштабную структуру, присутствующую во многих корректных измерениях. Программное обеспечение обработки результатов измерений радиозонда должно указывать, на каких этапах полета получены менее надежные результаты в случае, когда ухудшается прием сигналов ГСОМ.

Иногда радиозонд ГСОМ дает сбои и не передает данные о ветре в ходе полета, продолжая передавать данные о температуре и влажности до момента разрыва оболочки. Радиочастотные помехи внешних источников вызывают проблемы и увеличивают ошибки результатов измерений ветра. Программное обеспечение обработки результатов должно иметь возможность информировать оператора о таких проблемах, поскольку трудно бывает отличить реальную структуру атмосферы и измерения с большими случайными ошибками (например, см. профили ветра на рисунке 13.3).

В отличие от наземных систем «Лоран-С», результаты измерений ветра по ГСОМ не изменяются значительным образом в зависимости от условий в ионосфере.

13.5.5 Ошибки наземных радионавигационных систем «Лоран-С»

Ошибки навигационной системы зависят от фазовой стабильности сигналов системы, принимаемых радиозондом, и от положения радиозонда по отношению к сети передатчиков навигационной системы. Однако нельзя при этом игнорировать качество телеметрической линии связи между радиозондом и наземным приемником. В тестах, в которых радиозонды перемещались на большие расстояния (по крайней мере, на 50–100 км), было обнаружено, что ошибки измерения ветра, характерные для навигационных систем измерения ветра, возрастают с увеличением расстояния, однако обычно в той же или в меньшей степени, что и ошибки при такой же дальности в случае использования первичного радиолокатора. Прием сигнала с радиозонда сразу же после запуска не всегда бывает надежным. Ошибки измерения ветра с помощью системы «Лоран-С» сразу же после запуска больше, чем при уже установившемся движении радиозонда через несколько минут после запуска.

Точность навигационных измерений ветра системой «Лоран-С» ограничена, главным образом, соотношением сигнал-шум сигналов, принимаемых радиозондом. Используемое на практике для получения надежных данных о ветре время осреднения составляет от 30 с до 2 мин для сигналов «Лоран-С». Мощность сигналов, принимаемых в данном месте от некоторых передатчиков «Лоран-С», может значительно колебаться в течение

дня. Обычно это связано с тем, что в определенных ситуациях суточные колебания высоты и ориентации ионосферных слоев оказывают сильное влияние на мощность сигнала. Колебания мощности и устойчивости сигнала могут быть настолько велики, что успешные измерения ветра с помощью системы «Лоран-С» могут быть невозможны в течение всего дня.

Другим важным фактором, влияющим на точность измерений с помощью системы «Лоран-С», является геометрическое уменьшение точности навигационной системы, которое зависит от местоположения радиоприемника зонда по отношению к передатчикам системы. Когда радиозонд находится поблизости от центра базисной линии между двумя передатчиками, то соответствующая случайная ошибка определения разности времени поступления сигналов от двух передатчиков даст в результате небольшую случайную ошибку определения местоположения в направлении, параллельном базисной линии между передатчиками. Однако та же случайная ошибка определения разности времени поступления сигналов приведет к очень большой ошибке определения местоположения в том же направлении, если радиозонд находится на продолжении базисной линии одного из передатчиков. Для обеспечения самой высокой точности двумерного измерения горизонтального ветра требуются, по крайней мере, две пары навигационных передатчиков, расположенных таким образом, чтобы их базисные линии находились приблизительно под прямым углом, а радиозонд при этом перемещался к центру треугольника, образованного тремя передатчиками. На практике во всех случаях, когда это возможно, используются сигналы с более чем двух пар навигационных передатчиков для повышения точности ветровых наблюдений. Использование метода наименьших квадратов для определения согласованности полученных данных измерений ветра весьма полезно при определении оценок ошибок измерения ветра.

Помехи, препятствующие распространению сигналов сети навигационных передатчиков, являются еще одним источником ошибок.

Passi и Morel (1987) провели первое исследование ошибок измерений ветра с помощью системы «Лоран-С». Имеющиеся в продаже системы могли обеспечивать хорошее качество данных об измерении ветра (таблица 13.6). Качество измерений, полученных при работе, главным образом, с сигналами в виде приземной волны, было рассчитано по тестам установки на Британских островах, как сообщалось в работе Nash and Oakley (1992). Качество измерений, получаемых при работе с передатчиками на большем расстоянии, когда существенное значение имеют пространственные волны, оценивалось по результатам фазы IV международных сравнений радиозондов ВМО в Японии (см. WMO, 1996). В Соединенном Королевстве измерения ветра с помощью системы «Лоран-С» были прекращены из-за неопределенности будущего применения этой системы в северо-западной части Европы и заменены на системы измерения параметров ветра с помощью ГСОМ на всех оперативных пунктах.

13.5.6 Ошибки репрезентативности

При проведении большинства современных радиоветровых измерений фиксируют мелкомасштабные колебания параметров ветра в атмосфере, которые не могут быть представлены в моделях ЧПП. Поэтому, например, когда профили составляющих ветра,

Таблица 13.6. Ожидаемая случайная ошибка (k = 2) и систематическая ошибка для навигационных систем обнаружения ветра «Лоран-С» в районах, где охват близок к оптимальному

Система	*Время осреднения (с)*	*Систематическая ошибка (м·с$^{-1}$)*	*Случайная ошибка (м·с$^{-1}$)*
«Лоран-С» (приземная волна)	30–60	до ±0,2	0,6–3
«Лоран-С» (пространственная волна)	60–120	до ±0,2	1,6–4

полученные с помощью ГСОМ, сравнивают непосредственно с результатами численного моделирования, полученными с помощью глобальных моделей, стандартное отклонение данных наблюдений/результатов численного моделирования ($k = 2$) для средних широт обычно составляет от 4 до 6 м·с$^{-1}$ в нижней тропосфере и от 4 до 9 м·с$^{-1}$ в верхней тропосфере, то есть оно всегда значительно больше инструментальных векторных ошибок, указанных в таблице 13.5, для вертикального разрешения 300 м. Частично это расхождение является результатом низкой точности сообщаемых данных о ветре, как отмечалось ранее в 13.1.3.2.

Среднеквадратические значения (СКЗ) разности векторов между радиозондовыми измерениями ветра на высотах, проводимыми с интервалами в 2, 6, 18 и 54 ч, были рассчитаны на основе использования временных рядов данных измерений, проводившихся в ходе взаимного сравнения систем высококачественных радиозондов ВМО в Янцзяне, Китай, (WMO, 2011*b*) с применением методики, использованной Kitchen (1989). Результаты представлены в виде функции высоты на рисунке 13.4.

Затем можно ожидать, что СКЗ ошибки вектора в ветре будет связано с разделением по времени, используя соотношения из работы Kitchen (1989):

$$\left(\tau_{\mathrm{V}}\left(\Delta t\right)\right)^2 = \left(b_{\mathrm{V}}\Delta t^{\gamma}\right)^2 + \left(\tau_{\mathrm{V(small\ scale)}}\left(\Delta t\right)\right)^2 \qquad (13.5)$$

где $\tau_{\mathrm{V}}(\Delta t)$ — СКЗ разности векторов ветра по измерениям, произведенным с интервалом Δt; $b_{\mathrm{V}}\,\Delta t^{\gamma}$ — структурная функция, представляющая СКЗ отклонения, связанного с изменениями во времени синоптического масштаба и мезомасштаба; b_{V} — постоянная; γ — постоянная. В ходе проведения измерений в Янцзяне величина γ составляла от 0,5 до 0,6 для измерений ветра в тропосфере с интервалами времени между 6 и 54 ч. Наконец, $\tau_{\mathrm{V(small\ scale)}}$ (Δt) — СКЗ разности векторов на высотах, связанной с мелкомасштабными структурами, такими как квазиинерционные гравитационные волны, турбулентные слои и структуры облачного масштаба.

В ходе измерений в тропосфере в Янцзяне СКЗ разности векторов ветра, обусловленной мелкомасштабными структурами, составляло примерно 2 м·с$^{-1}$ ± 0,5 м·с$^{-1}$, а СКЗ

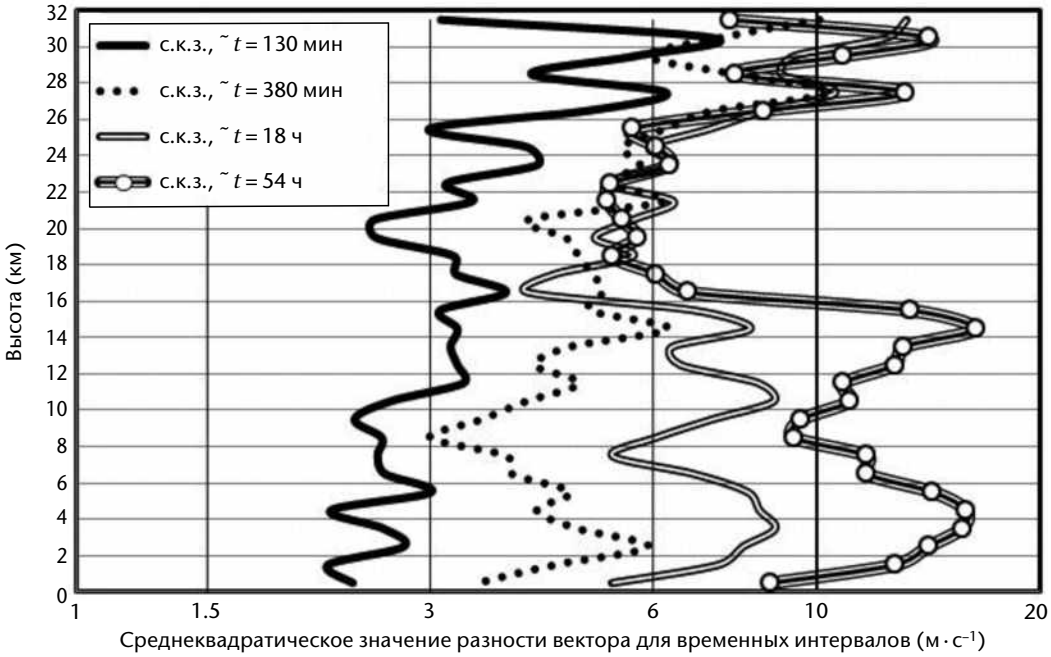


Рисунок 13.4. СКЗ разности векторов ветра ($k = 1$) для временных интервалов 2, 6, 18 и 54 ч для 11 парных наблюдений с вертикальным разрешением 1 км, по данным взаимного сравнения систем высококачественных радиозондов ВМО в Янцзяне, Китай, июль 2010 г. Влияние инструментальной ошибки было исключено из среднеквадратической разности.

разности векторов ветра, обусловленной структурами синоптического масштаба и мезомасштаба — от 2 до 3 м·с$^{-1}$ для интервала времени 2 часа, увеличиваясь до 7 м·с$^{-1}$ для интервала времени 18 часов. Это величины примерно одного порядка с теми, которые получил Kitchen (1989) при измерениях в нижней и средней тропосфере в Соединенном Королевстве. Здесь СКЗ разности векторов ветра были больше в верхней тропосфере из-за колебаний синоптического масштаба, связанных со струйными течениями в средних широтах. Хотя можно было бы ожидать, что среднеквадратическая разность векторов, обусловленная явлениями синоптического масштаба и мезомасштаба, уменьшится до менее 1 м·с$^{-1}$ при интервале времени 40 минут в ходе измерений в Янцзяне, отсутствует информация о временных интервалах, необходимых для уменьшения СКЗ разности вектора ветра, обусловленного мелкомасштабными структурами, до величины менее 1 м·с$^{-1}$. Вот почему для получения хорошей согласованности результатов измерений ветра или для того, чтобы результаты измерений с высокой точностью отражали состояние атмосферы в определенный момент времени, измерения необходимо проводить с интервалом времени намного меньше, чем 20 мин, как указано в 13.1.3.3.

В Янцзяне мелкомасштабные колебания, связанные с квазиинерционными гравитационными волнами, стали доминирующим фактором в изменении СКЗ разности векторов со временем, и структурная функция не подходит для использования в случае временных изменений мезомасштаба и синоптического масштаба. Такие же данные были получены Китченом в летний период в Соединенном Королевстве. СКЗ разности векторов при интервале времени в 18 часов в Янцзяне находилось в диапазоне от 5 до 9 м·с$^{-1}$ — величины того же порядка, что и величины, полученные в ходе измерений в Соединенном Королевстве.

Таким образом, на ошибки репрезентативности при измерениях ветра будут оказывать основное влияние мелкомасштабные изменения, а изменения синоптического масштаба и мезомасштаба будут, вероятнее всего, иметь значение в связи со структурами, которые обнаруживаются в струйных течениях в верхней тропосфере и нижней стратосфере. В результате будут наблюдаться расхождения в данных измерений, полученных на разных пунктах, а описанные здесь величины отражают лишь условия и синоптическую ситуацию одного из типов местности, причем эти измерения включают измерения, сделанные во время надвигавшихся и отступавших от этого района тайфунов.

13.6 СРАВНЕНИЯ, КАЛИБРОВКА И ТЕХНИЧЕСКОЕ ОБСЛУЖИВАНИЕ

13.6.1 Сравнение

Системы для измерения ветра на высотах, как правило, достаточно сложны, поэтому возможны различного рода отказы. Вполне вероятно, что такая система при частичном отказе может продолжать выдавать данные о вертикальной структуре ветра, которые операторам могут показаться правдоподобными. Многие из этих систем требуют тщательной отладки и технического обслуживания для поддержания точности слежения.

Точность измерений ветра оперативными системами может быть проверена путем сравнения их со статистикой мониторинга наблюдений, выпускающейся центрами ЧПП. Статистика мониторинга включает сводки различий между измерениями ветра на высотах по каждому месту и краткосрочными прогнозами полей (фоновых) для того же места. При существующих в настоящее время методах усвоения и анализа данных ошибка в наблюдениях оказывает некоторое влияние на поля метеорологического анализа. Таким образом, было продемонстрировано, что ошибки наблюдений наиболее надежно обнаруживаются посредством использования краткосрочного прогноза по результатам анализа, подготовленного за 6 часов до времени наблюдения.

Эксплуатационные характеристики систем измерения ветра на высотах могут также сравниваться с характеристиками других систем, качество измерений которых известно в ходе специальных тестов. Эти тесты могут дать возможность отследить ошибки, которые должны быть оценены независимо от ошибок оценки высоты.

Оба вида сравнений могут быть интерпретированы с помощью статистических методов, предложенных в публикации ВМО (WMO, 1989).

13.6.1.1 *Оперативный мониторинг посредством сравнения с прогностическими полями*

Статистические данные ежедневных сравнений результатов оперативных измерений ветра и полей краткосрочных прогнозов, полученных с использованием моделей ЧПП, могут предоставляться операторам систем через ведущие центры, назначенные КОС ВМО.

Интерпретация статистики мониторинга ветра на высотах является непростой задачей. Значения случайных ошибок в прогностических полях имеют такой же порядок или даже больше ошибок, полученных при использовании систем для измерения ветра на высотах, если они функционируют нормально. Ошибки прогнозов изменяются в зависимости от географического положения, и поэтому могут понадобиться указания центра ЧПП по их интерпретации. Однако относительно легко определить те системы измерения ветра на высотах, для которых случайные ошибки значительно превышают обычные значения. В последние годы около 6 % систем измерения ветра на высотах глобальной сети были определены как дефектные. В основном системы с дефектами функционирования были представлены радиотеодолитами и системами вторичных радиолокаторов.

Сводки систематических отклонений результатов наблюдений от прогностических полей за несколько месяцев или за весь год также полезны для выявления систематических ошибок определения скорости и направления ветра с помощью данной системы. Довольно распространенным дефектом является небольшое рассогласование следящих антенн радиотеодолитов или радиолокаторов.

13.6.1.2 *Сравнение с другими системами измерения ветра*

Специальные сравнительные тесты систем измерения ветра на высотах позволили получить большое количество информации о фактических эксплуатационных качествах различных систем для измерения ветра на высотах, используемых по всему земному шару. В этих тестах ряд мишеней подвешивали к одному шару и отслеживали одновременно рядом наземных систем. Время получения сообщений о ветре с различных наземных станций синхронизировалось с точностью менее 1 с. Затем результаты измерения ветра могли сравниваться как функция времени полета мишени, а определенные для ветра высоты также могли сравниваться независимо. Интерпретация результатов сравнений становится более надежной, если, по крайней мере, одна из систем измерения ветра на высотах обеспечивает измерение ветра с высокой точностью и с известными характеристиками ошибок.

Всеобъемлющие серии сравнительных тестов были проведены в период 1984–1993 гг. как часть международных сравнений радиозондов ВМО. Фазы I и II этих тестов были проведены в Соединенном Королевстве и США соответственно (WMO, 1987). Фаза III была проведена Российской Федерацией в Казахстане (WMO, 1991), а фаза V прошла в Японии (WMO, 1996). Последующие сравнительные тесты, проходившие в Бразилии в 2001 г. (WMO, 2006*a*), были направлены конкретно на выявление проблем определения параметров ветра с помощью ГСОМ в тропиках, в результате чего системы радиозондов, использующие ГСОМ, были усовершенствованы и позднее также протестированы на Маврикии в 2005 г. (WMO, 2006*b*) и самым всесторонним образом в Янцзяне, Китай, в 2010 г. (WMO, 2011*b*).

Информация, приведенная в таблицах 13.4, 13.5 и 13.6, основана, прежде всего, на результатах международных сравнений радиозондов ВМО и дополнительных тестах, выполнявшихся в соответствии с теми же стандартами, что и тесты ВМО.

Теперь, когда разработка систем обнаружения ветра с помощью ГСОМ идет полным ходом, большинство этих систем можно использовать в качестве надежных транспортируемых эталонов для сравнительных тестов оборудования для измерений ветра на высотах в более отдаленных районах земного шара.

13.6.2 Калибровка

Калибровка наклонной дальности для радиолокаторов, в которых используются отраженные радиолокационные сигналы, должна проверяться по отдаленным объектам, местоположение которых точно известно. Подобным же образом следует осуществлять поверку азимута.

Ориентация следящих антенн радиотеодолитов или радиолокаторов должна проверяться регулярно посредством сравнений отсчетов по ним с результатами, полученными с помощью оптического теодолита. Если средняя разность по углу места при наблюдении по теодолиту и радиолокатору составляет больше 0,1°, то необходимо проверить регулировку следящей антенны. Когда при поверке определения азимута используется компас, направление на северный магнитный полюс необходимо точно приводить к направлению на географический север.

При использовании навигационных систем важно проверить, точно ли зарегистрировано в компьютере местоположение наземной системы. Навигационная система слежения должна иметь правильную конфигурацию в соответствии с инструкциями изготовителя и должна стабильно работать еще до запуска радиозонда.

13.6.3 Техническое обслуживание

Радиотеодолиты и радиолокаторы представляют собой относительно сложное оборудование, и обычно для проведения их технического обслуживания требуется опытный техник. Такой техник должен проводить техническое обслуживание как электрической, так и механической части, а также проверить выполнение задач по ремонту. Уровень требуемой квалификации и частота технического обслуживания различаются в зависимости от конструкции системы. В конструкциях некоторых современных радиотеодолитов предусмотрена более высокая по сравнению с предшествующими конструкциями надежность механической части. Стоимость и возможности в отношении обеспечения технического обслуживания должны рассматриваться в качестве важных факторов при выборе типа системы для измерения ветра на высотах.

В большинстве современных навигационных систем слежения ремонт в связи с отказами в электрической части производится посредством замены дефектных модулей. Такие модули должны включать, например, приемники радиозондов или навигационные системы слежения. Как правило, в наземной навигационной системе отсутствуют движущиеся части, и техническое обслуживание механической части является незначительным, однако системы антенн, кабели и соединения следует регулярно инспектировать на предмет коррозии и других изменений, связанных с атмосферным воздействием. Расходы на техническое обслуживание могут быть минимальными при условии, если вместе с системой закупается достаточное число запасных модулей.

13.7 ПОПРАВКИ

Когда радиоветровые наблюдения производятся с помощью радиолокационной системы, то радиолокационная информация по слежению используется для расчета высоты, к которой привязываются измерения ветра. Эти радиолокационные высоты следует скорректировать на кривизну Земли, используя следующее уравнение:

$$\Delta z_{\text{curvature}} = 0,5\left(r_s \cdot \cos\theta\right)^2 \Big/ \left(R_c + r_s \sin\theta\right) \tag{13.6}$$

где r_s — наклонная дальность до мишени; θ — угол места мишени; R_c — радиус кривизны Земли в месте расположения наземной станции.

Кроме того, направление распространения луча радиолокатора изменяется, поскольку показатель преломления воздуха в среднем уменьшается с высотой, так как температура и количество водяного пара также уменьшаются с высотой. Изменения показателя преломления являются причиной искривления радиолокационного луча в направлении Земли. Таким образом, атмосферная рефракция обычно приводит к тому, что угол места мишени, наблюдаемый радиолокатором, превышает ее истинное геометрическое возвышение.

Типичные значения поправок на рефракцию $\Delta z_{\text{refraction}}$ представлены в таблице 13.7. Они были рассчитаны в работе Hooper (1986). В связи с увеличением в последнее время возможностей по обработке данных на компьютерной технике, доступной для наземной станции, алгоритмы для расчета поправок на коэффициент рефракции легче использовать для радиолокаторов, обладающих высокой точностью слежения. Поправки, приведенные в таблице 13.7, были рассчитаны по осредненным за 5 лет климатологическим значениям температуры и содержания водяного пара для различных мест. В те дни, когда ошибки, обусловленные рефракцией, максимальны, требуемая поправка в некоторых местах может превышать приведенные в таблице 13.7 климатологические средние значения. Разница может доходить до 30 %.

Таблица 13.7. Примеры поправок на кривизну Земли и рефракцию к значениям высоты, полученным с помощью радиолокатора

Дальность по горизонтали (км)	*Высота (км)*	$\Delta z_{curvature}$	$\Delta z_{refraction}$ *60° с. ш. 01° з. д.*	$\Delta z_{refraction}$ *36°с. ш. 14° в. д.*	$\Delta z_{refraction}$ *1° ю. ш. 73° в. д.*
25	10	49	–9	–10	–12
50	15	196	–31	–34	–39
100	20	783	–106	–117	–133
150	25	1 760	–211	–231	–262
200	30	3 126	–334	–363	–427

СПРАВОЧНАЯ И ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ЛИТЕРАТУРА

Всемирная метеорологическая организация, 2010 (обновлено в 2017 г.): *Наставление по Глобальной системе наблюдений* (ВМО-№ 544), том I. Женева.

———, 2011*a (обновлено в 2018 г.)*: *Наставление по кодам* (ВМО-№ 306), том I. Женева.

Acheson, D.T., 1970: *LORAN-C Windfinding Capabilities: Wallops Island Experiments*. United States Department of Commerce, Weather Bureau. ESSA Technical Memorandum WBTM EDL 11.

de Boor, C., 1978: *A Practical Guide to Splines*. Springer Verlag, New York.

Edge, P., M. Kitchen, J. Harding and J. Stancombe, 1986: *The Reproducibility of RS3 Radiosonde and Cossor WF Mk IV Radar Measurements*. Meteorological Office, Bracknell, OSM No. 35.

Hooper, A.H., 1986: *The Calculation of Radio-wave Refraction, with Special Reference to Data Height-finding Radars*. Meteorological Office, Bracknell, OSM No. 17.

Kaisti, K., 1995: New low-cost GPS solution for upper-air windfinding. *Proceedings of the Ninth Symposium on Meteorological Observations and Instrumentation*, Charlotte, North Carolina (27–31 March 1995). American Meteorological Society, pp. 16–20.

Karhunen, P., 1983: Automated windfinding developments. *Preprints of the Fifth AMS Symposium on Meteorological Observations and Instrumentation* (Toronto, 11–15 April 1983), pp. 110–115.

Kitchen, M., 1989: Representativeness errors for radiosonde observations. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 115:673–700.

Lange, A.A., 1988: A high-pass filter for optimum calibration of observing systems with applications. In: *Simulation and Optimization of Large Systems* (A.J. Osiadacz, ed.). Clarendon Press, Oxford, pp. 311–327.

Nash, J., 1994: Upper wind observing systems used for meteorological operations. *Annales Geophysicae*, 12:691–710.

Nash, J. and T.J. Oakley, 1992: Experience in the use of LORAN-C windfinding in the United Kingdom. *Proceedings of the Twenty-first Annual Technical Symposium*, Wild Goose Association, Birmingham, England, pp. 81–88.

Passi, R.M., 1978: Overdetermined windfinding systems. *Atmospheric Technology*, 10:65–75.

Passi, R.M. and C. Morel, 1987: Wind errors using the worldwide LORAN network. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 4:690–700.

Schaefer, J.T. and C.A. Doswell, 1978: The inherent position errors in double-theodolite pibal measurements. *Journal of Applied Meteorology*, 17:911–915.

World Meteorological Organization, 1975: *Upper-air Sounding Studies* (R.E. Vockeroth). Technical Note No. 140 (WMO-No. 394), Volume II. Geneva.

———, 1985: *Meteorological Observations Using Navaid Methods* (A.A. Lange). Technical Note No. 185 (WMO-No. 641). Geneva.

———, 1986: *Algorithms for Automatic Aerological Soundings* (A.H. Hooper). Instruments and Observing Methods Report No. 21 (WMO/TD-No. 175). Geneva.

———, 1987: *WMO International Radiosonde Comparison (UK 1984, USA 1985): Final Report* (J. Nash and F.J. Schmidlin). Instruments and Observing Methods Report No. 30 (WMO/TD-No. 195). Geneva.

———, 1989: An algorithmic approach for improving and controlling the quality of upper-air data (A.A. Lange). Paper presented at the Fourth WMO Technical Conference on Instruments and Methods of Observation (TECIMO-IV). Instruments and Observing Methods Report No. 35 (WMO/TD-No. 303). Geneva.

———, 1991: *WMO International Radiosonde Comparison – Phase III, Dzhambul (USSR), 1989: Final Report* (A. Ivanov, A. Kats, S. Kurnosenko, J. Nash and N. Zaitseva). Instruments and Observing Methods Report No. 40 (WMO/TD-No. 451). Geneva.

———, 1994: A new GPS rawinsonde system (D.B. Call). Paper presented at the WMO Technical Conference on Instruments and Methods of Observation (TECO-94). Instruments and Observing Methods Report No. 57 (WMO/TD-No. 588). Geneva.

———, 1996: *WMO International Radiosonde Comparison – Phase IV, Tsukuba (Japan), 1993: Final Report* (S. Yagi, A. Mita and N. Inoue). Instruments and Observing Methods Report No. 59 (WMO/TD-No. 742). Geneva.

———, 2005: Studying the accuracy of AFAR-based radar sounding system (A. Ivanov and V. Tseitlin). Paper and posters presented at the WMO Technical Conference on Meteorological and Environmental Instruments and Methods of Observation (TECO-2005). Instruments and Observing Methods Report No. 82 (WMO/TD-No. 1265). Geneva.

———, 2006*a*: *WMO Intercomparison of GPS Radiosondes – Alcântara (Brazil), 2001* (R. da Silveira, G.F. Fisch, L.A.T. Machado, A.M. Dall'Antonia, L.F. Sapucci, D. Fernandes, R. Marques and J. Nash). Instruments and Observing Methods Report No. 90 (WMO/TD-No. 1314). Geneva.

———, 2006*b*: *WMO Intercomparison of Radiosonde Systems – Vacoas (Mauritius), 2005* (J. Nash, R. Smout, T. Oakley, B. Pathack and S. Kurnosenko). Instruments and Observing Methods Report No. 83 (WMO/TD-No. 1303). Geneva.

———, 2008: Suggestions for upgrading the pilot balloon network in West Africa and elsewhere in the tropics (M. Douglas, J. Mejia, R. Orozco and J. Murillo). Paper and poster presented at the WMO Technical Conference on Meteorological and Environmental Instruments and Methods of Observation (TECO-2008). Instruments and Observing Methods Report No. 96 (WMO/TD-No. 1462). Geneva.

———, 2011*b*: *WMO Intercomparison of High Quality Radiosonde Systems – Yangjiang (China), 2010* (J. Nash, T. Oakley, H. Vömel and L. Wei). Instruments and Observing Methods Report No. 107 (WMO/TD-No. 1580). Geneva.

ГЛАВА 14. НАБЛЮДЕНИЯ ЗА ТЕКУЩЕЙ И ПРОШЕДШЕЙ ПОГОДОЙ; СОСТОЯНИЕ ПОВЕРХНОСТИ ЗЕМЛИ

14.1 ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

14.1.1 Определения

В практике наблюдений под термином «*погода*» подразумевают такие наблюдения за состоянием атмосферы и связанными с ним явлениями, которые первоначально не предназначались для количественных измерений. Эти наблюдения представляют собой качественное описание явлений, наблюдаемых в атмосфере или на поверхности Земли, таких как осадки (гидрометеоры, выпадающие в атмосфере), взвешенные или переносимые ветром частицы (гидрометеоры и литометеоры), другие специально обозначенные оптические явления (фотометеоры) или проявления атмосферного электричества (электрометеоры). Полное описание этих явлений приводится в публикации ВМО (WMO, 2017).

Гидрометеоры. Они состоят из жидких или твердых частиц воды и могут быть во взвешенном состоянии в воздухе, выпадать сквозь атмосферу, переноситься ветром с поверхности Земли или оседать на других объектах.

Литометеоры. Они состоят из скопления частиц, большинство из которых твердые и не содержат воды. Эти частицы могут находиться в воздухе во взвешенном состоянии или подниматься ветром с поверхности земли.

Фотометеоры. Оптическое явление, возникающее в результате отражения, преломления, дифракции или интерференции света, исходящего от Солнца или Луны.

Электрометеоры. Видимое или слышимое проявление атмосферного электричества.

Специальный класс явлений погоды представляют собой локализованные метеорологические явления. Определения таких явлений приведены в публикации ВМО (1992). Описание специфических явлений, таких как пыльные вихри и воронкообразные облака, приведено в 14.2.3.

В практике метеорологических наблюдений существуют два вида сообщений о погоде. *Текущая погода* (погода в срок наблюдения) — это описание метеорологических явлений, отмечавшихся во время срока наблюдения. *Прошедшая погода* — это описание важных явлений погоды, происходивших в предыдущий час, но не в срок наблюдения.

В настоящей главе описываются также методы наблюдения за непосредственно связанным с погодой состоянием поверхности земли. Под термином *состояние поверхности земли* подразумеваются условия поверхности Земли, сложившиеся в результате недавних климатических или погодных явлений, с точки зрения количества влаги или описания любых слоев твердых частиц, содержащих или не содержащих воду, покрывающих стандартную поверхность.

14.1.2 Единицы измерений и шкалы

На обслуживаемых персоналом станциях результаты наблюдений, определенных как погода в срок наблюдения, прошедшая погода и состояние поверхности земли, включаются в сводку наряду с количественными данными. Такие наблюдения стандартизованы в специальных таблицах, что позволяет наблюдателю выбирать соответствующий термин из большого количества описаний, составленных в соответствии с восприятием наблюдателя и изложенных в публикации ВМО (2011).

Начиная с 1990 г. внедрение автоматизированных метеорологических станций (АМС) привело к необходимости количественного описания функций, прежде выполнявшихся наблюдателями. Для того чтобы учесть различную степень сложности и эффективности автоматизированных метеорологических станций при наблюдениях за текущей и прошедшей погодой, в публикацию ВМО (2011) включены специальные инструкции по кодированию. В силу сложности предоставления данных о текущей и прошедшей погоде, связанной со сложностью систем наблюдений за текущей погодой, подобные данные должны предоставляться в виде значений в формате двоичного кода, поскольку с буквенно-цифровым форматом связано множество ограничений, возникающих в процессе предоставления полных данных[1].

14.1.3 Метеорологические требования

Погода в срок наблюдения и прошедшая погода, а также состояние поверхности земли — это, прежде всего, качественное описание метеорологических явлений, которое необходимо, главным образом, в связи с воздействием, которое они оказывают на деятельность человека и безопасность работы на транспорте, а также с учетом их значения для понимания и прогнозирования синоптических процессов. Соответствующим вопросам посвящены несколько глав настоящего Руководства. Количественное измерение осадков и наблюдения за облаками описаны в настоящем томе, главы 6 и 15 соответственно. Том III содержит описание специфических вопросов, касающихся авиационных и морских наблюдений, автоматизированных систем, радиолокаторов и явлений, связанных с атмосферным электричеством.

В данной главе наблюдения за погодой, представляющие интерес для определения погоды в срок наблюдения и прошедшей погоды, разделены на три категории, а именно: наблюдения за осадками (выпадающие гидрометеоры), наблюдения за мутностью атмосферы и аэрозолем (литометеоры и взвешенные или переносимые ветром гидрометеоры) и наблюдения за другими погодными явлениями (например, воронкообразные облака, шквалы и молнии). Жидкие осадки или туман, при котором на поверхностях образуется изморозь, включены в соответствующую категорию осадков и взвешенных гидрометеоров.

Другие явления, имеющие оптическую природу (фотометеоры) или электрометеоры, не являющиеся молниями, являются показателями определенного состояния атмосферы и могут включаться в текущие записи о последовательности наблюдаемых метеорологических явлений, которые ведутся на каждой станции. Однако они не имеют большого значения при определении погоды в срок наблюдения и прошедшей погоды, когда производится кодирование результатов стандартных метеорологических наблюдений, и включены в эту главу лишь для полноты картины.

14.1.4 Методы наблюдений

Единственную возможность получения информации обо всем многообразии характеристик погоды в настоящее время обеспечивают визуальные и слуховые наблюдения квалифицированного наблюдателя. Однако, учитывая высокую стоимость содержания большого штата подготовленных наблюдателей, ряд метеорологических служб расширяют использование автоматизированных наблюдательных систем на первичных сетях наблюдений, а также продолжают их использовать в дополнение к сетям станций, обслуживаемых персоналом для проведения автоматизированных наблюдений в удаленных районах.

Фундаментальные исследования (Беспалов и др., 1983) подтвердили возможность определения погодных явлений посредством логического анализа группы переменных

[1] В соответствии с рекомендацией 3 (КОС-XII) следует «предоставлять значения данных наблюдений, а не качественные параметры в отношении погоды в срок наблюдения в процессе наблюдений на автоматизированных станциях в форматах FM 94 BUFR и FM 95 CREX».

данных. В настоящее время не имеется ни одного датчика, который позволил бы классифицировать все типы погодных явлений в срок наблюдения; вместо этого используются данные, полученные с помощью разнообразных датчиков (например, о видимости, температуре, точке росы, скорости ветра, выпадении дождя или снега). Автоматизированные наблюдательные системы позволяют выполнять этот логический анализ, но их способность наблюдать определенное погодное явление различается в зависимости от приборного оснащения системы и степени сложности алгоритмов. Не располагая возможностью наблюдать все типы погодных явлений, автоматизированные системы наблюдают наиболее важные из них, что делает такие системы экономически эффективной альтернативой хорошо подготовленному наблюдателю.

14.2 НАБЛЮДЕНИЕ ЗА ТЕКУЩЕЙ И ПРОШЕДШЕЙ ПОГОДОЙ

Наблюдения, которые должны регистрироваться под заголовками «погода в срок наблюдения» и «прошедшая погода», включают следующие явления: осадки (дождь, морось, снег, ледяная крупа, снежные зерна, ледяная пыль и град), мутность атмосферы и аэрозоль (мгла, пыль, дымка, туман, поземок и низовая метель, пыльная и песчаная буря, пылевой смерч), воронкообразные облака, шквалы и молнии.

При наблюдениях за текущей погодой требуется фиксировать различные явления, происходящие на станции или в поле зрения станции в срок наблюдения. В синоптических сводках должны сообщаться условия погоды в течение прошедшего часа путем выбора соответствующей кодовой цифры в случае, если в срок наблюдения осадки отсутствуют.

14.2.1 Осадки

14.2.1.1 *Объекты наблюдения*

Характер выпадения осадков можно разделить на три типа: ливневые, моросящие и обложные осадки. Ливневыми являются такие осадки, которые связаны с отдельными конвективными облаками. Наблюдатели (или приборы, заменяющие человека) должны также классифицировать осадки по трем категориям интенсивности — слабые, умеренные и сильные — в соответствии с интенсивностью их выпадения или другими связанными с осадками факторами (например, видимостью).

Вид осадков (дождь, морось, снег, град) является третьей по важности наблюдаемой характеристикой осадков. При наблюдениях за дождем или моросью при низкой температуре следует различать, замерзают осадки или нет. По определению ледяной дождь или морось — это осадки, при контакте которых с твердыми объектами образуется гололед. Твердые осадки могут существовать в форме ледяных игл, снежных зерен, отдельных звездообразных снежных кристаллов, ледяной крупы и града; полное их описание дается в публикации ВМО (WMO, 2017).

Применяемая шкала *интенсивности осадков* зависит от характера выпадения (моросящие, обложные, ливневые) и вида (дождь, морось, снег, град) осадков. Несколько совместных совещаний групп экспертов КПМН/КОС разработали таблицы с целью определения более универсального соотношения между качественной интерпретацией и субъективным толкованием наблюдателя и измеренными значениями, полученными с помощью систем наблюдения за текущей погодой. Примеры подобных таблиц и других соотношений приведены в приложении.

14.2.1.2 *Приборы и измерительные устройства: виды осадков*

Одна из основных задач инструментального измерения состоит в определении вида осадков. Системы, которые в настоящее время исследуются и испытываются в целях оперативного использования, или уже используются, как правило, предусматривают

применение оптических методов, либо радиолокатора (Van der Meulen, 2003). Полевые испытания (WMO, 1998) показали, что все эти системы позволяют обнаружить основные типы и виды осадков (за исключением очень слабого снега или мороси) более чем в 90 % случаев в сравнении с квалифицированным наблюдателем. Вероятность обнаружения очень слабых осадков обычно гораздо ниже[2]. Для определения различия между несколькими видами осадков необходимы сложные алгоритмы. Например, мокрый или тающий снег трудно отличить от дождя. Информация с датчика, сообщающего о виде осадков, часто подвергается последующей обработке для оптимизации результатов (см., например, WMO, 2002, 2010; Bloemink, 2004). В настоящее время датчики, сообщающие о виде осадков, не предоставляют информацию о качестве или неопределенности отсчета. Там, где имеется несколько возможных выходных данных, все они должны быть представлены в виде распределения вероятностей, поскольку эта информация будет очень ценной, особенно во время последующей обработки. Датчики, определяющие вид осадков, перечислены ниже. Результаты полевых оценок нескольких из этих датчиков представлены, например, в публикациях De Haij (2007) и WMO (2008, 2010, 2016).

Датчик прямого/обратного рассеяния для наблюдения за текущей погодой

Для предоставления информации о текущей погоде, в частности, вида осадков, используются разнообразные датчики рассеяния. Как правило, рассеяние светового потока от источника света частицами осадков наблюдается под фиксированным углом, что дает информацию о размере частиц. Дополнительные измерения (например, соотношение прямого/обратного рассеяния, содержание влаги в частицах, скорость падения, температура) помогают определить природу частиц. Например, крупные частицы с малым содержанием влаги будут классифицироваться как снег. Некоторые датчики сообщают о неидентифицированных осадках в том случае, когда система не может достоверно определить тип осадков. Это происходит, главным образом, при осадках низкой интенсивности и во время начала и прекращения выпадения осадков. Кроме определения вида осадков с помощью этих датчиков можно (в зависимости от типа датчика) также получать данные об интенсивности и продолжительности осадков (выявляя таким образом моросящие осадки), а также о видимости.

Такие датчики широко используются и, как правило, дают приемлемые результаты в отношении обычных видов осадков (дождь, снег) с вероятностью обнаружения 70–90 % (WMO, 1994,1998, Wauben,2002), в зависимости от точной настройки теста и конкретного прибора. Другие виды осадков не так хорошо поддаются наблюдениям, особенно смешанные осадки (дождь и снег) и град. Пороговые значения для незначительных осадков могут варьироваться.

Оптический измеритель дождевых капель (дисдрометр)

Оптические измерители дождевых капель также используются для определения вида осадков. В этих приборах используется ослабление горизонтальной (ИК) развертки светового потока для обнаружения гидрометеоров. При прохождении частиц через развертку светового потока интенсивность получаемого приемником излучения уменьшается. Степень этого уменьшения коррелирует с размером частиц, а продолжительность коррелирует со скоростью выпадения частиц. Вид осадков определяется путем сравнения распределения скорости падения частиц в серии обнаруженных частиц с известными соотношениями для различных видов жидких, смешанных и твердых осадков.

Эти датчики, как правило, дают приемлемые результаты для обычных видов осадков. Вероятность обнаружения (идентификации) видов осадков датчиками рассеяния близка к вероятности их определения наблюдателем (WMO, 2005*a, 2010*). Смешанные осадки и град также трудно поддаются определению.

[2] Порог для определения интенсивности дождя составляет 0,02 мм·ч$^{-1}$ (см. настоящий том, глава 1, приложение 1.A).

Новым методом измерения, связанным с гидрометрами, являются так называемые 2D- и 3D-видеодискрометры, которые также захватывают проецируемые изображения гидрометеоров. Эти приборы в настоящее время разрабатываются или используются в исследовательских целях. Примерами являются 2D-видеодискрометр (Schönhuber et al., 2007), видеодатчик осадков (Liu et al., 2014) и многоугольная камера снежинок (Praz et al., 2017).

Доплеровский радиолокатор

Специальные доплеровские радиолокаторы также могут использоваться для определения видов осадков. Излучаемый радиолокатором луч (в вертикальном направлении) рассеивается падающими гидрометеорами. Скорость падения частиц может быть определена на основе доплеровского смещения сигнала обратного рассеяния. Около поверхности Земли эти конечные скорости падения частиц коррелируют с размером частиц. Некоторые приборы определения видов осадков измеряют значения непосредственно над датчиком, другие определяют скорости падения на различных высотах над датчиком. Также выполняются дополнительные измерения (например температуры подстилающей поверхности).

Имеются различные типы доплеровских радиолокаторов для определения типов осадков. Они часто нечувствительны к частицам малых размеров, также как и все технологии определения, основанные на использовании радиолокаторов. Некоторые типы радиолокаторов показывают результаты, сравнимые с результатами, полученными при использовании датчиков прямого/обратного рассеяния и измерителей дождевых капель, т. е. хорошие результаты для дождя и для снега, но не для смешанных осадков. Град не наблюдается.

Детектор динамического воздействия

Этот тип датчика основан на использовании пьезоэлектрического материала, который имеет свойство реагировать на механическое воздействие индивидуальных гидрометеоров. По характеру воздействию град и дождь достаточно различаются, что позволяет определить эти два вида осадков. О других видах осадков информация не предоставляется (WMO, 2005*b*).

В связи с тем, что информация может предоставляться только о дожде и граде, этот датчик не находит широкого применения для определения текущей погоды, но для определения града он может быть полезен для некоторых пользователей, поскольку определение града, как правило, является слабым местом других датчиков определения текущей погоды.

Акустический детектор

Акустический детектор реагирует на звуковые колебания, возникающие в результате падения осадков на какую-либо поверхность, что позволяет определить вид осадков. Датчик был разработан в качестве дополнения к датчикам прямого/обратного рассеяния для определения текущей погоды, в частности для улучшения определения града и ледяной крупы.

Первые результаты в отношении данного датчика обнадеживают (Wade, 2003; Loeffler-Mang, 2009).

Другие методы

Для мониторинга вида осадков могут также использоваться видеокамеры. Наблюдатель/оператор может осуществлять мониторинг данных с нескольких видеокамер на центральном пульте. Для того чтобы осуществлять наблюдения за осадками следует

выбрать сотрудника с соответствующими базовыми знаниями. Поскольку данный тип измерений требует присутствия наблюдателя/оператора, он не является полностью автоматическим средством определения текущей/прошедшей погоды.

В настоящее время находит применение датчик, в котором имеется колеблющийся чувствительный элемент, специально разработанный для распознавания ледяного дождя или гололеда (Starr and van Cauwenberghe, 1991). Он позволяет измерить количество льда, накопившегося на нем. Чувствительный элемент колеблется с частотой, пропорциональной его массе. Когда лед намерзает на этом элементе, масса последнего изменяется, и частота колебаний уменьшается. В датчик встроен обогреватель для очистки элемента ото льда, когда это необходимо. Этот датчик также оказался эффективным для определения мокрого снега.

Датчик, который использует различия в картинах сцинтилляции, когда частицы проходят через когерентный световой луч, способен различать дождь и снег (United States National Oceanic and Atmospheric Administration (US NOAA), 1998). Детекторы льда могут использоваться для определения замерзающих осадков. Существуют различные методы. Например, может быть измерена масса льда на рейке. При другом методе используется зонд, который подвергается вибрации на ультразвуковой частоте, которая изменяется с образованием льда на нем. Недавно был проведен широкий ряд тестовых измерений (Fikke et al., 2007). Данные, поступающие с датчиков текущей погоды, корректируются с помощью данных, полученных от детекторов льда, особенно о ледяном дожде (Sheppard and Joe, 2000). Данная технология используется в автоматических метеорологических системах наблюдений (АМСН).

Информация о граде и другая продукция о виде осадков также может быть получена с помощью метеорологических радиолокационных измерений (см. том III, глава *7* настоящего Руководства).

14.2.1.3 *Приборы и измерительные устройства: интенсивность и характер осадков*

Предоставление информации о текущей погоде включает данные об интенсивности осадков и, соответственно, о характере выпадения осадков (ливни, ливневые, моросящие и обложные осадки). Во многих случаях эти параметры измеряются при помощи датчика, который определяет вид осадков, но с этой целью также можно использовать и другой датчик. Измерение интенсивности также позволяет определить прерывистые осадки (например, ливневый снег). Недавно было завершено лабораторное и полевое взаимное сравнение приборов для определения интенсивности осадков (WMO, 2006*a*, 2009). Это взаимное сравнение включало в себя большое количество различных приборов с использованием целого ряда методов определения собранных осадков. Методы автоматического измерения для предоставления информации об интенсивности осадков перечислены ниже.

Датчик прямого/обратного рассеяния для наблюдения за текущей погодой

Данный датчик описан в 14.2.1.2. Интенсивность осадков рассчитывается при помощи комбинирования данных о распределении размеров частиц, количестве частиц и форме осадков. Интенсивность осадков, определенная таким образом, обычно является менее точной, чем интенсивность, определенная с использованием традиционных методов (например, весовые дождемеры, дождемеры с опрокидывающимся приемником). Калибровка интенсивности осадков также является проблемой. Для предоставления приближенных данных об интенсивности осадков (слабые, сильные и тому подобное) этот метод пригоден. Производители работают над улучшением результатов в отношении интенсивности осадков.

Оптический измеритель дождевых капель (дисдрометр)

Данный датчик также описан в 14.2.1.2. Интенсивность осадков рассчитывается при помощи комбинирования данных о распределении размеров частиц, количестве частиц и виде осадков. Для улучшения результатов определения интенсивности осадков также проводится работа (см., например, WMO, 2006*b*).

Доплеровский радиолокатор

Данный датчик описан в 14.2.1.2. Интенсивность осадков рассчитывается при помощи комбинирования сведений о распределении размеров частиц, количестве частиц и виде осадков. Полученные в результате данные об интенсивности осадков хорошо коррелируют (ρ = 0,9) с традиционными дождемерами, если рассматривать 30-минутные интервалы (см. Peters et al., 2002).

Дождемеры

Существует множество различных типов «традиционных» дождемеров. Они основаны на нескольких различных методах измерений, которые изложены в настоящем томе, глава 6. Они, как правило, разработаны для того, чтобы измерять количество осадков, хотя некоторые (меньшие по размеру) приборы разработаны специально для того, чтобы давать также и данные (информацию) об интенсивности осадков. Данные, полученные с помощью дождемеров, разработанных для измерения количества осадков, менее точны в определении интенсивности осадков. Однако информация об интенсивности осадков, которая требуется для предоставления данных о текущей погоде, как правило, является удовлетворительной. Многие производители совершенствуют эти приборы также в отношении определения интенсивности осадков (WMO, 2006*a*, 2009).

14.2.1.4 *Приборы и измерительные устройства: подход, предполагающий использование многих датчиков*

Для определения характеристик текущей погоды и осадков в системах наблюдений используется набор датчиков в комбинации с алгоритмами. Подход, предполагающий использование многих датчиков, создает ограничение на используемые методы. Стандартные наблюдения также используются для измерения осадков, видимости, температуры воздуха, точки росы и нижней границы облаков. Алгоритмы характеризуются фильтрацией (например, в случае, если температура воздуха выше 6 °C, то только жидкие осадки). Сочетание многих датчиков для определения текущей погоды также используется в информационных системах о погоде на дорогах (см. также 14.3).

14.2.2 Мутность атмосферы и аэрозоль

14.2.2.1 *Объекты наблюдения*

В сводках, сообщающих об атмосферных условиях в течение прошедшего часа, должно приводиться различие между мглой, дымкой или жидко-капельным туманом. При мгле воздух является относительно сухим, тогда как при дымке или жидко-капельном тумане влажность обычно велика, что проявляется в выпадении, например, капелек воды или изморози на траве и листьях. Если станция оборудована измерительными приборами, то с достаточной надежностью можно предположить, что причиной мутности атмосферы является мгла при относительной влажности не более определенного значения (например, 80 %), а видимость находится в определенных пределах (например, горизонтальная — меньше 1 км и вертикальная — меньше 2 км). О дымке сообщается при высоких значениях влажности и при видимости 1 км и более. В синоптических сводках сообщается о тумане, под которым может подразумеваться жидко-капельный или кристаллический туман, когда горизонтальная видимость у поверхности Земли

уменьшается до значений менее 1 км. Всякий раз, когда в закодированных сводках погоды в срок наблюдения и прошедшей погоды фигурирует термин «туман», его следует понимать именно в этом смысле. Однако в климатологических обобщениях все случаи уменьшения видимости до значений менее 1 км рассматриваются как туман.

Отложение изморози происходит в результате превращения в лед водяных капелек, присутствующих в тумане, при контакте с твердыми предметами, находящимися при температуре ниже точки замерзания. При кодировании погоды в срок наблюдения и прошедшей погоды не приводится различие между типами изморози.

Поземок или низовая метель — это снег, поднятый ветром в воздух после того, как он уже выпал на землю. В кодах для погоды в срок наблюдения приводится различие между поземкой и низовой метелью, причем первый относится к снегу, поднятому ветром до уровня, не превышающего уровень глаз наблюдателя.

К другим метеорологическим явлениям, которые следует определять, относятся простирающаяся над обширным районом взвешенная в воздухе пыль; пыль или песок, поднятые ветром; пыльная или песчаная буря, вызванная турбулентными вихрями, поднимающими большое количество пыли или песка в воздух, которые значительно уменьшают видимость; пыльные или песчаные вихри и изредка воронкообразные облака.

Всем наблюдателям в качестве дополнительного средства следует использовать ВМО *International Cloud Atlas: Manual on the Observation of Clouds and Other Meteors* (WMO, 2017).

14.2.2.2 ***Приборы и измерительные устройства для определения характеристик мутности атмосферы и аэрозоля***

Возможным подходом к определению характеристик мутности атмосферы и аэрозоля является комплексная обработка значений измеренных величин, которые могут использоваться в качестве предсказателей. Такой подход требует исследований значений метеорологических величин при формировании, развитии и окончании данного явления, а также определения граничных условий. Проблема идентификации тумана, дымки, мглы, метели и пыльной бури рассматривалась в ряде публикаций Госкомгидромета (1984) и ВМО (WMO,1985). Метеорологическая дальность видимости представляет собой наиболее важный элемент индикации. Из остальных параметров важными критериями идентификации являются скорость ветра, влажность воздуха, температура и точка росы.

Приборы для измерения видимости могут быть использованы для определения диапазона метеорологической дальности видимости, как это изложено в настоящем томе, глава 9, в частности в 9.3. Однако следует отметить, что для определения тумана, дымки и мглы предел измерения этих приборов может быть ограничен до нескольких километров. Три типа приборов измерения видимости, используемых для определения тумана, дымки и мглы, описаны ниже.

Трансмиссиометр

Трансмиссиометры измеряют ослабление луча света из источника на известном расстоянии. Обычно свет импульсной лампы определяется на расстоянии от 10 до 200 м. Видимость рассчитывается по ослаблению света. Для того, чтобы увеличить дальность действия можно использовать два детектора на разных расстояниях (так называемый трансмиссиометр с двойной базовой линией). Трансмиссиометры хорошо подходят для измерения видимости и широко используются, в частности, в аэропортах. Точность их измерения уменьшается с увеличением значений видимости (более детально изложено в настоящем томе, глава 9, 9.3). Их установка, а также эксплуатация являются относительно дорогими, поскольку они требуют регулярного обслуживания. Некоторые трансмиссиометры способны сохранять свою эксплуатационную точность гораздо дольше благодаря автоматической калибровке и автоматической компенсации эффектов загрязнения.

Датчик прямого рассеяния

Датчик описан в 14.2.1.2. Вне зависимости от формы осадков видимость также может быть измерена с использованием этого прибора (см. настоящий том, глава 9, 9.3). Степень рассеяния зависит от оптического затухания, которое определяется эмпирически в процессе калибровки путем сравнения результатов с показаниями трансмиссиометра. Датчики прямого рассеяния также хорошо подходят для измерения видимости и используются все шире. По сравнению с трансмиссиометром датчик прямого рассеяния может в общем использоваться для большего диапазона видимости. Их недостатком является то, что их калибровка не является тривиальной и требует внимания. Установка, а также эксплуатация прибора являются относительно недорогими, поскольку они не требуют такого частого обслуживания, как трансмиссиометры. Для некоторых датчиков периодичность обслуживания может быть еще реже благодаря автоматической компенсации оптического воздействия загрязнения.

Лидар

Относительно небольшие системы лидаров могут также использоваться для определения видимости, используемой для идентификации тумана. Диодный лазер испускает пульсирующие пучки света, при этом измеряется свет, отраженный обратно частицами тумана/мглы (если они присутствуют). Видимость определяется исходя из интенсивности отраженного света и времени его отражения. Дальность видимости, которую можно измерить при помощи лидара, ограничена, но при определении тумана, мглы и подобных явлений большая дальность видимости не требуется.

14.2.3 Другие погодные явления

14.2.3.1 *Объекты наблюдения*

Распознавание смерчей (наземные смерчи, воронки холодного воздуха, торнадо или водяные смерчи) и наблюдение за ними является чрезвычайно важным для защиты жизни людей и имущества.

Смерч. Природное явление, обычно представляющее собой очень сильные вихри, проявляющиеся в виде облачного столба или перевернутого облачного конуса (воронкообразное облако), выступающего из нижней части кучево-дождевого облака или кучевого облака, и «бороды», состоящей из капель воды, поднятых с поверхности моря, или пыли, песка или мусора, поднятого с поверхности земли. Диаметр может изменяться от нескольких метров до нескольких сот метров. Воронкообразное облако считается сформировавшимся, если очень сильно вращающийся столб воздуха касается поверхности суши или воды. Полностью сформировавшимся воронкообразным облаком считается торнадо над поверхностью суши и водяной смерч над поверхностью воды. Наиболее сильные торнадо могут иметь соответствующую скорость ветра до 150 м·с$^{-1}$.

Пыльные/песчаные вихри (пылевые смерчи). Ансамбль частиц пыли или песка, иногда сопровождаемый мелким мусором, поднятый с земли в виде вихревого столба различной высоты с небольшим диаметром и приблизительно вертикальной осью. Диаметр пыльных и песчаных вихрей составляет всего несколько метров. Обычно по высоте они не достигают более 60–90 м (пылевой смерч). Полностью сформировавшиеся пыльные/песчаные вихри в очень жарких пустынных регионах могут достигать 600 м.

Шквал. Неожиданное резкое усиление ветра, продолжающееся в течение нескольких минут, а затем его затухание. Шквалы часто связаны с прохождением холодных фронтов. В таких случаях они возникают один за другим и обычно сопровождаются

резким понижением температуры, сменой направления ветра, повышением относительной влажности и образованием облака шквалового ворота с горизонтальной осью (фронтальный шквал).

Определение грозы (см. ВМО, 1992) является примером отхода от описания исключительно на основе восприятия человека-наблюдателя. Явление следует считать грозой, когда слышен гром (даже если не наблюдается молния).

14.2.3.2 *Приборы и измерительные устройства*

Воронкообразные облака, или торнадо, можно часто обнаружить с помощью метеорологического радиолокатора (см. том III, глава 7 настоящего Руководства). Современные доплеровские метеорологические радиолокаторы являются весьма эффективным средством обнаружения мезомасштабных циклонов, предоставляя более детальную информацию об этом опасном метеорологическом явлении с большей заблаговременностью, чем позволяют визуальные наблюдения.

Шквалы могут быть обнаружены на основе последовательных дискретных измерений скорости ветра. Если сигналы устройства, измеряющего скорость ветра, рассматривать совместно с сигналами датчиков направления ветра, температуры и влажности, то представляется возможным определить фронтальный шквал.

Грозы обнаруживаются, главным образом, с помощью использования счетчиков молний. Инструкции для наблюдателей, выпускаемые различными службами, предписывают подсчитывать число вспышек молнии за определенный интервал времени, что в сочетании с данными о количестве осадков или скорости ветра позволяет определить слабые, умеренные или сильные грозы (см. том III, глава 6 настоящего Руководства).

14.2.4 Состояние неба

14.2.4.1 *Объекты наблюдения*

Основные данные о состоянии неба используются для описания изменения состояния неба за определенный период времени. При этом должны учитываться изменения общего количества облаков, высоты нижней границы облаков и типа облачности.

14.2.4.2 *Приборы и измерительные устройства*

Характеристики количества облаков (общий облачный покров в октантах (баллах), высота нижней границы облаков и общий облачный покров на разных ярусах) могут быть определены на основе колебания высоты нижней границы облаков, измеренной с помощью оптической измерительной системы с применением статистических методов (см. также настоящий том, глава 15). Очевидно, что этот метод ограничен облачными слоями, находящимися в пределах вертикального диапазона системы измерения высоты нижней границы облаков (Персин, 1987; US NOAA, 1988; ZAMG, 1999).

14.3 НАБЛЮДЕНИЕ ЗА СОСТОЯНИЕМ ПОВЕРХНОСТИ ЗЕМЛИ

14.3.1 Объекты наблюдения

Состояние поверхности земли относится к условиям, в которых находилась поверхность после недавних метеорологических явлений, с точки зрения количества влаги или твердых, содержащих или не содержащих воду частиц, покрывающих

естественную поверхность. Наблюдения за состоянием поверхности земли (буквенные обозначения E и E') должны проводиться в соответствии с требованиями, содержащимися в публикации ВМО (2011).

Предоставление информации о состоянии поверхности земли также является частью сводок о текущей погоде, и до недавнего времени обеспечивалось только наблюдателями. Автоматические измерения состояния поверхности земли все еще являются относительно новыми (см., например, Stacheder et al., 2008) и используются не очень широко. Некоторые метеорологические институты работают над стандартизацией наблюдаемой(ых) поверхности(ей).

14.3.2 **Приборы и измерительные устройства**

Исследования показали, что имеется возможность различать основные состояния почвы (сухая, влажная, увлажненная, покрытая снегом, изморозью или льдом), используя явления отражения и рассеяния (Gaumet et al., 1991). Используемые методы кратко описаны ниже.

Датчик рассеяния. Эти датчики имеют оптическую конструкцию, при которой используются отражательные и рассеивающие свойства поверхности. Могут использоваться различные источники света. Например, поток белого света, отраженный от соответствующей керамической поверхности, будет зависеть от состояния этой поверхности. Другие (дорожные) датчики анализируют отражение ИК-излучения от поверхности дороги. В данном случае длина волны отраженного света зависит от состояния поверхности. Не все эти датчики подходят для метеорологических целей, поскольку они могут быть разработаны для поверхностей, отличающихся от естественных. Датчики в настоящее время совершенствуются.

Емкостной датчик. В настоящее время разрабатывается и тестируется новый емкостной датчик. Опорная плита с соединительными печатными проводниками располагается на (естественной) поверхности. По существу, это конденсатор с использованием поверхности земли в качестве диэлектрика. Диэлектрическая постоянная для сухой и влажной почвы отличаются значительно. Емкость, таким образом, зависит от влажности поверхности, а состояние поверхности земли может быть определено при помощи измерения абсолютных величин и фазы испускаемых сигналов на двух частотах. Первые результаты тестов выглядят обнадеживающими, но этот датчик все еще находится в стадии разработки.

Комбинация датчиков. Комбинация датчиков может использоваться для определения состояния поверхности, особенно для дорожного покрытия. Например, с помощью оптического обнаружения можно определять вид покрытия поверхности; с помощью изменения электропроводности можно определять наличие химических веществ, температуру поверхности и температуру грунта и т. д. Все эти измерения в комбинации с атмосферными данными могут использоваться для определения дорожных условий. Однако состояние поверхности земли определяется как состояние естественной поверхности, и, таким образом, данный метод определяет не точное состояние поверхности земли, а определенные свойства.

Видеокамеры (и наблюдатель). Видеокамеры также используются для определения состояния поверхности земли. Они могут быть установлены на различных поверхностях, и наблюдатель/оператор определяет состояние поверхности земли. Поскольку данный метод, по сути, не является автоматическим, он в данном Руководстве не анализируется.

14.4 НАБЛЮДЕНИЕ ЗА ОСОБЫМИ ЯВЛЕНИЯМИ

14.4.1 Электрические явления (электрометеоры)

Электрометеоры либо соответствуют прерывистым электрическим разрядам (молния, гром), либо представляют собой более или менее непрерывные явления (коронный разряд, полярное сияние). Полное описание электрометеоров содержится в публикации ВМО (WMO, 2017).

Специальные сводки о молниях должны включать информацию относительно типа, интенсивности, частоты вспышек, диапазона по азимуту, в котором наблюдаются разряды; следует отмечать промежутки времени между молнией и соответствующим ей громом. Необходимо быть внимательным, чтобы не принять отражение вспышки молнии облаками и туманом за настоящую вспышку молнии. Во многих странах в оперативной работе используются автоматические системы обнаружения и определения координат молнии. Более подробная информация по этой теме содержится в томе III, глава 6 настоящего Руководства.

Необычное полярное сияние следует описывать подробно. По возможности следует применять светофильтры как средство увеличения чувствительности приборов при наблюдениях, а для повышения точности угловых измерений можно использовать теодолиты и клинометры (алидады).

14.4.2 Оптические явления (фотометеоры)

Фотометеор — это световое явление, возникающее в результате отражения, рефракции, дифракции или интерференции света, исходящего от Солнца или Луны. Фотометеоры можно наблюдать в условиях более или менее прозрачной атмосферы (мираж, мерцание, сцинтилляция, зеленый луч, оттенки сумерек) на облаках или внутри облаков (гало, солнечная корона, иризация, глория) и на определенных гидрометеорах или литометеорах, а также внутри них (глория, радуга, белая радуга, кольца Бишопа, сумеречные лучи).

Наблюдатели должны внимательно фиксировать любые оптические явления. По возможности письменное описание следует сопровождать рисунками и фотографиями. Полное описание этих явлений приводится в публикации ВМО (WMO, 2017). В ряде руководств для наблюдателей дается краткая инструкция по наблюдениям за наиболее часто встречающимися явлениями, например, в публикации *United Kingdom Meteorological Office* (1982).

Для точных измерений наиболее подходящим прибором является теодолит. Однако, когда нет нужного прибора, можно использовать градуированный стержень, который следует держать на расстоянии вытянутой руки. Положение такого явления, как паргелий (ложное Солнце), можно установить по отношению к неподвижно закрепленным вехам. Диаметр короны определяют, принимая угловой диаметр Солнца или Луны приблизительно за полградуса.

ПРИЛОЖЕНИЕ. КРИТЕРИИ ДЛЯ ИНТЕНСИВНОСТИ СЛАБЫХ, УМЕРЕННЫХ И СИЛЬНЫХ ОСАДКОВ

Примечание: Рекомендовано совещанием Группы экспертов ВМО по автоматизации визуальных и субъективных наблюдений (Траппе/Париж, Франция, 14–16 мая 1997 г.) и Рабочей группы по приземным измерениям (Женева, Швейцария, 27–31 августа 2001 г.).

(Слабые, умеренные и сильные осадки определяются с учетом формы и интенсивности осадков, i)[a]

Переменная	*Диапазон*	*Интенсивность*
Морось	$i < 0{,}1$ мм·ч$^{-1}$	слабая
	$0{,}1 \le i < 0{,}5$ мм·ч$^{-1}$	умеренная
	$i \ge 0{,}5$ мм·ч$^{-1}$	сильная
Дождь (включая ливни)	$i < 2{,}5$ мм·ч$^{-1}$	слабая
	$2{,}5 \le i < 10{,}0$ мм·ч$^{-1}$	умеренная
	$10{,}0 \le i < 50{,}0$ мм·ч$^{-1}$	сильная
	$i \ge 50{,}0$ мм·ч$^{-1}$	очень сильная[b]
Снег (включая ливневый)	$i < 1{,}0$ мм·ч$^{-1}$ (водный эквивалент)	слабая
	$1{,}0 \le i < 5{,}0$ мм·ч$^{-1}$ (водный эквивалент)	умеренная
	$i \ge 5{,}0$ мм·ч$^{-1}$ (водный эквивалент)	сильная

Примечания:

[a] Значение интенсивности основаны на измерениях с интервалом 3 мин.

[b] Термин «очень сильная» не соответствует другим категориям и вносит путаницу, поскольку он относится к скорости выпадения осадков. Возможно, лучше подойдет термин «интенсивные осадки» или «экстремальные осадки».

Критерии для определения других видов осадков

Смешанные осадки в виде дождя со снегом

То же, что и для снега (поскольку отношение дождь/снег не поддается никакому измерению, следует просто сделать выбор).

Град: то же, что и для дождя.

Ледяная крупа и снежная крупа: то же, что и для снега.

Замерзающие явления: то же, что и для незамерзающих явлений.

Руководство для определения интенсивности снега

Слабая: снежные хлопья небольшого размера и разреженные; видимость, при отсутствии других ухудшающих ее явлений, обычно уменьшается, но составляет не менее 1000 м.

Умеренная: большее количество более крупных хлопьев, обычно видимость ухудшается до значений 400–1000 м.

Сильная: Многочисленные хлопья всех размеров, при которых значения видимости, как правило, не превышают 400 м.

Ливни или моросящие осадки с перерывами

Автоматизированные системы должны предоставлять информацию о ливнях или моросящих осадках. Осадки с перерывами могут быть определены в том случае, если осадки отсутствуют в течение 10 минут между двумя последовательными явлениями с осадками, т. е. если имеет место 10-минутный период отсутствия осадков при расчете 10-минутного скользящего среднего за последний час, следует сообщать об осадках с перерывами.

Репрезентативность явлений текущей погоды

Явление текущей погоды хорошо определяется за 3-минутный период наблюдений. В текущей погоде следует сообщать наибольшее значение скользящего 3-минутного среднего за 10-минутный период.

СПРАВОЧНАЯ И ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ЛИТЕРАТУРА

Всемирная метеорологическая организация, 1992: *Международный метеорологический словарь* (ВМО-№ 182). Женева.

———, 2011 (обновлено в 2017 г.): *Наставление по кодам* (ВМО-№ 306), том I.1. Женева.

Беспалов Д.П. и др., 1983: *Основные вопросы разработки сетевой автоматической гидрометеорологической станции*. Труды ГГО, Гидрометеоиздат, Ленинград, вып. 473; с. 3-12.

Госкомгидромет, 1984: *Определение атмосферных явлений по данным автоматических станций. Совещание группы экспертов СМ5/М5 социалистических стран по теме 9.1 КК ОМЗ/М3* (Определение атмосферных явлений по данным с автоматических метеорологических станций). Обнинск, 24–28 августа 1984 г. Москва.

Персин С.М., 1987: *Измерение высоты нижней границы облаков и характеристика облачности как задача распознавания образов*. Труды ГГО, вып. 512, Ленинград, Гидрометеоиздат, с. 49-91.

Bloemink, H.I., 2004: Precipitation type detection, Present Weather Sensor: Final Report. KNMI TR259, De Bilt.

De Haij, M.J., 2007: Automated discrimination of precipitation type using the FD12P present weather sensor: evaluation and opportunities. KNMI TR297, De Bilt.

Fikke, S., G. Ronsten, A. Heimo, S. Kunz, M. Ostrozlik, P.E. Persson, J. Sabata, B. Wareing, B. Wichura, J. Chum, T. Laakso, K. Säntti and L. Makkonen, 2007: COST-727: Atmospheric Icing on Structures; Measurements and data collection on icing: State of the Art, MeteoSwiss, No. 75.

Gaumet, J.L., P. Salomon and R. Paillisse, 1991: Automatic observations of the state of the soil for meteorological applications. Preprints of the Seventh Symposium on Meteorological Observations and Instrumentation: Special Sessions on Laser Atmospheric Studies, American Meteorological Society (New Orleans, 14–18 January 1991), pp. J191–J193.

Liu, X.C., T.C. Gao and L. Liu, 2014: A video precipitation sensor for imaging and velocimetry of hydrometeors. Atmospheric Measurement Techniques, 7:2037–2046, doi:10.5194/amt-7-2037-2014.

Loeffler-Mang, M., 2009: HARE – A New Intelligent Hail Recorder for Networks and Field Campaigns. Fifth European Conference on Severe Storms, 12–16 October, Landshut, Germany, https://www.essl.org/ECSS/2009/preprints/P09-06-loefflermang.pdf.

Peters, G., B. Fischer and T. Andersson, 2002: Rain observations with a vertically looking Micro Rain Radar (MRR). Boreal Environment Research, 7:353–362.

Praz, C., Y.-A. Roulet and A. Berne, 2017: Solid hydrometeor classification and riming degree estimation from pictures collected with a Multi-Angle Snowflake Camera. Atmospheric Measurement Techniques, 10:1335–1357, doi:10.5194/amt-10-1335-2017.

Schönhuber, M., G. Lammer and W. L. Randeu, 2007: One decade of imaging precipitation measurement by 2D-video-distrometer. Advances in Geosciences, 10:85–90.

Sheppard, B.E. and P.I. Joe, 2000: Automated precipitation detection and typing in winter: a two-year study. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, 17(11):1493–1507.

Stacheder, M., F. Koeniger, R. Schuhmann, A. Brandelik, G. Schmitt, W. Sommer and R. Fiel, 2008: A new sensor for the automatic detection of the state of the ground. Near Surface Geophysics, 6(1):67–70.

Starr, K.M. and R. van Cauwenberghe, 1991: The development of a freezing rain sensor for automated surface observing systems. Preprints of the Seventh Symposium on Meteorological Observations and Instrumentation: Special Sessions on Laser Atmospheric Studies, American Meteorological Society (New Orleans, 13–18 January 1991), pp. 338–343.

United Kingdom Meteorological Office, 1982: Observer's Handbook. Her Majesty's Stationery Office, London.

United States National Oceanic and Atmospheric Administration (US NOAA), 1988: Federal Standard Algorithms for Automated Weather Observing Systems Used for Aviation Purposes. Office of the Federal Coordinator for Meteorological Services and Supporting Research, United States Department of Commerce, FCM-S5-1988, Washington DC.

United States National Oceanic and Atmospheric Administration (US NOAA), 1998: *Automated Surface Observing System (ASOS) User's Guide*. Department of Defense, Federal Aviation Administration, United States Navy, March 1998, https://www.weather.gov/media/asos/aum-toc.pdf.

Van der Meulen, J.P., 2003: Present Weather – Science: Exploratory Actions on Automatic Present Weather Observations. Final Report, E-PWS-SCI, KNMI, de Bilt, Netherlands, EUMETNET (available from http://www.knmi.nl/samenw/geoss/eumetnet/E-PWS-Sci/report/PWS-SCI_final_report.pdf).

Wade, C.G., 2003: Detecting ice pellets, snow pellets and hail on ASOS using an acoustic sensor. Twelfth AMS Symposium on Meteorological Observations and Instrumentation, Long Beach, CA, United States, 8–13 February 2003.

Wauben, W., 2002: Automation of visual observations at KNMI; (I) Comparison of present weather. Papers presented at the Symposium on Observations, Data Assimilation, and Probabilistic Prediction. Orlando, Florida, 13–17 January 2002, American Meteorological Society.

World Meteorological Organization, 1985: Algorithms for automatic coding of the present and past weather by unmanned meteorological stations (M. Mezösi, A. Simon, P. Hanák and O. Szenn). Paper presented at the Third WMO Technical Conference on Instruments and Methods of Observation (TECIMO-III) (Ottawa, 8–12 July 1985), Instruments and Observing Methods Report No. 22 (WMO/TD-No. 50). Geneva.

———, 1994: A comparison of two present weather systems with human observations (J.P. van der Meulen). Paper presented at the WMO Technical Conference on Instruments and Methods of Observation (TECO-94). Instruments and Observing Methods Report No. 57 (WMO/TD-No. 588). Geneva.

———, 1998: WMO Intercomparison of Present Weather Sensors/Systems: Final Report (Canada and France, 1993–1995) (M. Leroy, C. Bellevaux and J.P. Jacob). Instruments and Observing Methods Report No. 73 (WMO/TD-No. 887). Geneva.

———, 2002: Improvements to automated present weather reporting in the Met Office (S.G. McRobbie, M.J. Molyneux and P.D. Shearn). Paper presented at the WMO Technical Conference on Meteorological and Environmental Instruments and Methods of Observation (TECO-2002). Instruments and Observing Methods Report No. 75 (WMO/TD-No. 1123). Geneva.

———, 2005a: Precipitation type from the Thies disdrometer (H.I. Bloemink and E. Lanzinger). Paper presented at the WMO Technical Conference on Meteorological and Environmental Instruments and Methods of Observation (TECO-2005). Instruments and Observing Methods Report No. 82 (WMO/TD-No. 1265). Geneva.

———, 2005b: Piezoelectric precipitation sensor from Vaisala (A. Salmi and J. Ikonen). Paper presented at the WMO Technical Conference on Meteorological and Environmental Instruments and Methods of Observation (TECO-2005). Instruments and Observing Methods Report No. 82 (WMO/TD-No. 1265). Geneva.

———, 2006a: WMO Laboratory Intercomparison of Rainfall Intensity Gauges (France, Italy, The Netherlands, 2004–2005) (L.G. Lanza, M. Leroy, C. Alexandropoulos, L. Stagi and W. Wauben). Instruments and Observing Methods Report No. 84 (WMO/TD-No. 1304). Geneva.

———, 2006b: Rainfall amount and intensity measured by the Thies laser precipitation monitor (E. Lanzinger, M. Theel and H. Windolph). Paper presented at the WMO Technical Conference on Meteorological and Environmental Instruments and Methods of Observation (TECO-2006). Instruments and Observing Methods Report No. 94 (WMO/TD-No. 1354). Geneva.

———, 2008: Results from UK Met Office investigations into new technology present weather sensors (D. Lyth). Paper presented at the WMO Technical Conference on Meteorological and Environmental Instruments and Methods of Observation (TECO-2008). Instruments and Observing Methods Report No. 96 (WMO/TD-No. 1462). Geneva.

———, 2009: WMO Field Intercomparison of Rainfall Intensity Gauges (Italy, 2007–2009) (E. Vuerich, C. Monesi, L.G. Lanza, L. Stagi and E. Lanzinger). Instruments and Observing Methods Report No. 99 (WMO/TD-No. 1504). Geneva.

———, 2010: Investigations into the improvement of automated precipitation type observations at KNMI (M. de Haij and W. Wauben). Paper presented at the WMO Technical Conference on Meteorological and Environmental Instruments and Methods of Observation (TECO-2010). Instruments and Observing Methods Report No. 104 (WMO/TD-No. 1546). Geneva.

———, 2016: Field evaluation of sensors for precipitation type discrimination (W. Wauben, T. Mathijssen and C. Oudshoorn). Paper presented at the WMO Technical Conference on Meteorological and Environmental Instruments and Methods of Observation (TECO-2016) (Madrid, 27–30 September 2016). Instruments and Observing Methods Report No. 125. Geneva.

———, 2017: *International Cloud Atlas: Manual on the Observation of Clouds and Other Meteors* (WMO-No. 407). Geneva.

Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik (ZAMG), 1999: Present weather sensors and manual observations: Conference proceedings session 3. Second International Conference on Experiences with Automatic Weather Stations, ICEAWS-1999, (Vienna, 27–29 September). Österreichische Beiträge zu Meteorologie und Geophysik, No. 20 (available on CD-ROM only), ZAMG, Vienna.

ГЛАВА 15. НАБЛЮДЕНИЯ И ИЗМЕРЕНИЕ ОБЛАКОВ

15.1 ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

Проведение наблюдений или измерение облаков и высоты их нижней границы над земной поверхностью важны для решения самых разнообразных задач, и в частности, находят применение в авиации и оперативной метеорологической практике. Важным приложением для наблюдения или измерения облачности в дневное время является прогнозирование солнечной энергии для фотоэлектрических систем. В этой главе описываются широко распространенные методы. Важная дополнительная информация представлена в *Международном атласе облаков* (WMO, 2017), который содержит научные описания облаков и иллюстрации, используемые при определении форм облаков. Информация по практикам, применяемым в авиационной метеорологии, приведена в *Руководстве по системам метеорологических наблюдений и распространения информации для метеорологического обслуживания авиации* (ВМО, 2014).

15.1.1 Определения

Облако. Различимая с места проведения наблюдений совокупность мельчайших капель воды, кристаллов льда или того и другого вместе, нижняя граница которой находится над поверхностью Земли. Предельный диаметр жидких частиц составляет порядка 200 мкм; более крупные капли представляют собой морось или дождь.

За исключением некоторых редких типов (например, перламутровые или серебристые облака) и случайного появления перистых облаков в нижней стратосфере, облака не выходят за пределы тропосферы. Как правило, они образуются в результате конденсации водяного пара на ядрах конденсации в атмосфере. Образование облака происходит во время вертикального движения воздуха, при конвекции, при вынужденном подъеме над возвышенностью или при широкомасштабном вертикальном движении, связанном с депрессиями и фронтами. Облака могут образовываться при определенных значениях вертикального градиента температуры и влажности в результате турбулентности нижних слоев атмосферы и других менее значимых причин. Такие виды деятельности человека, как авиация или промышленность, также могут привести к образованию облаков путем увеличения ядер конденсации в атмосфере.

При температурах ниже 0 °C облачные частицы зачастую состоят полностью из капель воды, переохлажденных приблизительно до –10 °C в случае слоистых облаков и приблизительно до –25 °C в случае конвективных облаков. При температурах ниже этих весьма приблизительных предельных значений и выше примерно –40 °C множество облаков являются «смешанными» с преобладанием ледяных кристаллов в нижней части указанного диапазона температур.

Количество облаков. Часть неба, по оценкам, покрытая облаками определенного типа (частичное количество облаков) или облаками всех типов (общее количество облаков). В любом случае оценка производится с точностью до ближайшего октанта (восьмая часть) и сообщается в масштабе, который по существу является одним из ближайших значений восьмой части, за исключением того, что цифры 0 и 8 на шкале обозначают совершенно чистое или полностью покрытое облаками небо, соответственно с последующей корректировкой на соседние интервалы 1 и 7 октантов (см. 15.1.4.1).

Нижняя граница облаков. Самая нижняя зона, в которой ухудшение видимости, соответствующее изменению состояния атмосферного воздуха от чистого воздуха или дымки до водяных капель или кристаллов льда, вызывает существенные изменения в профилях обратного рассеяния и коэффициентах угасания. В воздухе

непосредственно под облачностью для частиц, вызывающих помутнение, характерна некоторая спектральная избирательность, в то время как в самом облаке избирательности фактически не наблюдается; различие обусловливается наличием капель разного размера. Высота нижней границы облаков определяется как высота над уровнем земной поверхности. Для авиационных метеорологических станций уровень земли (поверхности) определяется как официальная высота аэродрома над уровнем моря.

Тип облака (классификация). Применяются следующие различные методы классификации облаков:

a) В публикации WMO (2017) вся совокупность облаков подразделяется на десять основных характерных форм облака с дальнейшим подразделением, в случае необходимости, на:

   i) виды облаков (форма и структура облака);

   ii) разновидности облаков (расположение облака и его прозрачность);

   iii) дополнительные характерные особенности и разновидности облаков (например, incus, mamma, virga, praecipitatio, arcus, tuba, pileus, velum и pannus);

   iv) развитие нового вида облака из материнского облака обозначается с помощью добавления «genitus» к названию нового облака и рода материнского облака в том случае, если небольшая часть материнского облака претерпевает изменения, а в тех случаях, когда все облако или значительная его часть изменяются, к названию прибавляется «mutatus» (например, stratocumulus cumulogenitus или stratus stratocumulomutatus);

   v) особые облака, которые формируются или растут в результате определенных, часто локализованных, генерирующих факторов, имеющих как природное происхождение, так и являющихся результатом деятельности человека (например облака, образованные лесными пожарами и извержениями вулканов, образованные водопадами облака и конденсационные следы от самолета);

b) Классификация производится с точки зрения яруса – верхнего, среднего или нижнего, на котором обычно встречаются различные виды облаков. В регионах умеренных широт предельные значения приблизительно следующие: верхний ярус, 6–12 км (20 000–40 000 футов); средний ярус, от поверхности земли до 6 км (0–20 000 футов); нижний ярус, от поверхности до 1,5 км (0–5 000 футов). Облака верхнего яруса — Cirrus, Cirrocumulus и Cirrostratus; среднего яруса — Altocumulus и Altostratus (последние часто распространяются выше), а также Nimbostratus (обычно распространяются как выше, так и ниже); к облакам нижнего яруса относятся Stratocumulus, Stratus, Cumulus и Cumulonimbus (последние два вида нередко также достигают среднего и верхнего ярусов).

   В синоптических целях была разработана девятикодовая классификация облаков по каждому из трех обозначенных ярусов облаков, где соответствующие коды обозначаются как C_H, C_M и C_L в указанном порядке. Целью этой классификации является описание характерного состояния неба, а не отдельных видов облаков;

c) существуют также следующие менее формализованные классификации:

   i) на основе физических процессов образования облаков, в частности, кучевые облака и слоистые облака (или «расслоенные облака»);

   ii) на основе состава облаков, а именно облаков из кристаллов льда, облаков из капель воды и смешанных облаков.

Фотографии большей части этих форм облаков представлены в публикации ВМО (WMO, 2017).

Вертикальная видимость. Максимальное расстояние, на котором наблюдатель может видеть и распознавать объект, расположенный на одной вертикали с собой, выше или ниже. Вертикальная видимость может быть рассчитана на основании измеренного профиля ослабления $\sigma(h)$. Однако это соотношение является менее простым, чем для расчета горизонтальной видимости, т. к. σ может не рассматриваться как постоянная величина. Тем не менее, может применяться правило $I(h = VV)/I_0 = 5\%$. Принимая во внимание это предположение, вертикальная видимость может быть выражена по отношению к $\sigma(h)$, где VV представлена непрерывно, то есть:

$$\int_{h=0}^{h=VV} \sigma(h)\,dh = -\ln(5\,\%) \approx 3 \qquad (15.1)$$

См. также уравнения 2.6 и 2.7 в томе III, глава 2 настоящего Руководства.

15.1.2 Единицы и шкалы

В качестве единицы измерения высоты облаков используется метр или, например для некоторых аэронавигационных применений, фут. Единицей измерения количества облаков является октант, т. е. одна восьмая часть небосвода, покрытая облаками. В коде BUFR FM 94 (WMO, 2011) общий облачный покров указан в процентах (113 указывает на небо, закрытое туманом и/или другими метеорологическими явлениями).

15.1.3 Метеорологические требования

Для метеорологических целей необходимы наблюдения за количеством, формой и высотой нижней границы облаков. Для проведения наблюдений в синоптических целях в публикации ВМО (2011) приведены конкретные требования по кодированию, предназначенные для оптимального описания состояния облаков от поверхности до верхних уровней. Из космического пространства проводятся наблюдения за количеством облаков и температурой (на основании чего производится расчет высоты верхней границы облака). Измерения из космоса также могут быть использованы для наблюдения за развитием облачности и погоды.

Требования к неопределенности изложены в настоящем томе, глава 1, приложение 1.A.

15.1.4 Методы наблюдения и измерения

15.1.4.1 *Количество облаков*

Традиционно измерение количества облаков проводится посредством визуального наблюдения. Инструментальные методы в настоящее время широко приняты и используются в оперативной практике для многих применений при определении количества и высоты облаков. Определяется количество облаков в каждом конкретном слое и общее количество облаков, обозримое с пункта наблюдения.

Общее количество облаков, или общая облачность, определяется как часть небосвода, покрытая всеми видимыми облаками. Следовательно, оценка общего количества облаков состоит в оценке того, какая часть общей видимой площади небосвода покрыта облаками.

Частичное количество облаков представляет собой часть площади небосвода, покрытую облаками одного вида или слоем облаков, как если бы это был единственный тип облачности на небе. Сумма частичного количества облаков может превышать как общее количество облаков, так и восемь октантов.

Для записи количества облаков используется шкала, предлагаемая в кодовой таблице 2700 публикации ВМО (2011), которая приводится ниже:

Кодовая цифра	*Значение*	
0	0	0
1	1 октант или менее, но не 0	1/10 или менее, но не 0
2	2 октанта	2/10–3/10
3	3 октанта	4/10
4	4 октанта	5/10
5	5 октантов	6/10
6	6 октантов	7/10–8/10
7	7 октантов или более, но не 8 октантов	9/10 или более, но не 10/10
8	8 октантов	10/10
9	Небо не видно из-за тумана и/или других метеорологических явлений	
/	Облачный покров неразличим по причинам, не связанным с наличием тумана или другими метеорологическими явлениями, либо наблюдение не производилось	

15.1.4.2 ***Высота нижней границы облаков***

Высота нижней границы облаков может определяться посредством инструментального измерения, которое сейчас широко используется там, где высота облачности имеет большое оперативное значение. Однако оценка высоты нижней границы облаков, производимая наблюдателем, по-прежнему остается широко применяемой.

В данной главе описаны несколько типов приборов, которые в настоящее время используются в оперативной практике. Международное сравнение нескольких типов приборов проводилось ВМО в 1986 г., и его результаты изложены в публикации WMO (1988). В этой публикации содержится полный отчет о точности измерений и рабочих характеристиках приборов.

Недавние исследования (WMO, 2016*a* и 2016*b*) показывают улучшенные характеристики современных облакомеров для определения высоты нижней границы облаков для очень низких облаков, очень высоких облаков и во время выпадения осадков. Однако исследования выявили систематические различия величиной от 30 до 50 метров в показаниях облакомеров от разных производителей. Поскольку формы профилей и расположение градиентов и максимумов в результатах измерения обратного рассеяния весьма схожи, по-видимому, источником этих различий являются алгоритмы обнаружения облаков, реализованные производителями облакомеров. Применяемый алгоритм может разместить нижнюю границу облака либо на высоте, где обратное рассеяние начинает значительно увеличиваться, либо несколько выше при проникновении вглубь облака, либо на высоте максимального сигнала обратного рассеяния. В настоящее время различные подходы не могут быть верифицированы из-за отсутствия установленного и поддающегося количественной оценке определения нижней границы облака и отсутствия подходящего эталона. Для обеспечения правильной работы облакомера в настоящее время изучается сопоставление высоты нижней границы облаков, измеренной облакомером, с измерениями видимости на различных высотах на мачте, а также с высотой башни, которую можно различить на изображении, полученном с помощью фотокамеры.

Инструментальное измерение высоты нижней границы облаков применяется в обычной практике и имеет большое значение для авиационных метеорологических служб. Этот вопрос дополнительно рассматривается в томе III, глава 2 настоящего Руководства.

15.1.4.3 *Тип облаков*

В настоящее время единственным методом наблюдений за большинством форм облаков является визуальное наблюдение. Иллюстрированные руководства и информация по кодированию доступны в многочисленных источниках, таких как публикации ВМО (WMO 2011, 2017), а также в публикациях НМГС.

Извлечение типа облака из изображений камеры все еще находится в стадии разработки (см., например Heinle et al., 2010; Liu et al., 2011).

Некоторые метеорологические службы используют информацию о молниях, информацию от метеорологических радаров и спутниковую информацию для идентификации кучево-дождевых облаков и высоких кучевых облаков и включения, когда это возможно, информации о них в автоматизированные авиационные сводки погоды.

15.2 ОЦЕНКА И НАБЛЮДЕНИЯ ЗА КОЛИЧЕСТВОМ И ВИДАМИ ОБЛАКОВ, ВЫСОТОЙ НИЖНЕЙ ГРАНИЦЫ ОБЛАКОВ, ОСУЩЕСТВЛЯЕМЫЕ НАБЛЮДАТЕЛЕМ

15.2.1 Проведение эффективной оценки

Место, используемое при оценке переменных характеристик облачности, должно обеспечивать максимально широкий обзор небосвода. Это место должно быть удалено от постоянного источника освещения, который может повлиять на наблюдения в темное время суток. При проведении наблюдений в темное время суток большое значение для наблюдателя имеет достаточный период времени, необходимый для привыкания глаз к темноте.

Естественно, что при оценке количества облаков существуют определенные трудности, особенно в темное время суток. Последовательные наблюдения за развитием облачности и общие представления о ее структуре помогают наблюдателю достичь наилучших возможных результатов. Доступ к сводкам с самолетов, если таковые имеются, также может быть полезен.

15.2.2 Оценка количества облаков

Наблюдатель должен в равной мере изучить участки как над пунктом наблюдения, так и на более низких углах возвышения. В тех случаях, когда облака беспорядочно разбросаны, целесообразно представить небо в форме отдельных квадрантов, разделенных диаметрами, проведенными под прямым углом друг к другу. Сумма оценок для каждого квадранта принимается как общая для всего неба.

Кодовая цифра 9 используется в тех случаях, когда небо закрыто туманом, падающим снегом и тому подобным, либо когда наблюдатель не может дать оценку количества облаков вследствие темноты или постороннего освещения. В безлунные ночи обычно представляется возможным дать оценку общего количества облаков, определив, в какой части неба звезды затуманены или полностью закрыты облаками, хотя у линии горизонта звезды может скрывать дымка.

Наблюдатель также должен давать оценку частичному количеству облаков. Случается, например, что более высокий слой облаков частично закрыт более низкими облаками. В таких случаях оценка протяженности вышележащих облаков может быть произведена

довольно уверенно при наблюдении за небом в течение короткого периода времени в дневное время. Движение более низкого облака относительно более высокого позволяет выяснить, покрывает ли более высокий слой небо полностью или наблюдаются разрывы.

Следует отметить, что оценка количества каждого отдельного типа облаков производится независимо от оценки общего количества облаков. Сумма отдельных оценок частичного количества облаков часто превышает как общее количество облаков, так и восемь октантов.

15.2.3 **Оценка высоты нижней границы облаков**

На тех станциях, где измерительное оборудование отсутствует, может выводиться лишь оценочное значение высоты нижней границы облаков. В горной местности высота нижней границы любого облака, которая меньше высоты окружающих станцию гор, может быть оценена посредством сравнения с высотой характерных топографических особенностей, указанных на контурных картах района. Целесообразно иметь для постоянного отображения данных подробную схему высоты и местоположения холмов и наземных ориентиров, которые могут быть использованы при оценке высоты облаков. Из-за эффекта перспективы наблюдателю может казаться, что облако лежит на удаленных холмах, но это не обязательно означает, что таким образом можно определить высоту облаков над наблюдаемым участком. В любых обстоятельствах наблюдатель должен произвести надлежащую оценку, принимая во внимание формы и общий вид облаков.

Диапазоны высоты нижней границы облаков над поверхностью, применимые к различным родам облаков в регионах умеренной зоны, представлены в таблице ниже и соответствуют станциям, высота которых не превышает 150 м (500 футов) над средним уровнем моря (СУМ). Для наблюдательных площадок на значительно больших высотах или для станций в горной местности высота нижней границы облаков нижнего яруса над станциями часто может быть меньше, чем указано в нижеприведенной таблице.

В других климатических зонах, особенно в засушливых тропических условиях, высота нижней границы облаков может значительно отклоняться от указанных диапазонов. Различия могут привести к возникновению проблем при классификации облаков и усложнить задачу по оценке их высоты. Так, например, обстоит дело в случае, когда сводки о тропических кучевых облаках явно конвективного происхождения с высотой нижней границы значительно более 2 400 м (8 000 футов) или даже 3 600 м (12 000 футов) были подтверждены наблюдениями с самолета. Следует отметить, что в таких случаях наземные наблюдатели часто в значительной степени недооценивают высоту облаков. Такая недооценка может быть обусловлена двумя факторами, а именно: наблюдатель исходит из того, что кучевое облако является облаком нижнего яруса с высотой нижней границы менее 2000 м (6500 футов), или, как правило, менее 1500 м (5000 футов), либо атмосферные условия и форма облака в сочетании дают оптическую иллюзию.

В тех случаях, когда непосредственная оценка высоты нижней границы облаков производится в ночное время, результаты в значительной степени зависят от правильной идентификации формы облаков. Общие метеорологические знания и тщательное наблюдение за погодой играют очень важную роль, когда наблюдатель должен сделать заключение о том, осталась ли нижняя граница облака в значительной степени на прежней высоте, поднялась или опустилась. Особая тщательность и профессиональные навыки требуются от наблюдателя, когда слой высокослоистых облаков закрывает небо в вечернее время. Любое постепенное снижение такого слоя облаков часто очень трудно обнаружить; при этом основание редко бывает однородным, а небольшие контрасты зачастую могут быть обнаружены в любое время, за исключением самых темных ночей.

Высота нижней границы различных облаков над уровнем земной поверхности в районах умеренных широт

Вид облаков	*Обычный диапазон высоты нижней границы*[a]		*Более широкий диапазон иногда наблюдаемых значений высоты нижней границы и прочие примечания*	
	метры	*футы*	*метры*	*футы*
Нижний ярус:				
Слоистые	Поверхность–600	Поверхность–2000	Поверхность–1200	Поверхность–4000
Слоисто-кучевые	300–1350	1000–4500	300–2 000	1000–6500
Кучевые	300–1500	1000–5000	300–2 000	1000–6500
Кучево-дождевые	600–1500	2000–5000	300–2 000	1000–6500
Средний ярус:	километры			
Слоисто-дождевые	Поверхность–3	Поверхность–10 000	Слоисто-дождевые облака считаются облаками среднего яруса для синоптических целей, хотя они могут распространяться на другие уровни	
Высоко-слоистые	2–6	6500–20 000	Увеличение толщины высокослоистых облаков по мере уменьшения высоты их нижней границы может привести к их трансформации в слоисто-дождевые облака	
Высоко-кучевые				
Верхний ярус:				
Перистые			При рассеивании кучево-дождевых облаков могут образовываться перистые облака на высоте значительно менее 6 км (20 000 футов) в зимнее время	
Перисто-слоистые	6–12	20 000–40 000	Перисто-слоистые облака могут трансформироваться в высокослоистые	
Перисто-кучевые				

Примечание:
a Для станций, расположенных на высоте более 150 м над уровнем моря, высота нижней границы облаков нижнего яруса часто бывает меньше указанной.

15.2.4 Наблюдение за видами облаков

Наблюдение за видами облаков в большинстве случаев проводятся наблюдателем. Иллюстрированные руководства и информация по кодам имеются в многочисленных источниках, таких как публикация ВМО (WMO,2017) и публикации НМГС.

15.3 ИНСТРУМЕНТАЛЬНОЕ ИЗМЕРЕНИЕ КОЛИЧЕСТВА ОБЛАКОВ

Существуют оперативные наземные датчики различного типа для измерения общего количества облаков. Измерения, производимые со спутниковых радиометров в видимом диапазоне, дополненные ИК изображениями, могут использоваться для оценки количества облаков над большими территориями, несмотря на то что зачастую возникают трудности, связанные, например, с невозможностью отличить слоистые облака нижнего яруса от тумана. Количество облаков нижнего яруса в радиусе действия электронного облакомера может определяться посредством измерения времени прохождения хорошо идентифицированных слоев и при условии, что эти осредненные во времени результаты являются репрезентативными для условий пространства, окружающего наблюдательную площадку. Этот метод в основном дает удовлетворительные результаты, но он может привести к значительным различиям в количестве облаков при визуальной оценке количества облаков из-за ограниченной пространственной репрезентативности области неба, измеряемой облакомером. В США для автоматических метеорологических станций (АМС) была разработана технология «объединения в кластеры» с использованием данных электронных облакомеров. Другие страны, например Швеция (Larsson and Esbjörn, 1995) и Нидерланды (Wauben, 2002), внедрили аналогичные технологии для проведения оперативных измерений. Автоматизированные измерения облаков с помощью облакомеров используются также в аэропортах несколькими метеорологическими службами. Этот метод использовался для получения информации об облаках в небольших аэропортах без наблюдателя, а также в более крупных аэропортах, где автоматизированная система обеспечивает экономически эффективный метод сбора информации.

Для измерения количества облаков используются и другие приборы: пирометры, которые могут производить замеры во множестве фиксированных направлений и/или просканировать небосвод, и камеры обзора небосвода, специально разработанные для этих целей. После соответствующей обработки такая информация также может быть получена от коммерческих систем камер, а также веб-камер, работающих в видимом и ИК диапазонах.

15.3.1 Измерение количества облаков с помощью лазерного облакомера

В некоторых метеорологических службах для определения количества облаков используются временные ряды данных о высоте нижней границы облаков, измеренной с помощью лазерных облакомеров (см. 15.4.1). Этот метод имеет некоторые преимущества по сравнению с наблюдениями, выполняемыми персоналом. При использовании лазерного облакомера получаются более надежные результаты. Кроме того, измерения могут проводиться чаще и без обычных проблем для темного времени суток. Однако имеются также некоторые недостатки и могут возникать существенные отклонения при наличии высоких тонких перистых облаков, когда эффективность работы облакомера снижается; когда слой повышенной влажности определяется облакомером как нижняя граница облаков; когда облакомер не обнаруживает нижней границы облаков или неправильно определяет ее высоту во время осадков или когда облакомер сообщает высоту нижней границы облаков по самому низкому значению при стелющемся тумане. Этот метод применим также к облакам, движущимся в поле обзора прибора. Облака не всегда движутся таким образом. Даже если облака движутся по всему полю видимости облакомера, они могут не присутствовать на всем небосводе. Таким образом, временные ряды данных о нижней границе облаков не всегда могут быть репрезентативными для всего неба, на котором базируются сводки об облачном покрове. Наибольшие различия могут быть обусловлены ограниченной пространственной репрезентативностью выборочного измерения облакомера лишь по небольшой площади неба непосредственно над местом его расположения. Совпадения (в пределах 2 октантов) между этим методом и неавтоматизированным наблюдением за общим количеством облаков, как правило, составляют 85–90%, как отмечается на прибрежных станциях в средних широтах (WMO, 2006*a*). На эти результаты влияет относительно большое количество облачных ситуаций (7 или 8 октантов отмечается примерно в 55 % случаев). Характерная разница между оценками общего количества облаков, полученными с помощью облакомера и визуальных

наблюдений, заключается в том, что облакомер с ограниченным обзором неба будет сообщать о 8 октантах гораздо чаще, чем о 7 октантах, в то время как наблюдатель может обнаружить пробелы в любом месте облачного покрова, что приводит к почти равным случаям наблюдения облачности в 7 и 8 октантов.

Некоторые аэропорты оборудованы несколькими облакомерами и применяют алгоритм оценки состояния неба с использованием данных, поступающих с более чем одного облакомера. Однако проведение оценки в аэропорту продемонстрировало лишь несущественные улучшения при использовании трех облакомеров по сравнению с использованием одного (Wauben, 2002). Это указывает на то, что мониторинг в трех точках вместо одной по-прежнему не является достаточным для получения репрезентативного значения по всему небосводу.

В качестве примера измерения количества облаков с помощью лазерных облакомеров в следующих параграфах описан метод, применяемый в автоматизированной системе приземных наблюдений (АСПН) Национальной метеорологической службы США.

Индикатор высоты облаков (лазерный облакомер — см. 15.4.1) обобщает выборки отраженных сигналов обратного рассеяния каждые 30 секунд и определяет высоту действительных «точек отражения» от облаков. Каждую минуту обрабатываются данные с дискретностью 30-секунд за последние 30 минут для получения удвоенной взвешенной величины за последние 10 мин с целью реагирования на недавно произошедшие изменения в состоянии неба. Затем данные сортируются по высотным «ячейкам».

Каждую минуту, в случае если зарегистрировано более пяти высотных ячеек (в течение последних 30 мин), значения высоты облаков группируются в слои с использованием статистической процедуры метода наименьших квадратов до тех пор, пока не останется всего пять ячеек (каждая ячейка может содержать большое количество точек отражения). Эти ячейки или кластеры затем распределяются по возрастанию от самого низкого до самого высокого значения высоты. После такой кластеризации система АСПН определяет, могут ли кластеры быть объединены и округлены, в зависимости от высоты, в значимые для решения метеорологических задач группы высот. Полученные ячейки, называемые теперь «слоями», с помощью алгоритма выбираются из не более чем трех этих слоев, и результат передается в коде METAR/SPECI в соответствии с национальными приоритетами передачи данных о слоях облачности.

Количество облачности определяется путем прибавления в каждый слой общего числа точек отражения и расчета соотношения данных совпадений к общему возможному. Если имеется более одного слоя, точки отражения в первом слое добавляются ко второму (и третьему) для получения общей картины облачности. В целях передачи данных количество облаков, измеренное с помощью системы АСПН для каждого слоя, затем конвертируется в статистическую функцию, эквивалентную данным, полученным с помощью проведения неавтоматизированного наблюдения.

Данный алгоритм также проверяет наличие облачности по всему небосводу, основываясь на критерии видимости нижних приземных слоев и высоком проценте «неизвестных точек отражения» в нижних слоях.

Алгоритм оценки состояния небосвода также был разработан для использования в тех случаях, когда формирование (или адвекция) облака обычно происходит в (или от) известном местоположении и приводит к значительной одновременной разнице в состоянии облачности над территорией аэропорта. Данный метеорологический изменяющийся алгоритм применяется для данных, полученных с двух сенсорных датчиков высоты облачности. Основной датчик устанавливается недалеко от зоны касания взлетно-посадочной полосы рядом с основным прибором. Второй датчик обычно устанавливается на расстоянии от 3 до 6 км (2–4 миль) от основного датчика против ветра в наиболее

вероятном направлении адвекции или ближе к постоянному источнику уникальных условий облачности. Второй датчик высоты облачности предназначен для оперативного определения значительных различий в состоянии облачности.

Дополнительные детали алгоритма оценки состояния облачности АСПН и его верификации предоставлены НУОА (NOAA, 1988) и правительством США (United States Government, 1999).

15.3.2 Измерение количества облаков с помощью инфракрасного детектора

Пирометры, или пассивные инфракрасные радиометры, по сути, представляют собой инфракрасные термометры дистанционного зондирования (8–14 мкм). Они могут использоваться для наблюдения элементарных телесных углов небосвода, используя для этих целей либо несколько фиксированных датчиков (например, четыре фиксированных датчика используются для осуществления выборки по всему небосводу) посредством сканирования всего небесного купола с помощью одного датчика, либо с помощью сочетания обоих методов (в конструкции одного из производителей предусмотрено 14 датчиков, охватывающих 180 градусов небосвода от одного горизонта до противоположного горизонта, и физический механизм для сканирования по азимуту). При этом измеряется нисходящее тепловое излучение от облаков и от воздушного столба между облаками и прибором, а температура каждого телесного угла, включенного в выборку, рассчитывается на основе сочетания законов Планка и Стефана–Больцмана. ИК температура затем может использоваться для указания на присутствие облаков в каждом включенном в выборку телесном углу. Далее можно получить общую долю небосвода, покрытую облаками, и представить ее в виде облачного покрова.

Сканирующие пирометры позволяют избежать проблем репрезентативности измерений, которые существуют в других методах, зависящих от количества исследуемых точек. Возможно также проведение измерений в темное время суток. Недостатком является трудность классификации фракционных и/или транспарантных «пикселей». Например, сканирующий пирометр, так называемый нубископ, может работать непрерывно для рутинных измерений общего количества облаков (WMO, 2010). Каждые 10 минут выполняется сканирование неба с разрешением 36 на 30 пикселей. Пирометр расположен на конце трубки, что делает его совершенно нечувствительным к загрязнению. Порог обнаружения облачности составляет около -65 °C, но зависит от загрязнения линзы объектива, вклада водяного пара в измеряемую яркостную температуру и оптической глубины облака. Нубископ обнаруживает облака, когда измеренная яркостная температура атмосферы превышает фоновое значение ясного неба. Яркостная температура ясного неба увеличивается с увеличением зенитных углов из-за увеличения наклонного пути через атмосферу и меняется со временем из-за изменения значений содержания в атмосфере водяного пара. Датчик динамически адаптируется к эталону чистого неба во время каждого сканирования, когда доступно достаточное количество безоблачных сцен на различных высотах. Boers et al. (2010) пришли к выводу, что для замены наблюдателя следует использовать метод наблюдения за облаками в масштабах полушария (такой как нубископ) вместо метода столбцов (такого как облакомер), чтобы избежать разрывов в функции распределения облачности климатических рядов данных.

Системы инфракрасных небесных камер с использованием неохлаждаемых микроболометрических детекторных решеток измеряют нисходящее атмосферное излучение в диапазоне длин волн 8–14 мкм. Так называемая инфракрасная система измерения облачности всего неба (Liu et al., 2013) объединяет несколько ИК изображений неба, чтобы каждые 15 минут получать изображение всего неба с разрешением 650 на 650 пикселей. Обработка ИК изображений облачности аналогична обработке сканирующего пирометра. Система использует профили температуры и относительной влажности в реальном времени, а также данные о горизонтальной видимости для оптимизации порога обнаружения нижней границы облачности. Кроме того, высокое пространственное разрешение позволяет определять тип облака, как и визуальная камера.

Пиргеометры измеряют нисходящее атмосферное длинноволновое излучение (4,5–100 мкм). Уровень длинноволнового излучения и его изменчивость могут быть использованы для оценки общего количества облаков (Dürr and Philipona, 2004).

15.3.3 Измерение количества облаков с помощью камеры обзора небосвода

Существуют камеры, которые специально разработаны для измерения количества облаков. С их помощью производятся наблюдения за небосводом, применяя, например, изогнутые зеркала. Изображение с камеры анализируется при помощи алгоритма, определяющего наличие облака в настоящее время в каждом пикселе, используя измеряемый цвет. Сумма всех пикселей определяет количество облаков. В прошлом специально разработанные визуализаторы неба использовались в дневное время только для оценки общего количества облаков. В настоящее время для этой цели могут использоваться камеры DSP IP (интернет-протокол цифровой обработки сигналов) или веб-камеры, в то время как камеры с инфракрасным ночным видением также дают полезные результаты в условиях низкой освещенности. Значительные успехи были достигнуты в разработке программного обеспечения, используемого для анализа изображений неба с целью определения не только количества, но и типа облаков (см. например, Wacker et al., 2015).

Этот метод позволяет избежать проблем репрезентативности измерений, которые могут присутствовать в некоторых других методах. Некоторые камеры используются в дневное время и, таким образом, не могут применяться в темное время суток. Камеры, производящие измерения в ИК-диапазоне, не имеют таких недостатков, но они обладают меньшим полем обзора и являются более дорогостоящими. Для таких камер необходимо часто проводить техническое обслуживание по очищению оптических поверхностей.

15.4 ИНСТРУМЕНТАЛЬНЫЕ ИЗМЕРЕНИЯ ВЫСОТЫ НИЖНЕЙ ГРАНИЦЫ ОБЛАКОВ

Для измерения высоты нижней границы облаков используется несколько методов. К ним относятся: использование лазерного облакомера, облакомера с вращающимся лучом, облачного прожектора и шара-зонда. Наиболее часто в настоящее время применяется метод измерения с помощью лазерного облакомера. Эта методика обладает огромными преимуществами по сравнению с другими технологиями, и в этой связи ее следует рассматривать как наиболее подходящую. Другие методы, такие как облачные радары и радиозонды, также дают информацию о высоте основания облаков, но эти системы не являются экономически эффективными, когда используются исключительно для этой цели.

Следует отметить, что, кроме того, информация о высоте нижней границы облаков получается с помощью пирометров и микроболометров, упомянутых выше, поскольку они измеряют температуру неба или нижней границы облака. На наблюдаемую температуру влияют влажность и аэрозоль, и для получения высоты нижней границы облаков требуется температурный профиль. Поэтому информация о высоте нижней границы облаков, получаемая инфракрасными детекторами, довольно скудна, особенно для малых высот.

Визуализаторы неба могут стереографически определять высоту нижней границы облаков, просматривая одно и то же облако с помощью двух визуализаторов. Для правильной работы метода должна быть возможность идентифицировать одну и ту же конкретную облачную функцию на обоих изображениях. Точность определения высоты нижней границы облаков зависит от геометрии, включающей в себя расстояние между визуализаторами неба и положение (ориентация) объекта на обоих изображениях.

15.4.1 Измерение высоты нижней границы облаков с помощью лазерного облакомера

15.4.1.1 *Метод измерения*

При использовании лазерного облакомера высота нижней границы облаков определяется посредством измерения времени, необходимого для прохождения светового импульса когерентного света от источника до нижней границы облаков и возвращения к приемнику (принцип: определение и локализация с помощью источника света, лидар). Сигнал, излучаемый лазером, направляется вертикально вверх, где, если облачность располагается над источником света, излучение рассеивается гидрометеорами, составляющими облачность. Основная доля излучения рассеивается вверх, но некоторая ее часть рассеивается вниз и фокусируется на фотоэлектрическом детекторе приемника. Лучевой поток, обратно рассеиваемый на приемник, уменьшается в зависимости от дальности в соответствии с законом обратных квадратов. Облакомер (рисунок 15.1) обычно состоит из двух узлов — приемо-передающий узел и блок записи.

Передатчик и приемник устанавливаются рядом в одном помещении с электронной аппаратурой по детектированию и обработке сигналов. Источником света обычно является полупроводниковый лазер с длиной волны, близкой к ИК диапазону. Оптические устройства передатчика располагаются таким образом, чтобы лазерный источник света и детектор приемника находились в фокусе обычной или ньютоновской телескопической системы. На поверхности линз наносится соответствующее покрытие толщиной в одну четверть длины волны с целью уменьшения отражения и обеспечения высокого уровня пропускания света. Апертура передатчика герметично закрывается стеклянным окошком, которое имеет антиотражательное покрытие на внутренней поверхности и устанавливается под углом для стекания дождевой воды.

Приемник имеет ту же конструкцию, что и передатчик, однако вместо источника света в него входит фотодиод, а также встроенный узкополосный оптический фильтр. Фильтр не пропускает большую часть фонового рассеянного солнечного излучения, облегчая, таким образом, обнаружение рассеянного лазерного излучения в светлое время суток.

Излучатель и приемник могут быть установлены рядом таким образом, чтобы пучок света излучателя и поле зрения приемника начинали совмещаться на высоте около 80 м над устройством и полностью совмещались на высоте нескольких сотен метров (см. например, WMO, 2016*c*). Обнаружение нижней границы облаков в слепой зоне ниже начала совмещения основывается на обратных сигналах от излученного импульса, которые

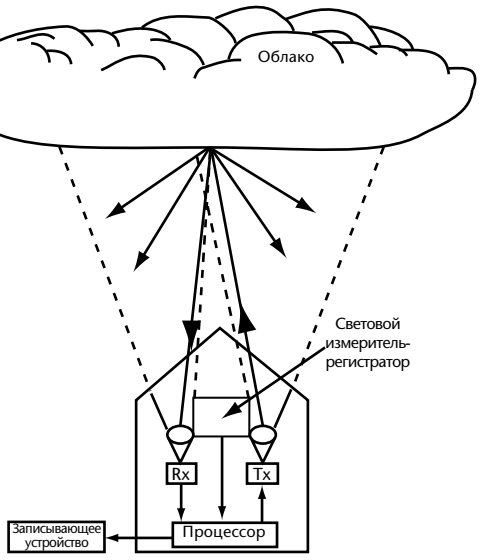


Рисунок 15.1. Типовой лазерный облакомер

были рассеяны по меньшей мере дважды. Такие же оптические устройства применяются в некоторых системах для передачи и получения излучения, что позволяет избежать этой проблемы.

Укрытие снабжается нагревателями во избежание конденсации на оптических поверхностях, а влажность внутри укрытия понижается посредством использования осушителя. Верхняя часть укрытия снабжена крышкой со встроенными оптическими отражателями, предохраняющими устройство от прямого солнечного излучения.

Выходной сигнал детектора разделяется на последовательные «строб-импульсы дальности», каждый из которых отображает минимально обнаруживаемое приращение высоты. В прибор вмонтировано пороговое устройство для сведения к минимуму вероятности того, что прибор не «увидит» облако или «увидит» несуществующее облако.

15.4.1.2 ***Размещение и установка***

Облакомер следует устанавливать в соответствии с рекомендациями производителя. Устройство должно быть установлено на прочном основании со свободным обзором над пунктом наблюдения в пределах конуса с углом приблизительно 30° к вертикали. При необходимости может использоваться площадка на крыше при условии соответствующей корректировки сообщаемых высот к уровню земной поверхности. Несмотря на то, что в оперативной практике конструкция лазерных облакомеров обеспечивает «безопасность для зрения», следует принимать меры к тому, чтобы случайный наблюдатель не смотрел непосредственно в излучаемый пучок света.

МЭК опубликовала свод международных стандартов по безопасности лазерной продукции (МЭК 60825:2018 SER), который также включает в себя классификационную схему в соответствии с безопасностью для глаз. В продаже имеются безопасные для глаз лазерные облакомеры, отвечающие требованиям лазерного устройства класса 1 или класса 1 M, как определено этим стандартом.

В некоторых местах необходимо наклонять прибор, чтобы солнце не попадало в поле зрения облакомера. С целью снижения воздействия сильно отражающихся дождевых капель пучок света и телескоп могут быть установлены под углом приблизительно 5° к вертикали.

15.4.1.3 ***Источники погрешностей***

Существуют пять основных источников погрешностей:

a) погрешности диапазона: такие погрешности возможны, если в цепях основного генератора синхронизации возникают неисправности, но при нормальной работе ошибки, вызванные этим источником, можно игнорировать;

b) вертикальность излучаемого/отраженного пучка света: в том случае, если прибор отъюстирован и отклонение луча от вертикали составляет не более 5°, погрешностями такого рода можно пренебречь;

c) погрешности, возникающие в системе обработки сигналов: в связи с тем, что обычно нижняя граница облаков весьма расплывчата и варьирует в значительной степени во времени и в пространстве, были разработаны сложные алгоритмы для оценки репрезентативных значений высоты нижней границы облаков по отраженному облаком сигналу. В условиях тумана (при наличии или отсутствии облачности над прибором), а также при выпадении осадков могут возникать серьезные ошибки. Следовательно, важно располагать информацией о видимости и осадках для того, чтобы оценить результаты, получаемые с помощью облакомера. В условиях характерной слоистой облачности (например, при наличии слоисто-кучевых

облаков) ошибки измерения проверяются исключительно посредством пороговых алгоритмов облачности и могут считаться приемлемыми для некоторой отдельно взятой конструкции облакомера;

d) диапазон измерений: ввиду ограниченной мощности лазера, отраженное излучение на больших высотах может быть настолько малой интенсивности, что его невозможно обнаружить. Поэтому не всегда можно наблюдать высоту нижней границы перистых облаков;

e) неправильное определение нижней границы облаков: это может быть вызвано шумом прибора. Аэрозольные и влажные слои атмосферы также могут приводить к неправильному определению нижней границы облаков. Пролетающие самолеты и птицы, нависающая растительность и снежные шапки на поверхности облакомера могут стать причиной ошибочных определений нижней границы облачности.

В оперативной практике в условиях однородной высоты нижней границы облаков результаты измерений лазерным облакомером можно сравнить с результатами шаропилотных измерений, измерениями видимости на различных высотах на мачте или высотой, на которой башня может быть различима на изображении с камеры, а также измерений с самолета и с помощью прожектора в ночное время.

Были проведены масштабные взаимные сравнения лазерных облакомеров от различных производителей. Так, во время проведения ВМО международного взаимного сравнения облакомеров (WMO, 1988) сравнивались несколько конструкций облакомеров, а также результаты наблюдений с помощью облакомеров с вращающимся лучом и шаров-пилотов. В результате международного взаимного сравнения было установлено, что при использовании современной технологии лазерный облакомер представляет собой наиболее точное, надежное и эффективное средство измерения высоты нижней границы облаков с земной поверхности по сравнению с альтернативным оборудованием.

15.4.1.4 ***Калибровка и техническое обслуживание***

Большинство лазерных облакомеров снабжены встроенной диагностикой, которая контролирует излучаемую выходную энергию и чувствительность детектора и предохраняет от серьезных погрешностей в синхронизации. Проверка калибровки обычно ограничивается проверкой частоты и стабильности основного генератора посредством использования высококачественных наружных стандартов частоты и проверкой выходной мощности излучателя. Калибровка может быть произведена также путем взаимного сравнения (WMO, 1988). Некоторые НМГС проводят полевые приемочные испытания для каждого потолочного измерителя, в ходе которых определение нижней границы облаков верифицируется с помощью надежного прибора. Наведение облакомера на цель на известном расстоянии (например, на башню) может использоваться для подтверждения измерения расстояния этим прибором. Текущее обслуживание обычно заключается в чистке открытых оптических приборов и наружных поверхностей и замене воздушных фильтров при наличии охлаждающего притока воздуха. Следует отметить, что облакомеры обычно анализируют световой импульс, отраженный окном обзора, для контроля его загрязнения. Генерируются предупреждающие и тревожные сообщения, которые предупреждают обслуживающий персонал о необходимости очистки прибора или о том, что чувствительность прибора по всему диапазону может быть снижена из-за загрязнения окна обзора.

Калибровочные проверки и плановое техническое обслуживание или устранение неполадок должны выполняться в соответствии с рекомендациями производителя. Большинство лазерных облакомеров имеют встроенную диагностическую возможность для выявления распространенных неисправностей. Рекомендуется, чтобы процедуры технического обслуживания или устранения неполадок выполнялись только персоналом, обученным надлежащим образом, так как могут присутствовать опасные напряжения, и лазер может привести к повреждению глаз при неправильном обращении. Облакомер, как правило, сконструирован таким образом, чтобы атмосферные осадки стекали

с окна обзора, и, кроме того, чтобы теплый воздух через регулярные промежутки времени обдувал окно обзора для удаления осадков и листьев. Как правило, помимо очистки поверхностей оптических устройств и замены пылевых фильтров вентилятора охлаждения, требуется небольшое техническое обслуживание. Во время технического обслуживания также следует удалять снежные шапки с поверхности облакомера и предметы или растительность над прибором. Во время осмотра следует убедиться в том, что над прибором нет или не будет нарастать снег или растительность, и что облакомер не находится непосредственно под траекторией захода на посадку или взлета самолета или под воздействием его выхлопных газов.

Калибровку дальности измерения можно проверить в полевых условиях путем сравнения с высотами облаков, полученными с использованием альтернативного метода. Если облака нет, можно направить прибор на твердую цель на известном расстоянии. Для этого может потребоваться расположить прибор на расстоянии нескольких сотен метров за пределами минимального диапазона действия облакомера. Необходимо соблюдать крайнюю осторожность, чтобы предотвратить случайное воздействие лазерного луча на людей, находящихся за пределами цели. Некоторые производители предоставляют облачный симулятор для проверки работы облакомера.

Современные облакомеры могут сделать доступными профили обратного рассеяния, из которых извлекается базовая информация об облаке. Эта информация полезна для проверки правильной работы прибора. Поэтому рекомендуется, по возможности, архивировать данные обратного рассеяния. Эти данные также могут быть использованы для устранения неполадок, обработки результатов с помощью оптимизированных алгоритмов обнаружения облаков и создания дополнительных продуктов, таких как высота слоя смешивания и обнаружение аэрозольных слоев. Кроме того, профиль обратного рассеяния в ситуации безоблачного неба может быть проанализирован для проверки коррекции зоны перекрытия и характеристик шума прибора, которые в противном случае могли бы привести к ошибочному обнаружению нижней границы облаков. Кроме того, два дополнительных метода калибровки могут быть использованы в подходящих условиях для сетей облакомеров с доступом к данным обратного рассеяния. К ним относятся: (a) так называемый метод Рэлея, основанный на отражении луча лидара от чисто молекулярных слоев, который наиболее подходит для облакомеров, использующих детектирование с подсчетом фотонов; (b) так называемый облачный метод, основанный на полном ослаблении лидарного сигнала в жидком облаке и наиболее подходящий для облакомеров с аналоговым методом обнаружения (см. WMO, 2016*d*).

15.4.2 Измерение высоты нижней границы облаков с помощью облакомера с вращающимся лучом

15.4.2.1 *Метод измерения*

Принцип действия облакомера с вращающимся лучом заключается в измерении угла возвышения светового пучка, осуществляющего сканирование в вертикальной плоскости, в тот момент, когда часть светового сигнала, рассеянного основанием облака, будет получена фотоэлектрическим элементом, направленным вертикально вверх и расположенным на известном расстоянии от источника света (см. рисунок 15.2). Прибор состоит из передатчика, приемника и записывающего устройства.

Передатчик испускает узкий пучок света, расходимость которого составляет 2°, при этом большая часть излучаемой радиации находится в ближней ИК области спектра длин волн, т. е. в диапазоне от 1 до 3 мкм. Таким образом, используемая длина волны незначительна по сравнению с размером водяных капель в облаке. Световой пучок сканирует облака в вертикальной плоскости по дуге, обычно охватывая диапазон от 8° до 85°, и модулируется на частоте приблизительно 1 кГц для того, чтобы с помощью методов фазочувствительного детектирования улучшить соотношение сигнал–шум в приемнике.

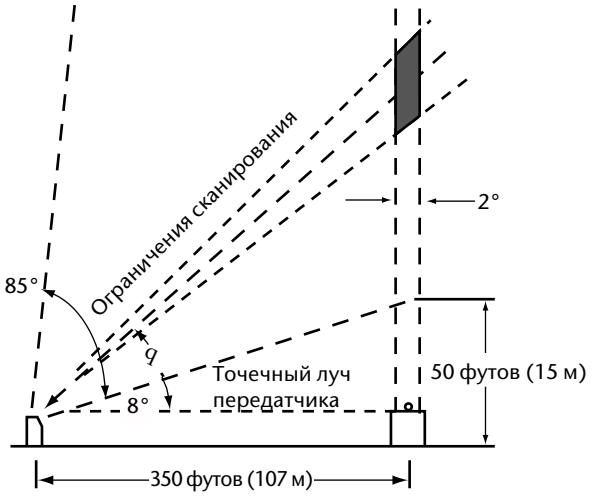


Рисунок 15.2. Типовой облакомер с вращающимся лучом

Приемник состоит из фотоэлемента и ограничителя угла зрения; ограничитель служит для того, чтобы на фотоэлемент могли попасть только вертикально направленные сверху лучи света. Перо записывающего устройства, движущееся одновременно с лучом передатчика, регистрирует получаемый от облака сигнал.

15.4.2.2 ***Размещение и установка***

Передатчик и приемник должны быть установлены на открытой ровной площадке на расстоянии 100–300 м друг от друга на прочных и устойчивых подставках. Особенно важно, чтобы источник света сканировал в той же плоскости, что и приемник. Это достигается посредством точной регулировки оптики и проверкой плоскости, соответствующей лучу передатчика, в подходящих условиях в темное время суток.

15.4.2.3 ***Источники погрешностей***

При измерении высоты нижней границы облака с помощью облакомера с вращающимся лучом могут быть допущены погрешности, обусловленные следующими факторами:

a) шириной светового пучка;

b) оптическим несовпадением;

c) механическими допусками движущихся деталей;

d) чувствительностью приемника.

Поскольку во многих конструкциях область пересечения конусов передатчика и приемника довольно значительна при высоте облаков более 500 м, то погрешности, связанные с шириной светового пучка, обычно являются наиболее серьезными. Определение нижней границы облаков, приводимое в 15.1.1, не представляет собой адекватную основу для объективной конструкции облакомеров, следовательно, используемые в настоящее время алгоритмы основаны на экспериментальных результатах и сравнениях с другими методами оценки. В одних облакомерах с вращающимся лучом используется «пороговый» метод определения наличия облачности, а в других — схема детектирования «пикового» сигнала. В некоторых случаях чувствительность приемника влияет на сообщаемую высоту облаков, вследствие чего возникают значительные

погрешности, превышающие при определенных обстоятельствах установленные эксплуатационные требования (Douglas and Offiler, 1978). Эти погрешности обычно возрастают с увеличением регистрируемой высоты.

Облакомеры с вращающимся лучом крайне чувствительны к наличию атмосферных осадков. В случае умеренных или сильных осадков прибор может ошибочно показать наличие облаков нижнего яруса или не сможет определить облака вообще. В условиях тумана пучок света может рассеяться на нижнем уровне, и облакомер не сможет дать какую-либо полезную информацию об облачности даже при наличии облаков нижнего яруса.

Проводились сравнения облакомеров с вращающимся лучом и лазерных облакомеров, и результаты таких сравнений широко освещались (WMO, 1988). Они показали значительное совпадение данных, полученных при помощи этих двух типов облакомеров на указанных высотах вплоть до 500 м, но при наличии атмосферных осадков эффективность детектирования с помощью облакомеров с вращающимся лучом заметно ниже.

15.4.2.4 *Калибровка и техническое обслуживание*

Единственный вид технического обслуживания, обычно проводимое пользователем, – это очистка окна обзора передатчика и приемника и замена ленты. Наружные поверхности пластиковых окон обзора передатчика и приемника следует чистить еженедельно. Необходимо использовать мягкую сухую ткань, при этом следует проявлять осторожность, чтобы не поцарапать окно обзора. При замене лампы передатчика следует произвести оптическую корректировку. Необходимо ежегодно проверять горизонтальность установки передатчика и приемника и, по мере необходимости, проводить корректировку.

15.4.3 Измерение высоты нижней границы облаков с помощью облачного прожектора

15.4.3.1 *Метод измерения*

При использовании этого метода, показанного на рисунке 15.3, угол возвышения E светового пятна на нижней границе облачности, полученного посредством вертикально направленного луча прожектора, измеряется с помощью алидады из удаленной точки. Пусть L — известное горизонтальное расстояние в метрах (футах) между прожектором и пунктом наблюдения, тогда высота h в метрах (футах) нижней границы облачности над пунктом наблюдения рассчитывается следующим образом:

$$h = L \tan E \tag{15.2}$$

Оптимальное расстояние между прожектором и пунктом наблюдения составляет приблизительно 300 м (1 000 футов). Если это расстояние будет значительно больше, то световое пятно может стать плохо различимым, при значительно меньшем расстоянии ухудшается точность измерения высоты более 600 м (2 000 футов). Расстояние, равное 250–550 м (800–1800 футов), обычно считается приемлемым.

15.4.3.2 *Размещение и установка*

Желательно, чтобы был свободный обзор между прожектором и алидадой, которые должны быть установлены на прочных, устойчивых подставках. При разнице в высоте над уровнем земной поверхности между прожектором и алидадой в расчетные высоты необходимо внести поправку. Если свободный обзор невозможен, то высота препятствия между лучом прожектора и алидадой не должна превышать 30 метров (100 футов).

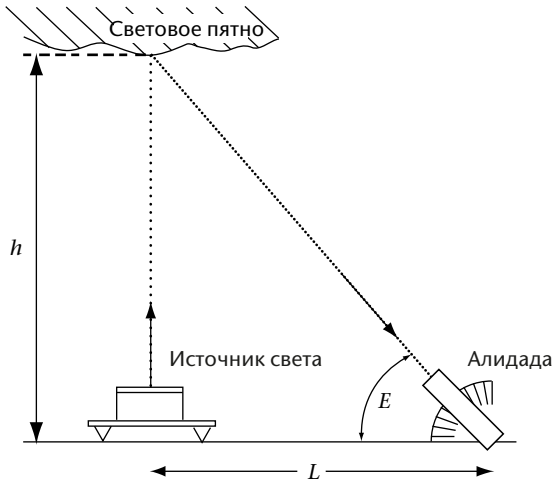


Рисунок 15.3. Принцип действия облачного прожектора

15.4.3.3 *Источники погрешностей*

Наиболее значительным источником погрешностей является неточность измерения угла возвышения. Погрешности высоты, связанные с небольшими отклонениями от вертикали, не имеют значения.

Абсолютная погрешность Δh в расчетном значении высоты облака, обусловленная погрешностью ΔE измеренного значении возвышения, рассчитывается следующим образом (предполагается, что L — точно измеренная постоянная):

$$\Delta h = L \cdot \left(1/\cos^2 E\right) \cdot \Delta E = L \sec^2 E \cdot \Delta E \tag{15.3}$$

где E приводится в радианах (1° = π /180 рад). Следует отметить, что Δh стремится к бесконечности при $E \rightarrow 90°$. Если L = 300 м (1 000 футов) и ΔE = 1°, то значение Δh = 6 м (17 футов) при h = 300 м (1 000 футов), а Δh приблизительно равно 140 м (450 футов) при h = 1500 м (5 000 футов). Относительная погрешность значения h рассчитывается следующим образом:

$$\Delta h/h = 1/\left(\sin E \cdot \cos E\right) \cdot \Delta E \tag{15.4}$$

где E приводится в радианах. Значение $\Delta h/h$ является минимальным при $E = 45°$ (или $h = L$).

15.4.3.4 *Калибровка и техническое обслуживание*

Фокусировку и вертикальность пучка света следует проверять, если возможно, примерно один раз в месяц, так как со временем могут произойти небольшие изменения формы нити накала лампы. При замене лампы следует произвести регулировку ее положения, так как не все лампы одинаковы.

Вертикальность пучка света следует проверять в облачную ночь с помощью теодолита. Проверку следует проводить из двух положений: из точки, находящейся вблизи алидады, и из другой точки, находящейся приблизительно на таком же расстоянии от прожектора под прямым углом к линии, соединяющей прожектор и алидаду (рисунок 15.4). Азимуты прожектора и светового пятна на облаке должны быть измерены с максимально возможной точностью, как и угол возвышения светового пятна. Если различие между азимутами обозначить буквой A, а угол возвышения светового пятна — E, то отклонение ϕ пучка света от вертикали выражается следующим образом:

$$\phi = \arctan\left(\tan A/\tan E\right) \approx A/\tan E \quad \left(\text{for } A \approx 1° \text{ or less}\right) \tag{15.5}$$

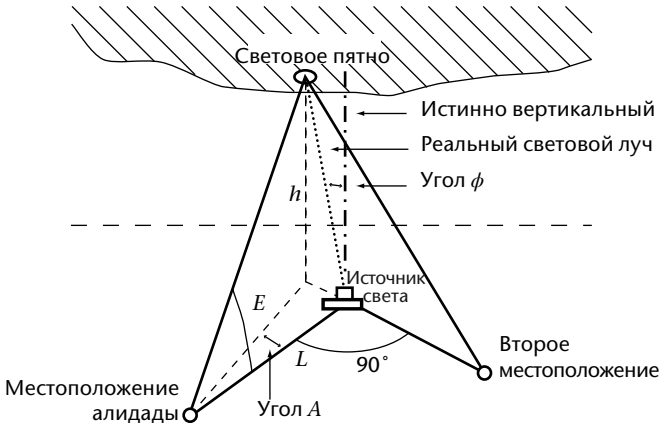


Рисунок 15.4. Проверка вертикальности светового луча прожектора

Если значение ϕ составляет более 1° при измерении из точки алидады или более 0,5° из другого положения, то следует продолжать регулировку до получения необходимой точности.

Фокусировку можно проверить и отрегулировать в облачную ночь, проводя наблюдения за диаметром светового пятна на самом высоком облаке над прибором. В случае необходимости фокусировку следует отрегулировать таким образом, чтобы свести к минимуму диаметр светового пятна.

15.4.4 Измерение высоты нижней границы облаков с помощью шара-пилота

15.4.4.1 *Метод измерения*

Высота облаков может быть измерена в светлое время суток путем определения времени, необходимого для того, чтобы небольшая резиновая оболочка, наполненная водородом или гелием, поднялась от земной поверхности до нижней границы облаков. За нижнюю границу облаков следует принять уровень, на котором шар-пилот начинает входить в слой дымки, прежде чем окончательно исчезнуть.

Скорость подъема шара-пилота в основном обусловлена его свободным подъемом и может регулироваться посредством осуществления контроля за количеством водорода или гелия в оболочке шара-пилота. Интервал времени между запуском шара-пилота и его входом в облако измеряется с помощью секундомера. Если скорость подъема равна n метров в минуту, а время движения составляет t минут, то высота нижней границы облаков над поверхностью земли равна $n \cdot t$ метров, но не всегда стоит неукоснительно следовать этому правилу. Вихревые потоки воздуха на месте запуска шара-пилота могут препятствовать его подъему в течение некоторого времени с момента его выпуска. Как правило, секундомер включается в момент выпуска шара и, следовательно, период времени между выпуском шара и отмеченным моментом его выхода из вихревого потока следует вычесть из общего времени, прежде чем определять высоту облачности. Даже если не принимать во внимание вихревые потоки, скорость подъема на самом низком участке, составляющем около 600 м (2 000 футов), является весьма непостоянной.

Несмотря на то, что высоту нижней границы облаков среднего яруса иногда получают в качестве сопутствующей информации при измерениях ветра на высотах с помощью шара-зонда, в основном метод измерения шаром-зондом подходит для облаков нижнего яруса. При отсутствии вспомогательных оптических приборов, таких как бинокль, телескоп или теодолит, не следует проводить измерения, если высота нижней границы облаков

предположительно превосходит 900 м (3 000 футов) даже при слабом ветре. При сильном ветре шар-зонд может выйти за пределы диапазона видимости невооруженным глазом до того, как он достигнет границы облачности.

Выпадение осадков замедляет скорость подъема шара-зонда, и измерения высоты облаков с помощью шара-пилота можно проводить только в условиях слабых осадков.

Этот метод может использоваться в ночное время, если шар-зонд снабжен электрическим освещением. В целях безопасности использование свечей в качестве источника света строго запрещено.

15.4.4.2 *Источники погрешности*

Результаты измерения высоты нижней границы облаков с помощью шара-зонда следует использовать с осторожностью, так как средняя скорость подъема шара-зонда, особенно на участке первых нескольких сот метров, может значительно отличаться от предполагаемой скорости подъема (вследствие влияния вертикальных потоков, формы шара-зонда, осадков и турбулентности).

15.5 ИНСТРУМЕНТАЛЬНОЕ ИЗМЕРЕНИЕ ФОРМ ОБЛАКОВ

Наблюдение за типами облаков по-прежнему проводится персоналом. Существует один используемый в оперативной практике автоматизированный метод наблюдения за формой облаков специально для определения кучево-дождевых и высоких кучевых облаков. В этом методе используются данные с сети радиолокаторов, измеряющих осадки, и сети обнаружения молний. Классы радиоотражательной способности и количество разрядов молнии в пределах определенного участка комбинируются для получения информации о присутствии кучево-дождевых и/или высоких кучевых облаков. Этот новый метод используется несколькими метеорологическими службами. Количество ложных тревог относительно высоко (см. WMO, 2006*b*). Некоторые службы используют спутниковые (визуальные и ИК-каналы) и модельную информацию для улучшения качества продукции, связанной с кучево-дождевыми и высокими кучевыми облаками.

В настоящее время разрабатывается метод определения формы облака с учетом нескольких статистических спектральных и текстурных особенностей изображения с камеры. Показатель успеха является многообещающим для однородных случаев (75–88 %), но ниже в случаях смешанных форм облаков (см. например, Heinle et al., 2010; Liu et al., 2011).

15.6 ДРУГИЕ ОСОБЕННОСТИ, СВЯЗАННЫЕ С ОБЛАКАМИ

15.6.1 Вертикальная видимость

Вертикальная видимость определяется как максимальное расстояние, на котором наблюдатель может различать предметы в вертикальном направлении. Вертикальная видимость может быть рассчитана, исходя из профиля ослабления атмосферы. Облакомеры (см. 15.4.1 и 15.4.2) могут предоставить оценочное значение вертикальной видимости на основе интегрированного профиля затухания с амплитудой (см. Уравнение 15.1). В публикации ВМО (WMO, 1988) показано, что при использовании данного метода нередко получаются недостоверные результаты. На практике данные о вертикальной видимости часто получают при использовании облакомера, когда требования к определению высоты нижней границы облаков не соблюдаются, но отраженный свет принимается с определенной высоты.

СПРАВОЧНАЯ И ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ЛИТЕРАТУРА

Всемирная метеорологическая организация, , 2011 (обновлено в 2017 г.): *Наставление по кодам* (ВМО-№ 306), том I.1. Женева.

———, 2014: *Руководство по системам метеорологических наблюдений и распространения информации для метеорологического обслуживания авиации* (ВМО-№ 731). Женева.

Boers, R., M.J. de Haij, W.M.F. Wauben, H.K. Baltink, L.H. van Ulft, M. Savenije and C.N. Long, 2010: Optimized fractional cloudiness determination from five ground-based remote sensing techniques. *Journal of Geophysical Research*, 115:D24116, doi:10.1029/2010JD014661.

Douglas, H.A. and D. Offiler, 1978: The Mk 3 cloud base recorder: A report on some of the potential accuracy limitations of this instrument. *Meteorological Magazine*, 107:23–32.

Dürr, B. and R. Philipona, 2004: Automatic cloud amount detection by surface longwave downward radiation measurements. *Journal of Geophysical Research*, 109:D5201, doi:10.1029/2003JD004182.

Heinle, A., A. Macke and A. Srivastav, 2010: Automatic cloud classification of whole sky images. *Atmospheric Measurement Techniques*, 3(3):557–567, doi:10.5194/amt-3-557-2010.

International Electrotechnical Commission, 2018: Safety of laser products – ALL PARTS. IEC 60825:2018 SER.

Larsson, B. and E. Esbjörn, 1995: *Cloud Cover Algorithm.* SMHI IO-BN 1995-01-11, SMHI, Norrköping, Sweden.

Liu, L., X.-J. Sun, F. Chen, S.-J. Zhao and T.-C. Gao, 2011: Cloud classification based on structure features of infrared images. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 28:410–417, doi:10.1175/2010JTECHA1385.1.

Liu, L., X.-J. Sun, T.-C. Gao and, S.-J. Zhao, 2013: Comparison of cloud properties from ground-based infrared cloud measurement and visual observations. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology,* 30:1171–1179, doi: 10.1175/JTECH-D-12-00157.1.

United States Government, 1999: *Automated Surface Observing System.* Air Force Operational Test and Evaluation Center: Final Assessment Report for the Federal Aviation Administration, California, United States.

United States National Oceanic and Atmospheric Administration (US NOAA), 1988: *Federal Standard Algorithms for Automated Weather Observing Systems Used for Aviation Purposes*. Office of the Federal Coordinator for Meteorological Services and Supporting Research, United States Department of Commerce, FCM-S5-1988, Silver Spring, MD, United States.

Wacker, S., J. Gröbner, C. Zysset, L. Diener, P. Tzoumanikas, A. Kazantzidis, L. Vuilleumier, R. Stöckli, S. Nyeki and N. Kämpfer, 2015: Cloud observations in Switzerland using hemispherical sky cameras. *Journal of Geophysical Research*, 120:A695–707, doi:10.1002/2014JD022643.

Wauben, W.M.F., 2002: Automation of visual observations at KNMI: (II) Comparison of automated cloud reports with routine visual observations. In: *Symposium on Observations, Data Assimilation and Probabilistic Prediction*. AMS Annual Meeting, 2002 Report, Orlando, FL, United States.

World Meteorological Organization, 1988: *WMO International Ceilometer Intercomparison* (D.W. Jones, M. Ouldridge and D.J. Painting). Instruments and Observing Methods Report No. 32 (WMO/TD-No. 217). Geneva.

———, 2006a: Status, evaluation and new developments of the automated cloud observations in the Netherlands (W. Wauben, H. Klein Baltink, M. de Haij, N. Maat and H. The). Paper presented at the WMO Technical Conference on Meteorological and Environmental Instruments and Methods of Observation (TECO-2006). Instruments and Observing Methods Report No. 94 (WMO/TD-No. 1354). Geneva.

———, 2006b: Status of the automatic observation on aerodrome and ongoing improvements in France (M. Leroy). Paper presented at the WMO Technical Conference on Meteorological and Environmental Instruments and Methods of Observation (TECO-2006). Instruments and Observing Methods Report No. 94 (WMO/TD-No. 1354). Geneva.

———, 2010: Laboratory and field evaluation of the NubiScope (W. Wauben, F. Bosveld and H. Klein Baltink). Paper presented at the WMO Technical Conference on Meteorological and Environmental Instruments and Methods of Observation (TECO-2010). Instruments and Observing Methods Report No. 104 (WMO/TD-No. 1546). Geneva.

———, 2016*a*: The ceilometer inter-comparison campaign CeiLinEx2015 - Cloud detection and cloud base height (U. Görsdorf, et al.). Paper presented at the WMO Technical Conference on Meteorological and Environmental Instruments and Methods of Observation (TECO-2016). Instruments and Observing Methods Report No. 125. Geneva.

———, 2016*b*: Transition towards a new ceilometer network in the Netherlands: challenges and experiences (M. de Haij, A. Apituley, W. Koetse and H. Bloemink). Paper presented at the WMO Technical Conference on Meteorological and Environmental Instruments and Methods of Observation (TECO-2016). Instruments and Observing Methods Report No. 125. Geneva.

———, 2016*c*: A new procedure to perform an absolute calibration of ceilometers (G. Martucci, A. Haefele, M. de Huu, M. Tschannen, A. Küng and V. Simeonov). Paper presented at the WMO Technical Conference on Meteorological and Environmental Instruments and Methods of Observation (TECO-2016). Instruments and Observing Methods Report No. 125. Geneva.

———, 2016*d*: The E-PROFILE network for the operational measurement of wind and aerosol profiles over Europe (A. Haefele, M. Hervo, M. Turp, J-L Lampin, M. Haefelin, V. Lehmann, the E-PROFILE team and the TOPROF team). Paper presented at the WMO Technical Conference on Meteorological and Environmental Instruments and Methods of Observation (TECO-2016). Instruments and Observing Methods Report No. 125. Geneva.

———, 2017: *International Cloud Atlas: Manual on the Observation of Clouds and Other Meteors* (WMO-No. 407). Geneva.

ГЛАВА 16. ИЗМЕРЕНИЕ СОСТАВА АТМОСФЕРЫ

16.1 ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

Основной целью настоящей главы является ознакомление читателей (в особенности тех, кто является новичком в проведении таких измерений) с методами и специализированными техническими средствами, применяемыми для измерения различных компонентов газового состава атмосферы и ряда соответствующих физических параметров. Такие измерения часто сопровождаются измерением основных метеорологических переменных величин, о чем уже рассказывалось в предыдущих главах. В рамках основных видов деятельности ВМО была учреждена Программа Глобальной службы атмосферы (ГСА) в ответ на растущую озабоченность, связанную с воздействием человека на состав атмосферы и связью состава атмосферы с погодой и климатом. Основные задачи ГСА сосредоточены на систематических глобальных наблюдениях за химическим составом и сопутствующими физическими характеристиками атмосферы, комплексном анализе этих наблюдений и развитии прогностического потенциала для прогнозирования будущих изменений состава атмосферы (WMO, 2017*a*).

Наблюдения и анализ химического состава атмосферы необходимы для углубления научного понимания последствий возрастающего влияния на глобальную атмосферу деятельности человека, о чем свидетельствуют насущные социальные проблемы, такие как: изменения погоды и климата, связанные с воздействием человека на состав атмосферы, в частности на парниковые газы (ПГ), озон и аэрозоли; воздействие загрязнения воздуха на здоровье человека, а также на экосистемы и проблемы, связанные с переносом и осаждением загрязняющих веществ на большие расстояния; изменения в ультрафиолетовом излучении как следствие изменений количества атмосферного озона и климата и последующего воздействия этих изменений на здоровье человека и экосистемы.

Для более детального ознакомления с деятельностью в области проведения таких измерений смотрите отчеты ГСА и другие справочные материалы, перечисленные в конце настоящей главы.

Наблюдения ГСА сосредоточены на шести классах переменных:

a) озон: содержание озона в столбе атмосферы (общее содержание озона) и вертикальный профиль озона, особенно в стратосфере и верхнем слое тропосферы;

b) парниковые газы: двуокись углерода ($CO_{2)}$ (включая $\Delta^{14}C$, $\delta^{13}C$ и $\delta^{18}O$ в CO_2, соотношение кислорода/азота (O_2/N_2)), метан CH_4 (включая $\delta^{13}C$ и δD в CH_4), закись азота (N_2O) и галозамещенные соединения (SF_6);

c) химически активные газы: приземный и тропосферный озон (O_3), моноксид углерода (CO), летучие органические соединения (ЛОС), оксиды азота (NO_x), двуокись серы (SO_2), молекулярный водород (H_2) и аммиак (NH_3);[1]

d) общая[2] атмосферная аккумуляция влаги (сосредоточенная в основном на больших ионах в группе влажного осаждения);

e) УФ-излучение;

f) аэрозоли (включая приповерхностные физические, оптические и химические свойства *in situ*, общие интегрированные свойства в столбе атмосферы и профилирование).

---

[1] Аммиак был определен в качестве одного из ключевых веществ, необходимых для решения проблемы азотного цикла, но рекомендации, касающиеся руководящих принципов измерения, пока отсутствуют.

[2] Методы измерения сухого осаждения пока не рекомендованы.

На станциях ГСА рекомендуется измерять ряд дополнительных параметров:

a) солнечную радиацию;

b) главные метеорологические параметры;

c) естественную фоновую радиоактивность, включая криптон-85, радон и некоторые другие радионуклиды.

Атмосферный водяной пар был предварительно включен в ГСА в 2015 году по решению Научного руководящего комитета по проблемам загрязнения окружающей среды и химии атмосферы (ВМО, 2015*a*), но инфраструктура еще не определена.

Из-за низкого коэффициента турбулентного перемешивания малых концентраций газов в атмосфере приборы и методы, используемые для количественного и качественного определения состава атмосферы, весьма сложны, и работа с ними иногда вызывает затруднения. Небольшие ошибки, например, в спектральных характеристиках, или перекрестная чувствительность к другим химическим соединениям, могут легко понизить точность измерений состава атмосферы. Поэтому для обеспечения получения точных и надежных данных измерений чрезвычайно важно помимо правильной эксплуатации регулярно проводить калибровку оборудования, аудит станций, участвовать в проведении взаимных сравнений и обеспечивать подготовку персонала. Получение надежных и высококачественных результатов по большинству видов измерений, описанных в настоящем Руководстве, невозможно без активного привлечения квалифицированного персонала на профессиональной основе. Основные принципы обеспечения качества (ОК) проведения наблюдений за составом атмосферы в рамках ГСА приводятся в 16.1.4.

План реализации Программы ГСА основывается на концепции «наука в интересах обслуживания» и охватывает множество областей применения, в которых используются наблюдения за химическим составом атмосферы. Необходимость улучшения знаний об изменениях качества воздуха, например, в городских масштабах, наряду с текущим техническим развитием, привела к появлению в сообществе новых методов измерения, а именно сравнительно дешевых датчиков измерения состояния окружающей среды. Низкозатратные датчики контроля загрязнения воздуха могут предоставлять новую информацию, но они также подвержены ряду недостатков. Возможность применения таких датчиков в долгосрочной перспективе еще не доказана, и требуется постоянная, более широкая оценка различных сенсорных технологий и требований к качеству данных и калибровке для конкретных видов применений. Поскольку это быстро изменяющаяся область, может потребоваться непрерывная переоценка, включая новые разработки и изменения в эксплуатационных характеристиках. Группа экспертов под эгидой Комиссии по атмосферным наукам разработала всеобъемлющее заявление об использовании низкозатратной сенсорной технологии (WMO et al., 2018).

16.1.1 Определения и описания

В зависимости от принципа измерения и особенностей платформы наблюдений, выполняются два типа измерений, данные которых сообщаются на регулярной основе, а именно:

Точечные измерения. Это относится к результатам (непрерывных или дискретных) измерений количества отдельного компонента в определенном месте в пространстве (либо в атмосферном слое толщиной в несколько десятков метров над поверхностью в конкретном месте на поверхности Земли, либо в любом месте тропосферы, стратосферы или любого другого атмосферного слоя). Серия точечных измерений на нескольких высотах над заданным местоположением представляет собой измерение вертикального профиля (например, измерения с самолета или воздушных шаров/зондов, ракет и т. п.). Точечные измерения также могут выполняться по определенным горизонтальным маршрутам с использованием мобильных платформ (например, корабль, поезд, дорожное транспортное средство). Результаты точечных

измерений обычно приводятся в единицах парциального давления, концентрации, коэффициента смешивания или мольной доли с поправкой на условия стандартных температуры и давления (СТД) 273,15 K и 101,325 кПа соответственно, когда измерения выполняются над уровнем моря. Настоятельно не рекомендуется использовать единицы, не входящие в Международную систему единиц (СИ).

Комплексные измерения. Это относится к совокупному или средневзвешенному количеству конкретного вещества, содержащегося в атмосфере вдоль траектории наблюдения. Это может быть вертикальный суммарный столб, простирающийсяот земной поверхности до верхней границы атмосферы. Обычно используемыми единицами измерения общего содержания озона являются: a) эквивалентная толщина слоя молекул озона в столбе атмосферы в условиях стандартных температуры и давления (273,15 K и 101,325 кПа); и b) плотность атмосферного столба (общее количество молекул на единицу площади в атмосферном столбе). Для других составных частей атмосферы используется плотность атмосферного столба или относительное осредненное содержание вещества в атмосферном столбе. Обычно также сообщается о парциальном содержании вещества в атмосферном столбе, например содержание NO_x в тропосферном столбе. В этом случае тропосферный столб, который интегрирован, простирается от поверхности Земли до тропопаузы. Приборы дифференциальной оптической абсорбционной спектроскопии (ДОАС) также позволяют измерять среднее количество вещества вдоль горизонтальных путей распространения.

Наблюдения за составом атмосферы включают в себя газовый состав, аэрозоли и суммарное количество выпадения из атмосферы осадков. Характеристики химического состава осадков (влажное осаждение) приводятся в 16.5. Переменные величины, описывающие аэрозоли (физические и химические характеристики), перечислены в 16.6.

16.1.2 Единицы и шкалы

Для выражения результатов наблюдений за малыми газовыми составляющими атмосферы используются следующие единицы:

Число молекул на единицу площади. Это представляет собой относительное содержание в столбе атмосферы малых газовых составляющих атмосферы. До сих пор широко используется единица Добсона (Д. Е.), которая обозначает число молекул озона, необходимое для образования слоя чистого озона толщиной 10^{-5} м при стандартной температуре и давлении (СТД). Иными словами, 1 Д. Е. представлен в столбе воздуха, содержащего около $2{,}6868 \cdot 10^{16}$ молекул озона на каждый квадратный сантиметр площади в основании столба воздуха.

Концентрация по массе. Это представляет собой массу конкретного компонента вещества в единице объема атмосферного воздуха (например, микрограмм на $м^3$).

Миллиатмосантиметр (м-атм-см). Мера общего содержания озона, равная 10–3 см чистого озона при СТД (1 м-атм-см эквивалентен 1 Д. Е.).

Мольная доля вещества в сухом воздухе (сухой воздух включает в себя все газообразные вещества, за исключением водяного пара (H_2O)):

– Мкмоль $\cdot$моль$^{-1}$ = 10^{-6} молей малых составляющих веществ на каждую молю сухого воздуха

– Наномоль $\cdot$моль$^{-1}$ = 10^{-9} молей малых составляющих веществ на каждую молю сухого воздуха

– Пкмоль $\cdot$моль$^{-1}$ = 10^{-12} молей малых составляющих веществ на каждую молю сухого воздуха

Сухая мольная доля требует либо сушки проб воздуха перед измерением, либо корректировки измерения на содержание водяного пара. Когда сушка невозможна или коррекция добавила бы существенную неопределенность к измерению, вместо этого можно сообщить о влажных мольных долях. Это должно быть четко указано в метаданных записи наблюдений.

Соответствующей единицей для выражения количества вещества является мольная доля сухого воздуха, передаваемая как частиц на миллион (ppm, т. е. мкмоль · моль$^{-1}$), ppb (частиц на миллиард, т. е. нмоль · моль$^{-1}$) и ppt (частиц на триллион, т. е. пкмоль · моль$^{-1}$). Часто к этим единицам добавляется «v» для обозначения объемного соотношения компонентов смеси. Когда говорится о мольной доле вещества, выраженной объемным соотношением компонентов смеси, подразумевается, что атмосфера является идеальным газом. В рамках условий для ГСА отклонения от идеала могут быть значительными (например для CO_2), таким образом использование мольной доли значительно предпочтительнее, поскольку она не требует безусловного допущения состояния идеальности для газа и, что более важно, из-за того, что она также применима для веществ в конденсированной фазе. В целом же, настоятельно рекомендуется использовать единицы СИ.

Изотопное или молекулярное соотношения. Атмосферные молекулы могут присутствовать в различных изотопических конфигурациях[3]. Данные об изотопном соотношении выражаются отклонением от эталонного стандарта с использованием условного обозначения дельта-функции:

$$\delta = \left(R_{\text{sample}} / R_{\text{reference}} - 1\right), \text{with } R = \left[\text{heavy isotope}\right] / \left[\text{light isotope}\right] \quad (16.1)$$

Значения δ выражаются кратными 1 000 (‰ или на мил).

Международной эталонной шкалой (иными словами первичной шкалой) для $\delta^{13}C$ служит Венский Пи Ди Белемнит (ВПДБ). NBS 19 и LSVEC (Coplen et al., 2006) являются первичными международными эталонными материалами для определения шкалы ВПДБ. Для $\delta^{18}O$ используются кратные шкалы (ВПДБ, Венский стандарт усредненной природной воды, воздух-O_2 (de Laeter et al., 2003)).

Обозначение дельта-функции также используется для выражения колебаний относительного соотношения O_2/N_2 (и соотношения аргона/азота (Ar/N_2)) в воздухе:

$$\delta\left(O_2/N_2\right) = \left(R_{\text{sample}} / R_{\text{standard}} - 1\right), \text{with } R = O_2/N_2 \quad (16.2)$$

Соответствующий международный стандарт для атмосферного воздуха еще не учрежден. Локальная шкала O_2/N_2 Скриппсовского института океанографии, основанная на комплекте баллонов, заполненных на Скриппсовском пирсе, является наиболее широко используемой шкалой.

Значения $\delta(O_2/N_2)$ выражаются кратными 10^6 или на мег.

Наблюдения за химическим составом осадков (влажное осаждение) включают в себя измерения нескольких параметров, которые описываются более подробно в 16.5. Используются следующие единицы:

a) измерения pH выражаются в единицах кислотности, определяемых по формуле: $pH = -\log_{10}[H^+]$, где $[H^+]$ выражается в молях на л$^{-1}$;

b) электропроводность выражается в мкСм·см$^{-1}$ (микросименс на сантиметр), единице, обычно используемой для измерения электрической проводимости;

[3] Например, CO_2 состоит в основном из $^{12}C^{16}O^{16}O$, в то время как относительно меньшее содержание изотопологов с более высокой массой от 45 до 49 ($^{13}C^{16}O^{16}O$, $^{14}C^{16}O^{16}O$ или $^{12}C^{18}O^{16}O$ соответствуют родственному элементу ^{17}O и смешанным изотопным веществам) и также присутствует в атмосфере.

c) кислотность/щелочность выражается в мкмоль·л$^{-1}$ (микромоль на литр);

d) содержание больших ионов выражается в мг·л$^{-1}$ (миллиграмм на литр).

Результаты наблюдений за аэрозолями в объемно-метрических величинах, т. е. количеств вещества в объеме воздуха, фиксируются для условий СТД. Они могут относиться к числовой концентрации частиц (см$^{-3}$), площадной концентрации (м^2·м$^{-3}$ или м$^{-1}$) или концентрации по массе (мг·м$^{-3}$). Оптическая плотность аэрозоля (ОПА) является безразмерной величиной. Коэффициенты поглощения и рассеяния выражены в м$^{-1}$.

16.1.3 **Принципы и методы измерений**

Существующие методы измерений химического состава атмосферы можно разделить на три основные группы: пассивный отбор проб, активный отбор проб и методы дистанционного зондирования, которые сами по себе могут быть как активными (например, лидарные системы с собственными источниками света), так и пассивными (спектрометры, использующие, например, солнечный свет). По большому счету, активные методы отбора проб используют всасывание насосом пробы воздуха через детектор или пробоотборник, тогда как пассивные методы отбора проб используют распыление воздуха на пробоотборник. В методах дистанционного зондирования анализируемый объем воздуха и детектор находятся в разных местах. Измерения общего или частичного содержания вещества в столбе воздуха возможны только методом дистанционного зондирования.

В случае активного отбора проб измерения могут быть выполнены либо непрерывно (или, по крайней мере, почти непрерывно с коротким временем интегрирования)[4], либо пробы могут отбираться или специально подготавливаться (в баллонах из стекла или нержавейки, на сорбентную подложку или фильтры) и анализироваться позднее в специальных лабораториях. Сбор дискретных проб влечет за собой хранение этих проб. За время хранения свойства сосуда могут влиять на состав пробы из-за химических или поверхностных воздействий или проникновения через герметизирующие полимеры. Это требует тщательных испытаний контейнеров для отбора проб.

Аналитические методы, наиболее широко используемые (и рекомендованные в Программе ГСА) для обнаружения и количественной оценки малых концентраций газов в атмосфере, можно кратко описать следующим образом:

a) *Спектроскопический метод* заключается в измерении изменений интенсивности радиационного излучения в результате поглощения, эмиссии, фотоэлектрической проводимости, комбинационного (рамановского) рассеяния молекулой или аэрозольной частицей, определяемых в зависимости от длины волны. Спектральные измерения можно проводить в различных частях спектра, в зависимости от компонента, который необходимо измерить, или на нескольких конкретных длинах волн. Поскольку линии поглощения для разных молекул с различным изотопическим составом отличаются друг от друга, а форма линии зависит от суммарного химического состава газа, нужно соблюдать осторожность для обеспечения сопоставимости и уверенности в том, что эталонный газ имеет схожие свойства с анализируемым атмосферным воздухом.

b) *Газовая хроматография* (ГХ) представляет собой физический метод разделения, которым распределяются компоненты для разделения между двумя фазами, одна стационарная (стационарная фаза), другая (мобильная фаза) находится в движении в определенном направлении. Существует множество хроматографических методик и соответствующих приборов. Для того чтобы быть подвергнутым ГХ анализу, вещество должно иметь достаточную волатильность и термическую стабильность. В газовой хроматографии анализируемая проба выпаривается и вводится в начало хроматографической колонки. Проба переносится по колонке потоком инертной,

[4] Этот метод, например, широко распространен при измерениях газовым хроматографом.

газообразной подвижной фазы. Сама колонка содержит жидкую стационарную фазу, которая абсорбируется на поверхности инертной минеральной частицы. Хроматографический детектор представляет собой устройство, используемое для визуализации компонентов смеси, элюируемых из хроматографической колонки. Есть два основных типа детектора: деструктивный и недеструктивный. Деструктивные детекторы, например пламенно-ионизационный детектор (ПИД), осуществляют непрерывную трансформацию элюируемого компонента колонки (сжигание, испарение или смешивание с реагентами) с последовательным измерением определенных физических параметров готового материала (плазма, аэрозоль или реакционная смесь). Недеструктивные детекторы, например детектор электронного захвата (ДЭЗ), напрямую измеряют определенные параметры элюируемого компонента колонки (например УФ-поглощение) и, таким образом, позволяют в дальнейшем получать восстановление вещества, определяемого при анализе.

c) *Масс-спектрометрия* (МС) представляет собой аналитический метод, который позволяет получить спектры масс молекул, из которых состоит образец материала. Спектры используются для определения элементного (химического) состава образца, масс частиц и молекул, для проведения исследований химических структур молекул. Масс-спектрометрия использует ионизацию химических веществ с целью генерирования заряженных молекул или фрагментов молекул и затем измерения их отношения массы к заряду. В ряде приборов масс-спектрометрия может использоваться в качестве детекторного метода для газовой хроматографии.

Некоторые другие аналитические методы могут быть использованы на станциях ГСА, где количество анализируемого вещества определяется посредством его химической реакции с реагентом (например, электрохимический метод или методы, основанные на хемилюминесценции).

Методы обнаружения газов и аэрозолей разнятся и основаны на различных физических явлениях. Подробное описание методов обнаружения, применяемых для различных газов и параметров аэрозолей, кратко изложены ниже в соответствующих разделах.

Методики измерения основных веществ, наблюдаемых в рамках Программы ГСА, кратко описаны в этой главе, в то время как подробные рекомендации в отношении проведения измерений можно найти в специализированных отчетах ГСА, на которые даются ссылки в отдельных разделах. В тех случаях, когда методические рекомендации ГСА по проведению измерений или стандартные оперативные процедуры (СОП) отсутствуют, приводятся ссылки на информацию, необходимую для проведения соответствующих измерений.

Упоминаемые ниже методы спутникового дистанционного зондирования веществ, содержащихся в атмосфере, рассматриваются отдельно в томе IV, глава 5 настоящего Руководства.

16.1.4 **Обеспечение качества**

Цели системы обеспечения качества (ОК) ГСА заключаются в том, чтобы данные, передаваемые со станций, были согласованными, достоверными и надлежащего качества, поддерживались исчерпывающими метаданными и были репрезентативными с учетом их регионального или глобального пространственно-временного распределения.

Принципы системы ОК ГСА применимы (WMO, 2017*a*) к любой измеряемой переменной величине и включают в себя следующее:

a) полная поддержка Принципов мониторинга климата ГСНК;

b) использование на всей сети только одного эталонного стандарта или первичной шкалы (первичного эталона). Как следствие только одно учреждение отвечает за этот эталон;

c) полная прослеживаемость до первичного стандарта всех измерений, выполняемых глобальными, региональными и локальными станциями ГСА, и сетевых стандартов участвующих сетей, в которых установлены такие стандарты;

d) определение целей в области качества данных;

e) разработка руководящих принципов, связанных с достижением этих целевых показателей качества, то есть согласованных методов измерений, опубликованных в качестве руководящих принципов измерений и СОП и внедренных на станциях;

f) использование подробных учетных журналов для каждого параметра, содержащих комплексные метаданные, относящиеся к измерениям, техническому обслуживанию и «внутренние» калибровкам;

g) регулярные независимые оценки (аудиты системы и эффективности);

h) своевременное представление данных и связанных с ними метаданных в ответственный мировой центр данных или участвующий центр данных сети, в качестве средства проведения независимого обзора данных более широким сообществом пользователей;

i) регулярный статистический и научный анализ данных в архивах данных ГСА для обеспечения точности, долгосрочной согласованности и сопоставимости архивированных данных измерений.

Кроме того, принципы мониторинга, используемые ГСНК (WMO, 2016*a*), также применяются к наблюдениям в рамках ГСА. Среди них наиболее важными принципами для измерения состава атмосферы являются:

a) перед началом работы следует оценить воздействие новых систем или изменения в существующих системах;

b) необходим адекватный период параллельной работы старых и новых систем наблюдений;

c) следует поддерживать с самого начала непрерывную работу станций и систем наблюдений.

Система ОК ГСА рекомендует также принять и использовать признанные на международном уровне методы и терминологию, описывающую неопределенности в измерениях.

Члены ВМО обеспечивают работу пяти типов центральных учреждений (см. приложение), выделенных для шести групп измеряемых переменных величин (см. раздел 16.1); эти учреждения формируют основу обеспечения качества и системы архивации данных. Они включают в себя:

a) центральные калибровочные лаборатории, которые хранят у себя первичные эталоны и шкалы;

b) мировые/региональные калибровочные центры, которые координируют проведение взаимных сравнений приборов, оказывают помощь в калибровке приборов и проводят аудиторские проверки станций/лабораторий;

c) центры обеспечения качества/активной научной деятельности, которые предоставляют техническую и научную поддержку и координируют сотрудничество между центральными учреждениями и станциями ГСА;

d) мировые центры данных, которые в основном обеспечивают распространение данных ГСА и свободный доступ к ним, а также безопасность данных путем их надлежащей архивации.

Характер потока данных и распределение обязанностей по осуществлению обеспечения качества/контроля качества (ОК/КК) между центральными учреждениями и местами наблюдений зависят от каждой переменной. Работа этих центральных учреждений по обеспечению качества наблюдений в ГСА поддерживается соответствующими научно-консультативными группами, в задачи которых входит оказание помощи в разработке процедур и руководящих принципов измерений и методических руководств, целей в области качества данных и, где это применимо, СОП, а также рассмотрение новых методик измерений и подготовка рекомендаций по их применению для осуществления наблюдений в рамках ГСА. Более подробную информацию и круг ведения центральных учреждений и научно-консультативных групп см. в Плане осуществления ГСА на 2016—2023 годы (WMO, 2017*a*). Важной проблемой является недавнее создание в Европе инфраструктур атмосферных исследований, таких как Интегрированная система наблюдений за выбросами углерода (https://www.icos-ri.eu) и Инфраструктура исследований аэрозолей, облаков и следовых газов (ACTRIS, https://www.actris.eu), которые внедряют центральные средства для контроля качества и анализа качества в поддержку стратегий осуществления ГСА для обеспечения ОК/КК.

Учитывая различия в уровнях развития систем измерений и КК/ОК в рамках ГСА, особенно важно, чтобы все данные измерений сообщались вместе с соответствующей неопределенностью измерения (ISO/IEC, 2008).

16.2 ИЗМЕРЕНИЯ (СТРАТОСФЕРНОГО) ОЗОНА

16.2.1 Общее содержание озона

Общее содержание озона может быть измерено только с помощью пассивных методов дистанционного зондирования. Наиболее точную информацию об общем содержании озона и его изменениях на отдельных участках можно получить путем измерений с поверхности земли, например, методом солнечной спектроскопии в диапазоне длин волн 300–340 нм. В рамках Программы ГСА используются спектрофотометры Добсона (сконструированные для ручного управления прибором) и спектрофотометры Брюера (сконструированные для автоматического управления прибором) в качестве приборов для обычных систематических наблюдений за общим содержанием озона, обеспечивая, таким образом, работу двух независимых сетей.

Подробное описание проведения измерений общего содержания озона с помощью спектрофотометра Добсона и обеспечения качества измерений приводится в издании ВМО (WMO, 2008*a*). Наблюдения за общим содержанием озона проводятся этим прибором путем измерения относительной интенсивности определенных пар длин волн в УФ-диапазоне, называемых длинами волн A, B*, C, C' и D, излучаемых солнцем, луной или небом в зените. Например, пара длин волн A состоит из длины волны 3 055 Å (единица измерения ангстрем, 1 Å = 0,1 нм), которая почти полностью поглощается озоном, и более интенсивной длины волны 3 254 Å, которая почти не взаимодействует с молекулой озона. За пределами атмосферы Земли относительная интенсивность этих двух волн разной длины остается практически постоянной. Однако при прохождении сквозь атмосферу на пути к прибору обе длины волны теряют в своей интенсивности из-за рассеяния света молекулами воздуха и частицами пыли; кроме того, волна длиной 3 055 Å сильно ослабляется при прохождении сквозь озоновый слой, в то время как ослабление волны длиной 3 254 Å относительно слабое. Поэтому относительная интенсивность пары длин волн A, как видно по прибору, меняется в зависимости от количества озона, присутствующего в атмосфере, поскольку при увеличении количества озона наблюдаемая интенсивность волны длиной 3 055 Å уменьшается, в то время как интенсивность волны длиной 3 254 Å остается практически неизменной. Таким образом, измеряя относительную интенсивность определенных пар волн разной длины с помощью прибора Добсона,

можно определить, как много озона имеется в столбе воздуха протяженностью от поверхности земли до верхней границы атмосферы вблизи прибора. Результат измерения выражается в единицах толщины эквивалентного слоя чистого озона при СТД.

Принцип измерения спектрофотометром Брюера такой же, что и у прибора Добсона. Рабочие процедуры предоставляются компанией — производителем этого прибора на сайте: http://www.kippzonen.com/?productgroup/26142/Brewer+Spectrophotometer.aspx. Рекомендации для сети ГСА предоставлены Мировым центром данных по озону и ультрафиолетовой радиации на сайте: http://woudc.org/archive/Documentation/SOP_Documents/brewerspectrophotometer_sop-june2008.pdf.

Результаты сравнений приборов Брюера и Добсона, а также рекомендации по работе с приборами Брюера представлены в отчетах о проводящихся раз в два года консультациях по применению спектрофотометра Брюера для измерения озона и УФ-излучения, по калибровке и обработке данных (например, см. WMO, 2008*b, 2015b, 2015c, 2015b*).

Приборы сетей Брюера и Добсона мирового (первичного) эталона, калибруются по методу диаграмм Лэнгли в обсерватории Мауна-Лоа на Гавайях (каждые 2–4 года); эталоны, используемые региональными калибровочными центрами для распространения прослеживаемости, калибруются по первичному эталону каждые 2–3 года; и станционные приборы калибруются путем параллельного сравнения с эталонными приборами каждые 6 лет для спектрофотометров Добсона и 2 года для спектрофотометров Брюера. Кроме того, успешное проведение калибровочных кампаний по методу диаграмм Лэнгли в Изанской атмосферной лаборатории на острове Тенерифе с использованием приборов Добсона первичного и регионального эталонов доказали пригодность этого места и имеющегося там оборудования для использования метода абсолютной калибровки.

Дополнительные измерения общего содержания озона проводятся с помощью спектрометров УФ/видимой области спектра, использующих принцип дифференциальной оптической абсорбционной спектроскопии (ДОАС), которые также позволяют обнаружить различные второстепенные незначительные газовые примеси (например, NO_2 и BrO). Французский прибор называется Système d'Analyse par Observations Zénithales (SAOZ), но он основан на таком же принципе, что и ДОАС. Эти приборы являются частью измерительного комплекса в рамках сети станций для обнаружения изменения состава атмосферы (СОИСА) (https://ndacc.larc.nasa.gov/instruments). По сравнению с более основательной сетью приборов Брюера/Добсона процедуры измерения и анализа для приборов типа ДОАС менее стандартизированы, но для них регулярно проводятся кампании по проведению сравнений. Другие приборы для измерения общего содержания озона с поверхности земли (российские фильтровые приборы или приборы типа ДОАС/SAOZ) не используются в рамках одной программы ОК/КК в отличие от приборов Добсона и Брюера. Они не калибруются самостоятельно, но связаны либо с прибором Добсона, либо с прибором Брюера. Например, российские фильтрующие приборы, полевые озонометры М-124, калибруются в среднем каждые два года путем прямого сопоставления со спектрофотометром Добсона D108 в Главной геофизической обсерватории им. А.И.Воейкова (ГГО) в Санкт-Петербурге. Приборы на станциях каждые два года заменяются недавно откалиброванными озонометрами и доставляются на место калибровки в ГГО, где они одновременно снимают показания прямого солнца со спектрофотометра Добсона D108. Коэффициенты калибровки фильтрующего прибора определяются в зависимости от зенитного угла Солнца и общего содержания озона на основе измерений спектрофотометра Добсона. Затем откалиброванные приборы возвращаются на соответствующие полевые участки. Таким образом, сеть озонометров М-124 поддерживается в калибровочной шкале Мирового первичного спектрофотометра Добсона D083. Хотя спектрофотометр D108 калибруется с точностью около 1 % каждые четыре года, точность передачи калибровочной шкалы в сеть озонометров М-124 оценивается примерно в 3 %.

Качество данных по всем отдельным рядам данных об общем содержании озона, хранящихся в Мировом центре данных по озону и ультрафиолетовому излучению, должно быть задокументировано для пользователей.

Определение количества озона методом ДОАС основывается на точном знании поперечного сечения поглощения, определенного в лаборатории. Однако поперечные сечения поглощения зависят как от температуры, так и от давления, и поэтому не являются постоянными в атмосфере. Следует позаботиться о выборе соответствующей версии поперечных сечений и использовать самые последние данные (WMO, 2015*d*).

16.2.2 Измерения вертикального распределения озона

Измерения вертикального распределения озона можно проводить как активными методами, так и методами дистанционного зондирования.

16.2.2.1 *Умкер-метод*

Спектрофотометры Добсона и Брюера могут быть использованы для измерения вертикального распределения озона с помощью Умкер-метода (WMO, 2008*c;* Jaroslawski, 2013). Приведение измерения по Умкер-методу к получению профиля озона требует комплексного алгоритма, который включает в себя знания радиационных параметров реальной атмосферы. Поскольку эти знания меняются, алгоритм будет меняться. Стандартное наблюдение по Умкер-методу состоит из серий измерений пары длин волн C, проводимых при ясном небе в зените утром или после полудня. Измерения начинаются за несколько минут до восхода солнца и продолжаются до достижения зенитного угла солнца не ниже примерно 20 градусов, или начинаются после полудня, когда зенитный угол солнца составляет не менее 20 градусов, и продолжаются до их завершения вскоре после захода солнца. Небо в зените должно быть ясным, т.е. без облаков в течение периода от 30 мин до 1 ч до/после восхода или заката. Это особенно актуально для станций, расположенных в низких широтах, где солнце восходит или садится очень быстро. В другое время желательно, чтобы небо в зените было безоблачным, но допустимо периодическое появление на небе облаков, когда измерения не производятся. Наблюдения по Умкер-методу не могут проводиться на полярных станциях или на станциях в высоких широтах во время полярного лета, когда солнце на небе не заходит за горизонт.

Для расчета вертикального распределения озона необходимо знать общее количество соединения, содержащегося в атмосферном столбе на момент наблюдения. Поэтому в течение утра или после полудня обязательно необходимо сделать несколько измерений общего содержания озона, особенно если количество озона изменяется довольно быстро.

Полученный в результате профиль озона, рассчитываемый из соответствующего приведения имеющихся измерений, весьма зависим от используемого алгоритма. Такой анализ данных по Умкер-методу первоначально был разработан в работе Götz et al. (1934). Позже этот метод был усовершенствован в трудах Ramanathan and Dave (1957), Mateer and Dütsch (1964) и Mateer and DeLuisi (1992). Умкер-алгоритм описан в работе Petropavlovskikh et al. (2005), обновленная информация доступна на сайте: https://gml.noaa.gov/ozwv/umkehr.

16.2.2.2 *Измерения с помощью озонозондов*

Измерение озона с помощью шаров-зондов (озонозондов) является активным методом измерения вертикального распределения озона в атмосфере. Другие активные методы для измерения мольных долей озона (используемые на самолетных платформах) описаны в разделе, посвященном реактивным газам (см. 16.4.1).

Озонозонды представляют собой небольшие, легкие по весу и компактные, прикрепленные к воздушному шару приборы, предназначенные для измерения вертикального распределения атмосферного озона до высоты около 30–35 км. Измерительный преобразователь подсоединен к стандартному метеорологическому радиозонду для обеспечения передачи данных на наземную станцию. В настоящее

время используются два основных типа озонозондов – зонд Брюера-Маста и зонд с ячейкой электрохимического концентрирования. Каждый из этих зондов имеет свою специфическую конструкцию.

Полетный вес прибора обычно не превышает примерно 1 кг, и он может лететь на небольшом метеорологическом шаре-зонде. Обычно данные передаются во время подъема шара при вертикальной скорости подъема приблизительно около 5 $м \cdot с^{-1}$ до высоты разрыва оболочки шара на 30–35 км. Свойственная озонозонду инертность прибора равна 20–30 с, таким образом эффективная разрешающая способность по высоте измеряемого профиля озона обычно составляет 100–150 м.

Принципы работы озонозондов и обзор различных аспектов обеспечения качества и контроля качества измерений с помощью озонозондов в рамках ГСА подробно рассмотрены в публикации ВМО (WMO, 2014).

16.2.2.3 *Другие методы измерений*

Измерения профиля озона могут также проводиться с помощью других приборов, используемых в рамках работы СОИСА. Измерения с помощью лидара и микроволновых приборов входят в программу измерительных комплексов СОИСА и дают ценную информацию для оценки трендов озона в верхней стратосфере и для валидации спутниковых измерений в верхних слоях атмосферы. Слабым местом микроволновых измерений озона является довольно плохое вертикальное разрешение, но они имеют потенциал для измерения до высот мезопаузы. Сочетание данных приземных наблюдений, полученных с помощью зондов, Умкер-метода, лидара и микроволновых приборов, имеет большое значение для оценки качества спутниковых измерений профиля озона (van der A et al., 2010).

16.2.3 Наблюдения с помощью самолетов и спутников

Озон в атмосфере измеряется также с помощью приборов, размещенных на самолетах и спутниках. Наблюдения с воздуха обычно проводятся полевыми фотометрами, анализирующими воздух в тропосфере и нижних слоях стратосферы во время полета. Измерения проводятся в основном во время исследовательских экспериментов по атмосферной химии, но проводились и долгосрочные проекты с использованием коммерческих самолетов, например MOZAIC (измерения озона, водяного пара, моноксида углерода и оксидов азота на борту рейсовых самолетов Эйрбас), CARIBIC (гражданские воздушные суда для регулярного изучения атмосферы с помощью контейнеров с приборами, www.caribic-atmospheric.com) и проект IAGOS (эксплуатируемые воздушные суда для Глобальной системы наблюдений, https://www.iagos.org/).

Широкомасштабный мониторинг атмосферного озона проводится со спутников с помощью приборов дистанционного зондирования. Эти программы могут быть разделены по продолжительности их осуществления: долгосрочные системы оперативного мониторинга, которые позволяют получить большие (глобальные) ряды данных, используемых для анализа трендов и для оперативного нанесения на карту распределения озона, а также временные экспериментальные спутников.

Спутниковые наблюдения можно сгруппировать по принципу используемой прибором технологии для обнаружения радиации и схемы извлечения информации для определения плотности содержания озона в атмосферном столбе или концентрации, полученной по измеренной лучистости. В то время как приборы наблюдений со спутников, находящихся в надире, используются, главным образом, для наблюдений за содержанием озона в атмосферном столбе и получения приблизительного вертикального профиля, приборы лимбового зондирования могут измерять вертикальное распределение озона с высоким высотным разрешением во время солнечного, лунного или звездного экранирования или наблюдения лимбового рассеяния и эмиссии через атмосферный лимб (Tegtmeier et al., 2013; Sofieva et al., 2013).

16.3 ПАРНИКОВЫЕ ГАЗЫ

Все парниковые газы определяются в сухой мольной доле по самым последним шкалам (https://www.esrl.noaa.gov/gmd/ccl/). Шкалы пересматриваются каждые два года на совещаниях ВМО/Международного агентства по атомной энергии (МАГАТЭ) по двуокиси углерода, другим парниковым газам и соответствующим методам измерений (WMO, 2016*c*). Первичный эталон для парниковых газов представляет собой комплект баллонов с природным воздухом, для которого известно количество мольных долей содержащихся в нем исследуемых газов. Первичные шкалы переносятся на станционные рабочие эталоны через вторичные и третичные газовые эталоны в баллонах высокого давления.

16.3.1 Диоксид углерода (включая $\Delta^{14}C$, $\delta^{13}C$ и $\delta^{18}O$ в CO_2, и соотношения O_2/N_2)

Диоксид углерода обычно измеряется активными методами в пограничном слое атмосферы.

Исторически сложилось так, что большинство измерений фоновой концентрации CO_2 в атмосфере производилось с помощью недисперсионных инфракрасных газоанализаторов (НДИР), но в нескольких программах использовался метод газовой хроматографии (ГХ). Работа приборов НДИР основана на том же самом физическом принципе, благодаря которому CO_2 является парниковым газом: его способность поглощать ИК-излучение. Эти приборы измеряют интенсивность ИК-излучения, проходящего сквозь исследуемую ячейку, относительно излучения, проходящего сквозь эталонную ячейку. Нет необходимости знать мольные доли CO_2 в газе в эталонной ячейке. Проба воздуха закачивается воздухозаборником, установленным на значительном расстоянии от здания, где проводится измерение, в пробоотборную ячейку, и в течение определенного периода времени проводятся измерения. Потом проба отделяется и заменяется эталонным или стандартным газом, и снова проводятся дальнейшие измерения. Концентрация CO_2 в пробах определяется путем сравнения соотношения с эталонными и/или стандартными газами. Газохроматографический метод требует отделения CO_2 от других газов в пробе воздуха путем восстановления CO_2 на катализаторе с H_2 до CH_4. Улавливание CH_4, полученного из CO_2, достигается с применением пламенно-ионизационного детектора (ПИД). Хроматографический пиковый отклик от пробы сравнивается с откликами от эталонов с известными мольными долями CO_2 для расчета мольной доли CO_2 в пробе. Методы работы на газовом хроматографе не позволяют проводить измерения чаще, чем один раз каждые несколько минут.

Большинство новейших методов измерения CO_2 работают на основе методов оптической спектроскопии на основе лазера, подобно ИК-спектроскопии поглощения с Фурье-преобразованием (ИКФП) или высокоточной спектроскопии поглощения резонатора, которая включает в себя нисходящую спектроскопию внутри кольцевого резонатора (НСКР) и внеосевую интегрированную спектроскопию выходного сигнала резонатора (OA-ICOS). Среди преимуществ этих методов – снижение требований к калибровке за счет лучшей линейности и стабильности.

Относительное содержание диоксида углерода выражается в мольных долях в сухом воздухе, мкмоль/моль$^{-1}$, сокращенно ppm, по шкале ВМО мольных долей CO_2 (шкала ВМО CO_2 X2007, по состоянию на 2018 г.). Водяной пар влияет на измерение CO_2 двояко: a) H_2O также поглощает ИК-излучение и может влиять на измерение CO_2; b) H_2O занимает определенный объем в исследуемой ячейке с пробой, в то время как эталоны сухие. В теплых и влажных местах в пробе может содержаться H_2O в объеме 3 % от общего объема воздуха. Поэтому необходимо учитывать влияние водяного пара на измерение CO_2. Для устранения влияния достаточно высушить воздух до точки росы –50 °C. Принципиально новые методы оптической спектроскопии позволяют одновременно определять содержание водяного пара, что позволяет корректировать разбавление за счет H_2O и спектроскопических эффектов. Текущая передовая практика (см. WMO, 2016*c*) рекомендует либо удалять водяной пар из потока пробного газа, либо тщательно определять его влияние на определение мольной доли для каждого отдельного прибора.

Другим методом измерения CO_2, который в основном применим для многих других малых газовых составляющих атмосферы, является отбор проб воздуха в герметичные вакуум-непроницаемые фляги. Эти фляги доставляются в центральную лабораторию, где определяется мольная доля CO_2 с применением НДИР, ГХ или других методов. Этот метод используется тогда, когда достаточно редко проводится отбор проб (например, один раз в неделю) для определения пространственно-временных градиентов содержания CO_2, и когда необходимо провести сравнение с измерениями *in situ* для контроля качества данных. Эта стратегия отбора проб имеет то преимущество, что многие вещества могут быть определены из одной и той же пробы.

Измерение соотношений O_2/N_2 и стабильных изотопов CO_2 ($\delta^{13}C$ и $\delta^{18}O$) помогает распределить между океаном и биосферой источники эмиссии и поглощения углерода. Изотопные измерения часто производятся из тех же самых дискретных проб, которые используются для измерения мольной доли содержания CO_2. Изотопных эталонов, прослеживаемых до СИ, не существует, но МАГАТЭ поддерживает общепринятые эталонные материалы. Измерения выполняются в рамках сети ГСА по наблюдению за CO_2.

Методом измерения для определения стабильных изотопов является масс-спектрометрия соотношения стабильных изотопов , в котором методы масс-спектрометрии используются для измерения относительного содержания изотопов в исследуемой пробе. Комплект измерительного оборудования описан Центральной калибровочной лабораторией (ЦКЛ) ГСА для стабильных изотопов при Институте биогеохимии имени Макса Планка в Йене, Германия (http://www.bgc-jena.mpg.de/service/iso_gas_lab/pmwiki/pmwiki.php/IsoLab/Co2InAir). В последние годы оптические анализаторы, позволяющие получать данные об отдельных изотопологах, стали значительно доступнее и используются в наши дни в повседневной работе. Многие из этих приборов могут обеспечивать получение изотопологических соотношений с воспроизводимостью около 0,05 ‰ для $\delta^{13}C$ атмосферного CO_2 и быть очень полезными для непрерывных измерений. В отличие от методов масс-спектрометрии, значения δ, полученные по таким приборам, зачастую рассчитываются по данным о соотношении индивидуально измеренных мольных долей с использованием табличных данных о величине линий поглощения, а не в результате прямых измерений стандартных образцов материалов. Какие-либо поправки, применяемые в методах масс-спектрометрии, например для изотопа ^{17}O или N_2O, вносить не требуется, но другие поправки, например на влияние других компонентов атмосферы и флуктуацию прибора, могут потребоваться, в зависимости от используемого метода расчета значений δ-изотопа по величине индивидуальных мольных долей. Важно знать совместимость между методами до того, как результаты измерений будут доведены до сведения широкой общественности.

Измерения изменений в соотношении O_2/N_2 в атмосфере полезно для определения источников и поглотителей CO_2 и проверки биогеохимических моделей для суши и океана. Относительная изменчивость в соотношении O_2/N_2 очень незначительная, но теперь она может наблюдаться с помощью, по крайней мере, шести аналитических методов. Эти методы можно сгруппировать в две категории: a) методы прямого измерения соотношения O_2/N_2 (масс-спектрометрия и газовая хроматография) и b) методы эффективного измерения мольной доли O_2 в сухом воздухе (интерференционный, парамагнитный, топливно-элементный, УФ-вакуумный, фотометрический). Появилось правило преобразования необработанных измерительных сигналов, независимо от метода измерения, в эквивалентные изменения мольного соотношения O_2 к N_2. Для типа измерений мольных долей требуется учитывать разбавление из-за изменчивости содержания CO_2 и возможно других газов. Если используется искусственный воздух в качестве эталонного материала, могут потребоваться поправки на различное соотношение Ar/N_2. В настоящее время во всем мире существует около 10 лабораторий, измеряющих соотношение O_2/N_2. Как правило, эталон O_2/N_2 связан с атмосферным воздухом, поступающим из газовых баллонов высокого давления. Поскольку отсутствует один общий источник эталонного материала, каждая лаборатория использует свой собственный эталон. В настоящее время нет центральной калибровочной лаборатории для O_2/N_2. В связи с этим не вызывает затруднений регистрировать значения по общей шкале, но несколько лабораторий фиксируют результаты измерений по локальной Скриппсовской шкале. Еще не придумали название этим вариантам.

Практика базирования измерений O_2/N_2 на атмосферном воздухе, который хранится в баллонах высокого давления, оказалась, как представляется, приемлемой для измерения изменений в фоновом воздухе, при условии, что баллоны хранятся в соответствии с определенными правилами, включая ориентирование баллонов горизонтально, чтобы свести к минимуму вероятности разделения содержимого на фракции в результате термического или гравитационного воздействия. Тем не менее, важной потребностью научного сообщества является более глубокое понимание источника изменчивости измеренных соотношений O_2/N_2, полученных в результате анализа проб из баллонов высокого давления. Отдельной потребностью является разработка абсолютных эталонов для калибровочных шкал O_2/N_2 до уровня 5 на мегабайт или выше.

Измерения содержания $^{14}CO_2$ в атмосфере обычно записываются обозначением $\Delta^{14}C$, означающим промильное отклонение от эталонного стандарта радиоактивного изотопа с поправкой на разделение на изотопные фракции углерода и на радиоактивный распад, произошедшие с момента отбора пробы. Для измерения $\Delta^{14}C$ в атмосферном CO_2 используются два основных метода отбора пробы: абсорбция большого объема CO_2 в основной раствор или молекулярным ситом и отбор пробы воздуха во флягу (обычно фляги бывают объемом 1,5–5 л). Используются два метода анализа: обычные радиоактивные измерения и ускорительная масс-спектрометрия. Современный уровень неопределенности измерений для $\Delta^{14}C$ в CO_2 составляет 2 ‰–5 ‰ и только в нескольких лабораториях этот показатель немного превышает 2 ‰. Рекомендации по калибровке представлены в публикации ВМО (WMO, 2016c).

Рекомендации по обеспечению качества измерений CO_2 (включая $\Delta^{14}C$, $\delta^{13}C$ и $\delta^{18}O$ в CO_2 и соотношения O_2/N_2) пересматриваются каждые два года на совещаниях ВМО/МАГАТЭ по двуокиси углерода, другим парниковым газам и соответствующим методам измерений. Отчет (WMO, 2016c) может быть использован в качестве последнего справочного материала в отношении калибровки и контроля качества измерений.

16.3.2 **Метан**

До недавнего времени измерения CH_4 проводились почти исключительно с применением пламенно-ионизационного детектора (ГХ-ПИД), и рекомендации относительно использования этих систем можно найти в Руководящих указаниях ГСА/ВМО по измерениям (WMO, 2009). В то же время доступные в продаже приборы, основанные на спектроскопических методах, таких как нисходящая спектроскопия внутри кольцевого резонатора (НСКР), внеосевая интегрированная спектроскопия выходного сигнала резонатора (ОА-ICOS) и ИК-спектроскопия поглощения с Фурье-преобразованием (ИКФП), стали широкодоступными и по средствам также. Было показано, что спектроскопические методы имеют ряд преимуществ по сравнению с методом ГХ-ПИД, что приведет к повышению точности измерений CH_4 в атмосфере (Zellweger et al., 2016). Однако эти методы также требуют калибровки (WMO, 2016*c*), и современная передовая практика рекомендует либо удалять водяной пар из потока пробного газа, либо тщательно определять его влияние на определение мольной доли для каждого отдельного прибора (Rella et al., 2013).

Альтернативным методом измерения CH_4 является отбор проб из фляги с последующим лабораторным анализом, весьма подобным подходу, описанному в 16.3.1 для CO_2.

16.3.3 **Закись азота**

За последние несколько десятилетий измерения закиси азота (N_2O) в атмосфере в основном проводились с использованием газовых хроматографов с детекторами электронного захвата (ГХ-ДЭЗ). Однако этот метод является крайне сложным для обнаружения небольших концентраций N_2O в тропосфере. ГХ-ДЭЗ являются сильно нелинейными и требуют значительного объема технического обслуживания.

Рекомендации в отношении измерений N_2O с использованием ГХ-ДЭЗ приведены в публикации по измерениям ГСА/ВМО (WMO, 2009), а рекомендации по калибровке и контролю качества приведены в публикации ВМО (2016*c*).

В последнее время для измерений N_2O стали коммерчески доступными спектроскопические анализаторы, включая высокоточные полостные абсорбционные спектрометры с лазерными источниками ближнего ИК-диапазона, ИКФП-анализаторы и анализаторы OA-ICOS с лазерными источниками излучения среднего ИК-диапазона. Эти методы обычно превосходят производительность систем ГХ-ДЭЗ, но достижение целей в области качества данных (WMO, 2016*c*) остается сложной задачей. Несколько полевых и лабораторных исследований (Lebegue et al., 2016; Vardag et al., 2014) показывают превосходные результаты и демонстрируют потенциал для замены методов ГХ. Однако необходимы дальнейшие исследования для оценки их долгосрочной применимости и определения оптимальных стратегий калибровки.

Сбор дискретных проб окружающего воздуха во фляги является альтернативным методом мониторинга N_2O. Фляги должны быть возвращены в центральную лабораторию для лабораторного анализа. Типичные частоты отбора проб – еженедельная или двухнедельная.

16.3.4 Галогенуглероды и SF_6

Галогенуглероды и SF_6 обычно измеряются почти непрерывно или активными методами дискретного пробоотбора воздуха. Руководящие материалы для измерения этих веществ еще формально не оформлены в рамках Программы ГСА, хотя некоторые рекомендации по калибровке предоставлены Всемирным центром калибровки для SF_6 (WMO, 2018).

SF_6 чаще всего измеряется с помощью методов ГХ-ЭЗД на том же самом канале, что и для N_2O. Аналитические методы описаны в публикации ВМО (WMO, 2015*e*).

Глобальные измерения галогенуглеродов в настоящее время проводятся НУОА и в рамках Расширенного эксперимента по глобальным атмосферным газам (AGAGE). История этих измерений, проводимых НУОА США и в рамках AGAGE, началась в конце 1970-х годов. Обе группы исследователей измеряют галогенуглероды с использованием методов ГХ-ЭЗД и газовой хроматографии с масс-спектрометрией (ГХ-МС). Измерение галогенуглеродов включает в себя измерение хлорфторуглеродов (ХФУ); гидрохлорфторуглеродов (ГХФУ); хлорсодержащих растворителей, таких как CCl_4 и CH_3CCl_3; галонов; гидрофторуглеродов (ГФУ); галоидметилов, NF_3 и SF_6. Для многих галогенуглеродов для измерения мольной доли в тропосфере требуется предварительное концентрирование. Группа AGAGE эксплуатирует сеть систем наблюдений *in situ*, в то время как НУОА США работает в области систем наблюдений *in situ* (для ограниченного числа газов) и программы на основе отбора проб во фляги. Для дополнительной информации о приборах и местах отбора проб см.: http://agage.eas.gatech.edu, http://www.esrl.noaa.gov/gmd/hats/. Эталонные газы поддерживаются как Группой AGAGE, так и НУОА США, а индивидуальные шкалы регулярно сравниваются.

16.3.5 Дистанционное зондирование парниковых газов

Существует несколько методик, используемых для дистанционного зондирования парниковых газов (ПГ). Сеть наблюдений за содержанием углерода в вертикальном столбе атмосферы (https://tccon-wiki.caltech.edu/) является наземной сетью спектрометров с Фурье-преобразованием, регистрирующих спектральные характеристики прямой солнечной радиации в ближнем ИК спектральном диапазоне. По этим спектральным характеристикам находятся осредненные по вертикальному столбу атмосферы значения относительного содержания CO_2, CH_4, N_2O, HF, CO, H_2O и HDO. Наблюдения в ближнем ИК спектральном диапазоне (сеть ССОИСА, https://www2.acom.ucar.edu/irwg) позволяют проводить с высокой точностью измерения осредненного относительного содержания в столбе воздуха CH_4, N_2O и CO.

16.4 ХИМИЧЕСКИ АКТИВНЫЕ ГАЗЫ

Химически активные газы, изучаемые в рамках Программы ГСА, включают в себя тропосферный озон, моноксид углерода, летучие органические соединения (ЛОС), оксидированные азотосодержащие соединения и двуокись серы. Все эти соединения играют большую роль в химическом составе атмосферы и сами по себе активно участвуют во взаимодействиях между химическими процессами в атмосфере и климатическими условиями либо через регулирование озона и потенциала окисления атмосферы, либо образование аэрозолей. Глобальный охват с точки зрения наблюдений совершенно неудовлетворителен для большинства из них, за единственным исключением в отношении измерения приземного озона и CO (Schultz et al., 2015).

В группе химически активных газов используются различные методы измерения и аналитические стандарты. Для более стабильных газов эталонный материал может быть подготовлен в баллоне, заполненном воздухом или другой матрицей с известной мольной долей газа (например, CO_2, неметановыми гидроуглеродами и терпенами), в то время как для других (например, озон) можно использовать только эталонные методы/приборы.

16.4.1 Тропосферный (приземный) озон

Подробные методические указания по измерению тропосферного озона (приземный озон является частью тропосферного озона, измеряемого на поверхности Земли) приводятся в публикации ВМО (WMO, 2013).

Мольная доля, наиболее подходящая для химической и физической интерпретации измерений озона, соответствует мольной доле озона в сухом воздухе. Однако измерения озона обычно проводятся без сушки пробы воздуха, поскольку еще не разработана эффективная система для сушки воздуха при сохранении в воздухе содержания озона без изменений. Рекомендуется, чтобы измерения озона сопровождались измерениями мольной доли водяного пара с достаточной точностью для того, чтобы измерения озона могли быть преобразованы в мольные доли в сухом воздухе без потери точности.

Для измерения озона в фоновой атмосфере используется несколько методов. Они включают в себя:

a) методы УФ-поглощения;

b) хемилюминесцентные методы;

c) электрохимические методы;

d) нисходящая спектроскопия внутри кольцевого резонатора (НСКР) с титрированием NO;

e) дифференциальная оптическая абсорбционная спектроскопия (ДОАС);

f) многоосная дифференциальная оптическая абсорбционная спектроскопия (МоДОАС);

g) Лидарное измерение тропосферного озона.

Из-за своей высокой безошибочности и точности, низкого порога чувствительности, достаточного временного разрешения и легкости в работе (почти нет расходных материалов), метод УФ-поглощения рекомендован к использованию для стандартных измерений приземного озона на всех станциях ГСА.

Обзор методов измерений, наряду с информацией об их применимости для использования на станциях ГСА, представлен в публикации ВМО (WMO, 2013). Обратите внимание, что только методы с (a) по (d) (проводимые на месте) могут быть прослежены с помощью цепочки калибровок до основного эталона, как рекомендовано ГСА.

Дифференциальная оптическая абсорбционная спектроскопия (ДОАС) представляет собой метод наземного дистанционного зондирования, который подходит для наблюдений за несколькими веществами, присутствующими в атмосфере в очень малых количествах. Прибор состоит из источника света, оптического тракта в открытой окружающей атмосфере длиной обычно от 100 м до нескольких км, лазерного отражателя и спектрометра с телескопом, которые размещены в одном корпусе вместе с источником света. Спектрометр осуществляет наблюдение за источником света через лазерный отражатель. Система ДОАС использует закон Бирса для определения концентрации озона (осредненное значение по оптическому тракту). В принципе ДОАС должен быть прецизионным методом, но это не совсем так из-за неспособности этой системы правильно измерять точное нулевое значение и определять вклад других газов и аэрозолей, абсорбирующих УФ-излучение, в наблюдаемый сигнал. ДОАС можно использовать в качестве экспериментального метода (Platt and Stutz, 2008).

Многоосная дифференциальная оптическая абсорбционная спектроскопия (МоДОАС) также представляет собой метод наземного дистанционного зондирования, который подходит для наблюдений за несколькими веществами, присутствующими в атмосфере в очень малых количествах. Наряду с тем, что этот метод подходит для стратосферного мониторинга, он также применим для измерений профиля малых газовых составляющих атмосферы в верхних и нижних слоях тропосферы. Однако из-за процедур восстановления и возможной тропосферной интерференции, более сложных в нижних слоях атмосферы, этот метод требует очень опытного персонала для расчета мольных долей соответствующих малых газовых составляющих атмосферы на основе извлечения информации из разнообразных спектральных характеристик. Измерения методом МоДОАС озона, диоксида азота, формальдегида, моноксида брома (BrO) и других веществ рекомендовано особенно для обеспечения связи между наземными и спутниковыми измерениями на выборочных станциях ГСА с расширенными программами исследований (Hönninger et al., 2004).

Лидарный метод представляет собой наземное дистанционное зондирование для наблюдений за несколькими веществами, присутствующими в атмосфере в очень малых количествах. Для измерений тропосферного озона лидар чаще всего использует две длины волны или более в диапазоне между 266 нм и 295 нм (Kuang et al., 2013). Выбранные длины волн короче, чем волны, используемые для обнаружения стратосферного озона (в основном, между 308 и 353 нм). По сравнению с измерениями в стратосфере, в тропосфере необходимо иметь более высокую эффективность абсорбции озона для того, чтобы получить достаточную чувствительность при более низком коэффициенте смешения озона в тропосфере. Слишком сильная абсорбция означает, что большая часть световой энергии будет поглощена на низких высотах, что существенно затруднит получение измерительных сигналов, поступающих с больших высот. Главной технической проблемой является экстремальный динамический диапазон сигнала обратного рассеяния в тропосфере (несколько десятков на несколько километров высоты). Лидарные измерения тропосферного озона рекомендованы особенно для обеспечения связи между наземными и спутниковыми измерениями на выборочных станциях ГСА с расширенными программами исследований.

16.4.2 **Моноксид углерода**

Подробные методические указания по измерениям CO представлены в публикации ВМО (WMO, 2010). Шкала калибровки CO пересчитывается каждые два года вместе со шкалами основных парниковых газов (WMO, 2016*c*). Самую последнюю калибровочную шкалу можно найти на веб-странице Центральной калибровочной лаборатории (https://www.esrl.noaa.gov/gmd/ccl/).

Измерения CO можно проводить как в полевых условиях, так и с отбором проб воздуха во фляги с последующим анализом в лаборатории. Непрерывные измерения *in situ* предоставляют информацию об изменчивости CO во временном масштабе от секунд до одного часа, в зависимости от метода измерения. В отличие от отбора проб во фляги, непрерывные измерения позволяют поставлять данные почти в реальном времени.

Наблюдения *in situ* можно проводить с использованием большого разнообразия аналитических методов. Недисперсионная инфракрасная радиометрия (НДИР) основана на спектральной абсорбции на волне 4,7 мкм. Она часто используется для мониторинга загрязнения воздуха, а иногда и для непрерывных измерений в удаленных местах; однако дрейф нуля прибора, ограниченная точность измерений и длительное время усреднения являются факторами, ограничивающими достижимое качество данных. Газовая хроматография (ГХ) в паре с рядом различных детекторов (таких как ГХ-ПИД или детектор горячего восстановления оксида ртути/УФ-абсорбции (ГХ-HgO)) может обеспечить высокоточные и адекватные пределы детектирования. Детектор на основе восстановления HgO имеет свойство стремиться к нелинейному отклику атмосферного CO и требует тщательной, многократной и многоточечной характеризации отклика детектора. Метод ГХ-ПИД требует каталитической конверсии CO в CH_4. Для уверенности в результатах необходимо определять на регулярной основе эффективность каталитической конверсии, что затрудняет надлежащее техническое обслуживание, калибровку приборов и обеспечения точных измерений. Измерения методом ГХ по своей природе являются квазинепрерывными и поэтому этим методом нельзя определять быстрые изменения мольных долей, которые могут быть зафиксированы с помощью высокочастотных измерений.

В последние годы появилось много альтернативных методов. К ним относятся резонансная флуоресценция CO (индуцируемая высокочастотным разрядом) в вакуумном УФ-диапазоне; спектроскопические методы, основанные на НСКР, спектроскопия квантового каскадного лазера (ККЛ) и спектроскопия поглощения ИКФП. Метод НСКР работает с использованием лазеров в ближнем ИК-диапазоне и ранее в основном использовался для измерений диоксида углерода, метана и аммиака. Метод ККЛ измеряет в среднем ИК-диапазоне, и доступны коммерческие приборы, которые могут определять как CO, так и N_2O с помощью одного лазера. Обзор эффективности большинства аналитических методов можно найти в Zellweger et al. (2009, 2012).

Дистанционное зондирование столба CO с земли осуществляется Сетью наблюдений за полным углеродным столбом (http://www.tccon.caltech.edu/) с использованием спектрометров с преобразованием Фурье на поверхности в ближней ИК-области спектра (Wunch et al., 2010).

16.4.3 Летучие органические соединения

Измерение ЛОС является сложной задачей из-за присутствия в атмосфере множества различных молекул. В то время как систематические исследования многих этих веществ важны для изучения качества воздуха, низкие концентрации ЛОС вдали от источника их выброса приводят к тому, что только несколько молекул может быть обнаружено при измерении в фоновой атмосфере. В таблице 16.1 представлен базовый набор молекул, рекомендованных для измерения в Программе ГСА с использованием предложенных методов измерения.

Методические указания по измерениям ЛОС в настоящее время разрабатываются в сотрудничестве с сетью ACTRIS. Стандартные оперативные процедуры (СОП) отбора проб воздуха в канистру из нержавеющей стали описаны в публикации ВМО (WMO, 2012). Рекомендации общего характера по измерениям ЛОС приводятся в публикации ВМО (WMO, 2007). На регулярно проводимых семинарах ГСА по ЛОС рассматривается состояние дел с измерением ЛОС в Программе ГСА и вырабатываются дальнейшие методические указания по методике измерений, обеспечению качества и газовым эталонам.

Таблица 16.1. Перечень приоритетных ЛОС в Программе ГСА

Молекула	*Время жизни (при условии, что концентрация OH составляет 10^6 см$^{-3}$)*	*Важность для ГСА*	*Стальная фляга*[a]	*Стеклянная фляга*	*Метод анализа*[b]
1. Этан	1,5 месяца	– Трассер выбросов ископаемого топлива – Природные источники – Сжигание биомассы – Ископаемое топливо – Тенденция в размере сезонного цикла – Индикатор химии галогенов	✓	✓	ГХ-ПИД
2. Пропан	11 суток	– Трассер выбросов ископаемого топлива– Сжигание биомассы	✓	✓	ГХ-ПИД
3. Ацетилен	15 суток	– Трассер выбросов автомобиля – Трассер сжигания биомассы – Соотношения с другими углеводородами	✓	✓	ГХ-ПИД
4. Изопрен	3 часа	– Продукт биосферы – Чувствителен к температуре/суше – Используется для изменения климата – Прекурсор O_3 – Окислительная способность – Прекурсор формальдегида	?	?	ГХ-ПИД РПП-МС
5. Формальдегид	1 сутки	– Индикатор окисления изопрена – Сжигание биомассы – Сравнение со спутниковыми данными	–	–	ДОАС
6. Терпены	1–5 часов	– Прекурсоры органических аэрозолей	–	–	ГХ-МС РПП-МС
7. Ацетонитрил	0,5–1 год	– Индикатор сжигания биомассы – Индикатор сжигания биотоплива	–	?	ГХ-МС РПП-МС
8. Метанол	12 суток	– Источники в биосфере (окисление метана) – Распространенные продукты окисления	–	?	ГХ-ПИД РПП-МС
9. Этанол	4 суток	– Трассер использования альтернативного топлива	–	?	ГХ-ПИД РПП-МС
10. Ацетон	1,7 месяцев	– Распространенные продукты окисления – Источник свободных радикалов в верхних слоях тропосферы	?	?	ГХ-ПИД РПП-МС
11. Демитилсульфид	2 суток	– Главный природный источник серы – Прекурсор сульфатного аэрозоля – Трассер морской биопродуктивности	?	?	ГХ-ПИД РПП-МС

Молекула	*Время жизни (при условии, что концентрация OH составляет 10^6 см$^{-3}$)*	*Важность для ГСА*	*Стальная фляга*[a]	*Стеклянная фляга*	*Метод анализа*[b]
12. Бензин	10 суток	– Трассер окисления в результате горения – Индикатор сжигания биомассы	✓	?	ГХ-ПИД ГХ-МС
13. Толуол	2 суток	– Соотношение с бензином, используемым для определения возраста воздушной массы – Прекурсор взвешенных микрочастиц	–	?	ГХ-ПИД ГХ-МС
14. Изо/нормальный бутан	5 суток	– Индикатор химической обработки – Время жизни/продуцирование озона	✓	✓	ГХ-ПИД ГХ-МС
15. Изо/нормальный пентан	3 суток	– Соотношение обеспечивает воздействие химических свойств NO_3 и источников нефти и природного газа	✓	✓	ГХ-ПИД ГХ-МС

Примечания:

a «✓» указывает на состояние современной практики, «–» означает, что не измеряется во флягах (только измерения в режиме онлайн), в то время как «?» означает, что стабильность во флягах не очень хорошо известна

b ГХ-ПИД = газовая хроматография с пламенно-ионизационным детектором; ГХ-МС = газовая хроматография с масс-спектрометрией; ДОАС = дифференциальная оптическая абсорбционная спектроскопия; РПП-МС = масс-спектрометрия реакции переноса протонов

Измерения низкомолекулярных алифатических и ароматических углеводородов (C2–C9) проводятся успешно в течение многих лет, преимущественно в краткосрочных региональных экспериментах. ГХ-ПИД является предпочтительным аналитическим методом для этих веществ, которые включают в себя молекулы 1–4 и 12–15 из таблицы 16.1. Пробы воздуха, взятые из фляг или в полевых условиях, обычно предварительно выпаривают с использованием криогенного метода или твердых адсорбентов. Другим методом является ГХ-МС. Хотя потенциально ГХ-МС метод более чувствительный, он, как правило, больше подвержен аналитическим неопределенностям (изменение со временем характеристик прибора, регистрация одинаковых фрагментов с небольшой массой). Тем не менее, ГХ-МС может быть успешно использован для регистрации определенных углеводородов в очень удаленных местах, где фоновые уровни могут быть ниже предела детектирования обычного ГХ-МС.

ГХ-МС является рекомендованным аналитическим методом для монотерпенов. Хотя некоторые терпены можно измерять с помощью ПИД, сложность проведения хроматографического анализа (совместно элюированные пики, особенно с ароматическими соединениями) делает затруднительным идентификацию пика и получение количественных характеристик. ГХ-МС метод дает лучшую чувствительность.

Окисленные углеводороды, включающие в себя целевые компоненты 8–10 (таблица 16.1), могут измеряться с использованием ГХ-ПИД или ГХ-МС. Следует уделять особое внимание подготовке пробы (включая удаление воды), и впускные системы должны быть сконструированы таким образом, чтобы минимизировать потери артефактов и компонентов, с которыми обычно сталкиваются при окислительном анализе. Ацетон и метанол также можно измерять с помощью масс-спектрометрии реакции переноса протонов (РПП-МС). Преимуществом РПП-МС метода является то, что это интерактивный метод, который не требует предварительного выпаривания пробы. Однако он менее чувствителен, чем ГХ методы, и существуют потенциальные интерференции от изобарических составляющих атмосферы, таких как O_2H^+ и метанол. Поскольку стабильность окисленных ЛОС в выборочных пробах (фляги из нержавеющей стали или стекла) остается весьма неопределенной, предлагается измерять эти вещества, главным образом, интерактивным методом на выборочных станциях наземных измерений. Сообщалось об успешном хранении ацетона в определенных флягах, поэтому следует изучить возможности проведения анализа этого вещества на сети, использующей фляги из нержавеющей стали или стекла.

Формальдегид (HCHO) не остается стабильным во фляге, поэтому его необходимо измерять в полевых условиях. Методы анализа включают в себя флюорометрический метод Ганча (жидкие реактивы) (Nash, 1953) или ДОАС. Оба метода относительно сложные и требуют обучения специалистами потенциальных операторов приборов. Поэтому маловероятна возможность проведения измерений более, чем на нескольких наземных станциях. Формальдегид обычно регистрируется спутниками. Спутниковые данные позволяют получить общее содержание вещества в вертикальном столбе атмосферы, и важной задачей Программы ГСА является обеспечение периодических приземных измерений в выборочных местах для целей проведения сравнений/калибровки (наземной привязки).

Осуществимость измерений HCHO с помощью РПП-МС (Wisthaler et al., 2008; Warneke et al., 2011) и квантово-каскадного лазера (ККЛ=QCL) (Herndon et al., 2007) была показана во время ограниченного числа экспериментальных измерений. Их применимость для измерений HCHO на долгосрочной основе еще не была протестирована.

Ацетонитрил предпочтительно измерять с помощью ГХ-МС, потому что это вещество относительно нечувствительно к ПИД-детектированию. Измерения ацетонитрила также проводились с использованием различных детекторов на основе восстановленного газа и точно определенного азота. Многие недавние результаты атмосферных измерений ацетонитрила были получены с помощью РПП-МС или масс-спектрометрии с химической ионизацией при атмосферном давлении (АД-МСХИ). Стабильность ацетонитрила в

отобранных пробах весьма неопределенная, поэтому отбор проб во фляги неприемлем в рамках ГСА, и проведение измерений может быть ограничено несколькими станциями, на которых проводятся комплексные измерения.

Диметрилсульфид (ДМС) может быть измерен с помощью ГХ-ПИД, газовой хроматографии (ГХ) с пламенно-фотометрическим детектором (ГХ-ПФД), ГХ-МС и РПП-МС. Тем не менее, поскольку концентрации ДМС можно измерять по стандартной методике в рамках проведения стандартного анализа неметановых углеводородов, ГХ-ПИД-анализ всего объема пробы воздуха мог бы быть самым простым выбором в рамках стратегии измерений. В научной литературе отмечены случаи, когда ДМС оставался стабильным в определенных флягах, поэтому вполне возможно его измерение как компонента в рамках сети, использующей отбор проб во фляги. Желательно также проводить измерения ДМС в полевых условиях, по крайней мере, на начальной стадии работы сети, использующей отбор проб во фляги, для того чтобы обеспечить совместимость методов.

16.4.4 **Оксид азота**

Сочетание оксида азота (NO) и двуокиси азота (NO_2) традиционно называется NO_x. Сочетание всех оксидов азота со степенью окисления больше 1 называется NO_y. Их измерение в глобальной атмосфере имеет большое значение, поскольку NO оказывает воздействие как на озон, так и на гидроксильный радикал (OH). NO_2 сейчас измеряется со спутников в глобальном масштабе, и эти измерения показывают, что существенные концентрации этого газа присутствуют над большинством континентов. Огромные запасы связанного азота в виде NO_y содержатся в атмосфере. Воздействие выпадения этого запаса на биосферу недостаточно изучено в настоящее время, но оно может быть значительным.

Измерения оксида азота NO и NO_2 можно проводить с помощью пассивного, активного и дистанционного методов. Активные методы можно разделить на методы с интегрированием по времени и методы измерений на месте: методы с интегрированием по времени состоят из этапа отбора проб, обычно включающего сбор жидкофазных проб, и последующий автономный анализ, в то время как полевые (непрерывные) измерения непосредственно анализируют пробу воздуха. Пассивные методы всегда являются интегрирующими по времени. Активные интегрирующие методы состоят из метода Зальцмана и связанных с ним методов, подобных методу Гриса или йодид-натриевому методу. Последний метод используется, например, на сети станций Совместной программы мониторинга и оценки переноса загрязняющих воздух веществ на большие расстояния в Европе (ЕМЕП, http://www.emep.int). Из-за высокой химической активности и нестабильности NO_x невозможно использовать отбор проб во фляги.

Обусловленный озоном хемилюминесцентный детекторный анализ является самым распространенным полевым методом. Эти приборы обычно очень чувствительны к NO; однако они не могут измерять NO_2. Таким образом, NO_2 должен быть превращен в NO до начала измерения. Прибор делает измерения в режиме NO и затем в режиме NO + NO_2. Разница, после тщательного определения коэффициента преобразования, показывает соотношение компонентов смеси NO_2. Таким образом, во время проведения последовательных измерений NO и NO_x рекомендуется добиваться высокого временного разрешения (< 10 мин) для того, чтобы обеспечить отбор проб из одной и той же воздушной массы. Превращение NO_2 в NO достигается фотолизом NO_2 на длине волны $320 < \lambda < 420$ нм с использованием фотолитической реакции преобразования (ФРП) под дуговой лампой или ультрафиолетовым преобразователем со светоизлучающими диодами (LED). К преимуществам LED относятся их существенно более продолжительное время жизни и почти постоянная эффективность преобразования, механическая простота и простые эксплуатационные (вкл./выкл.) характеристики светодиодов (нет дополнительных клапанов/мертвых объемов). В зависимости от выбранного светодиода эффективность преобразования может быть меньше или даже больше, чем при использовании фотолитического преобразователя. Тем не менее, необходимо учитывать и характеризовать спектральный диапазон новых преобразователей на основе LED и

температурные эффекты, чтобы предотвратить артефакты, вызванные азотистой кислотой и пероксиацетилнитратом. При тщательном выборе рекомендуется использовать УФ-светодиодные преобразователи для измерения NO_2 на станциях ГСА.

Использование молибденовых преобразователей для превращения NO_2 в NO определенно разочаровывает, поскольку этот метод преобразования не избирателен к NO_2, а преобразует также другие оксиды азота в различных количествах. Уже имеющиеся результаты измерений с использованием молибденовых (Mo) преобразователей следует помечать обозначением $NO_{2(Mo)}$ или NO_{2+}.

Подробные методические указания по измерению химически активного азота в настоящее время разрабатываются в сотрудничестве с сетью ACTRIS. Основное внимание здесь уделяется точечным измерениям NO и NO_2, поскольку их измерения в настоящее время являются более обширными и надежными и позволяют внедрить завершенную систему обеспечения качества (ОК). Рекомендации по измерениям NO и NO_2 можно найти в публикации ВМО (WMO, 2017*b*).

Метод люминол-ХМД (Kelly et al., 1990) измеряет NO_2 непосредственно, а NO опосредованно после окисления. Поскольку чувствительность сильно зависит от качества раствора люминола, которое снижается в процессе использования и старения (окисления), необходимо часто проводить повторную калибровку.

В дополнение к этим методам были разработаны методики обнаружения NO_2 с помощью методов оптического поглощения, включая перестраиваемую спектроскопию с адаптивным диодным лазером, дифференциальную оптическую абсорбционную спектроскопию (ДОАС), лазерно-индуцированную флуоресценцию, абсорбционную спектроскопию (ИКФП) и нисходящую спектроскопию внутри кольцевого резонатора (НСКР). Все они позволяют измерять NO_2 напрямую. Последние разработки в области ИКФП для измерения NO_2 и NO как NO_2 после окисления озоном показывают неплохие результаты, но измерения все еще допускают неопределенности на нулевом уровне.

Недавно была продемонстрирована (Tuzson et al., 2013) приемлемость применения квантово-каскадного лазера (ККЛ) исследовательского типа для непрерывных и прямых измерений NO и NO_2. В будущем этот метод может стать альтернативным стандартным методом.

Не так давно также стали коммерчески доступными мониторы с резонатором ослабленного фазного смещения. Проведенный эксперимент по взаимному сравнению на сети ACTRIS показал превосходные результаты. Однако текущий нижний предел обнаружения в несколько десятков ppt делает этот метод подходящим как для измерений в сельской местности, так и для участков, подверженных антропогенному воздействию (Ge et al., 2013), но не полностью подходящим для удаленных мест с обычной мольной долей NO_2 ниже 50 ppt. Кроме того, калибровка специальных детекторов NO_2 остается сложной задачей, поскольку известно, что эталонные газы с содержанием NO_2 в окружающей среде в баллонах высокого давления подвержены нестабильности.

В настоящее время не существует зрелой методики точечных измерений, которая могла бы конкурировать с хемилюминесцентным обнаружением NO, вызванным озоном, в удаленных местах. Пассивные и активные методы с интегрированием по времени не применяются в Программе ГСА из-за их слабой избирательности и временного разрешения.

Более подробную информацию о процедурах стандартных операций можно найти по адресу: http://actris.nilu.no/Content/?pageid = 68159644c2c04d648ce41536297f5b93.

В настоящее время развиваются методы наземного дистанционного зондирования для NO_2 в целях более оперативного использования и четкого определения неопределенностей в рамках ACTRIS. Приборы MaxDOAS все чаще используются для измерений вертикального профиля, ИКПФ и в УФ- и видимой областях спектра также для получения информации о содержании NO_2 в вертикальном столбе атмосферы.

16.4.5 Двуокись серы

Методические указания по измерению SO_2 пока не существуют в Программе ГСА. Общие рекомендации приведены в публикации ВМО (WMO, 2001). Однако Научно-консультативная группа ГСА по химически активным газам планирует создать такую же систему обеспечения качества для SO_2 (включая методические указания по измерениям и центральным учреждениям), какую она собирается создать в настоящее время для оксидов азота, после того, как этот вопрос будет решен.

Существуют различные методы определения содержания SO_2 в атмосфере. ЕМЕП использует интегрирующие методы, такие как импрегнированный щелочью фильтр (пакет) или нанесенный на поверхность кольцевой разлагатель; оба метода используют ионную хроматографию в центральной лаборатории. Эти методы потенциально обеспечивают более точные результаты, но с временным разрешением — обычно одна проба в день, что типично для интегрирующих методов. Кроме того, они требуют постоянного внимания, и расходы на персонал для анализа фильтров довольно высокие.

В группе измерений *in situ* широко используются методы ТСМ (фотометрия после реакции SO_2 с тетрахлормеркуратом) и методы импульсной флуоресценции. Методы ТСМ имеют высокую точность, но и высокий нижний предел обнаружения, а работа с ртутью в лаборатории может быть вредной. Несмотря на то, что реакция датчика импульсной флуоресценции медленнее, его простота калибровки, функциональная надежность, точность и специфичность SO_2 делают его предпочтительным. Имеются также более чувствительные методы газовой хроматографии (ГХ). Однако они требуют значительных специальных технических знаний и постоянного внимания. Для повышения чувствительности некоторые флуоресцентные анализаторы оснащены более избирательными фильтрами возбуждения. Например, последовательно соединяются два зеркальных узла и применяются специально подобранные ФМТ. Могут вноситься численные поправки на интерферирующие вещества, однако в сельских или удаленных районах в этом нет необходимости. Типичный нижний предел обнаружения, который может быть достигнут с помощью этих положений, составляет около 50 ppt. Дальнейшее повышение чувствительности может быть возможно с помощью второго канала, в котором удаляется только SO_2, что приводит к крайне специфическому считыванию после субтракции обоих каналов.

Поскольку SO_2 имеет короткое время жизни в атмосфере, понимание цикла серы требует знаний о характеристиках источников выброса и поглощения. Это условие лучше всего выполняется при дискретизации отбора проб воздуха менее 1 часа. Поэтому лучшим методом для долгосрочного мониторинга SO_2 на сегодняшний день является комбинация из импульсного флуоресцентного анализатора и отбора проб с фильтра. Пробы воздуха для анализа с помощью фильтров должны отбираться через определенные интервалы времени, однако достаточно часто, чтобы служить средством контроля качества для постоянно действующего анализатора.

Более подробные рекомендации можно найти в публикации ЕМЕП (EMEP, 2014), размещенной на сайте: http://www.nilu.no/projects/ccc/manual/index.html.

16.4.6 Молекулярный водород

Подробные методические указания для измерения молекулярного водорода в настоящее время не существуют в Программе ГСА.

Результаты измерений молекулярного водорода выражаются в сухой мольной доле по самой последней шкале (WMO, 2016*c*). Измерения H_2 можно проводить как *in situ*, так и с отбором проб во фляги и последующим анализом в лаборатории. Пример установки измерительной системы на глобальных станциях ГСА приведен в работе Гранта (Grant et al., 2010).

Измерения молекулярного водорода производятся с помощью газовой хроматографии с последующим обнаружением горячего восстановления оксида ртути/поглощения УФ-излучения. Альтернативная установка газовой хроматографии с детекторами импульсного разряда имеет более линейный отклик детектора и обеспечивает лучшую повторяемость измерений молекулярного водорода (Novelli et al., 2009).

Часто возникали проблемы с нестабильностью H_2 в эталонных газах (Jordan and Steinberg, 2011). Поэтому следует сверяться с рекомендациями по калибровке и обеспечению качества, изложенными в публикации ВМО (WMO, 2016*c*).

16.5 АТМОСФЕРНЫЕ ВЛАЖНЫЕ ВЫПАДЕНИЯ

Атмосферные влажные выпадения относятся к газам и частицам, выпадающим вместе с осадками на поверхность Земли. Эти газы и частицы имеют очень разнообразные источники и состав и, в основном, представлены в следовом количестве в атмосфере и осадках. Эти следовые вещества захватываются осадками в процессе их формирования в атмосфере и последующего выпадения на земную поверхность. Выпавшие вещества формируют важный вклад в массовый баланс загрязняющих веществ, связанных с переносом на большие расстояния. Эти вещества не только влияют на химический состав осадков, но также оказывают влияние на химический состав наземных и водных поверхностей, на которые они выпадают. Воздействия могут быть вредными или благоприятными, и они могут быть или непосредственными либо опосредованными. Например, кислотные влажные выпадения являются экологической проблемой, возникающей в результате сжигания ископаемого топлива. Это происходит, когда окислы серы и азота, выброшенные в процессе горения, трансформируются в атмосфере и превращаются в осадках в кислотообразующие сульфаты и нитраты. К другим веществам в следовых количествах, входящим во влажные выпадения, относятся морская соль, биогенные вещества, химические вещества из частичек почвы, токсичные органические и неорганические химические вещества, органические кислоты и тому подобное. Исследования показали, что некоторые химические вещества во влажных выпадениях могут стимулировать производство морских биотических веществ, потенциально связывая атмосферные влажные выпадения с углеродным циклом и изменением климата.

Измерение химического состава осадков говорит нам о том, какие микропримеси присутствуют во влажном выпадении и в каких количествах. Эта информация может быть использована для оценки качества воздуха, а также для выявления и отслеживания изменений в выбросах газов и твердых частиц в атмосферу. Иными словами, измерения химического состава осадков предоставляют информацию об обмене веществами в следовых количествах между атмосферой и сушей/океанами и, следовательно, важны для углубления нашего понимания химических циклов этих веществ, особенно тех, которые могут привести к нанесению ущерба наземным и водным системам или повлиять на наш климат.

Необходимо проявлять особую осторожность при планировании измерений химического состава осадков для того, чтобы обеспечить их репрезентативность. Хотя измерения проводятся в определенном месте, в среднем они должны представлять измерения, сделанные в прилегающих районах. В целом, место отбора проб должно отражать особенности землепользования в этом районе. Например, место отбора проб в районе, где преобладает сельскохозяйственная деятельность, должно иметь сельскохозяйственную окружающую обстановку. Это качество пространственной репрезентативности должно простираться на все сезоны и даже на годы вперед. В идеале место должно быть репрезентативным в отношении и пространства, и времени. Загрязнение локального характера от источников сельскохозяйственной, промышленной или другой человеческой деятельности должно быть исключено также, как и локальное воздействие природных источников, например, океанических берегов, вулканов или фумарол. Отбор проб не должен подвергаться воздействию деревьев или другой растительности, а топография места отбора проб должна соответствовать уровню и экспозиции, относительно не подверженным влиянию преобладающих ветров, которые могут привести к

нерепрезентативным результатам сбора дождевых осадков и снега. Следует также избегать контакта человека с пробами или контакта с чем бы то ни было, что могло бы изменить химический состав взятой пробы. Обеспечение репрезентативных измерений химического состава осадков подразумевает строгое выполнение требований, предъявляемых к месту отбора проб, условиям на этой площадке, установке приборов и оборудования, рабочим протоколам и к поддержанию площадки в рабочем состоянии. Эти требования перечислены в публикации ВМО (WMO, 2004*a*).

Мониторинг химического состава атмосферных осадков можно разделить на деятельность по отбору проб и проведению химического анализа.

16.5.1 **Отбор проб**

Главной задачей Программы ГСА по химическому составу осадков является отбор проб только влажных выпадений. Это означает, что пробы берутся только во время осадков, и вещества в следовых количествах оказываются в пробах только благодаря выпадению осадков. Следовые материалы от пыли, мелких частиц или газов, оседающих в сухую погоду, исключаются. Это позволяет изучать химический состав осадков без загрязнения в результате сухого осаждения. Что еще более важно, оборудование и методы для сбора репрезентативных проб влажных выпадений не подходят для сбора репрезентативных проб сухого осаждения. Физические и химические процессы, влияющие на влажные и сухие выпадения, существенно различаются.

Лучший способ обеспечить сбор только влажных проб заключается в использовании автоматического пробоотборника, который открывается только во время выпадения осадков. Типичный автоматический пробоотборник только для влажных выпадений имеет следующие компоненты: контейнер для проб осадков (воронка-сосуд, ведро и др.); крышка, которая открывается и закрывается над приемным отверстием контейнера; датчик осадков; электроприводной механизм с соответствующим электронным управлением и конструкция, поддерживающая корпус прибора с размещенными в нем компонентами. Контейнеры должны иметь достаточный объем для накопления всех осадков, собранных в течение периода сбора проб. Рекомендованы системы, которые могут быть вручную активированы для тестирования, чистки и повседневного обслуживания прибора. Модульная конструкция, позволяющая удалять отдельные компоненты, например датчик, облегчает быстрый ремонт с минимальными средствами и специализированными знаниями. Альтернативой использованию автоматического пробоотборника является отбор проб вручную путем открытия контейнера для проб в самом начале выпадения осадков и его закрытия, как только осадки прекратились. Это требует неустанного круглосуточного дежурства наблюдателя за условиями погоды и как следствие, ручной отбор проб является весьма трудоемким.

В дополнение к отбору проб только влажных выпадений Программа ГСА по химииосадков требует на каждой станции измерять количество выпавших осадков, используя стандартный осадкомер, одобренный к использованию НМГС или эквивалентным ей органом (см. настоящий том, глава 6). Предпочтительнее использовать ручные осадкомеры. Величина выпавших осадков используется для расчета массы химического вещества, выпавшего с осадками на определенную площадь поверхности земли (называется поток или нагрузка влажных выпадений). Стандартные осадкомеры призваны быть самыми точными и репрезентативными средствами измерения количества выпавших осадков. Таким образом, каждая станция должна проводить наблюдения с помощью осадкомера параллельно со своим пробоотборником для химического состава осадков. Объемы пробоотборников для химического состава осадков используются для расчета потоков влажных выпадений только, когда стандартный осадкомер сломался или временно не обслуживается для измерений. В таких случаях в журнале наблюдений это должно быть задокументировано соответствующей записью.

Наивысшим приоритетом Программы ГСА по химическому составу осадков является отбор проб только влажных выпадений ежесуточно (24 ч) с отбором проб в установленное время каждодневно, предпочтительно в 09:00 по местному времени. В случае если не хватает

ресурсов для отбора и анализа ежедневных проб, периоды пробоотбора раз в несколько дней с дискретностью до одной недели являются следующим наивысшим приоритетом. Альтернативные протоколы пробоотбора описаны в публикации ВМО (WMO, 2004*a*). Ежедневный отбор проб сокращает потенциальные возможности для деградации неустойчивых химических веществ и для других физических и химических изменений в пробе, пока она содержится в полевом пробоотборнике. От протокола ежесуточного отбора проб с меньшей долей вероятности может пострадать не только чистота пробы, но и полученные данные также имеют большую ценность. Анализы траекторий штормов и модели источник-рецептор значительно менее сложные, когда осадки вероятнее всего выпали в результате одного явления или шторма. Значительно более вероятно, что многодневные или еженедельные пробы содержат осадки от нескольких штормов, каждый из которых развивается в различных метеорологических условиях. К тому же суточные данные могут быть математически интегрированы для определения средних значений за неделю или за более продолжительный период, но еженедельные данные не могут быть дифференцированы в суточные компоненты без существенных ограничений.

Контейнеры, используемые для сбора, хранения и перевозки проб, должны быть небьющимися и герметичными, чтобы не допустить утечку жидкости или газов. Рекомендуется использовать контейнеры из полиэтилена высокой плотности. Все контейнеры для проб должны быть промыты дистиллированной водой известного и гарантированного качества. В отчете (WMO, 2004*a*) содержится подробное описание процедур очистки контейнеров и обеспечения поддержания стандартов чистоты во время сбора, хранения и перевозки проб.

16.5.2 **Химический анализ**

Рекомендуются следующие химические параметры для анализа проб осадков в рамках ГСА: pH, электропроводность, сульфаты, нитраты, хлориды, аммоний, натрий, калий, магний и кальций. Анализы на формиаты и ацетаты рекомендованы для районов, в пробах из которых подозревается высокое содержание органической кислоты. Концентрации нитритов, фосфатов и фторидов также могут быть важны в определенных районах, хотя на сети ГСА их анализы делать не обязательно. Предпочтительные аналитические методы приведены в таблице 16.2.

Прошлый опыт работы региональных сетей и проведения лабораторных взаимных сравнений показал, что измерять pH в осадках трудно, главным образом, из-за малой ионной силы пробы. Пробы также могут разлагаться из-за биологической активности и поэтому они должны храниться в холодильнике до момента их анализа, после того как они нагреются до комнатной температуры. Измерения pH должны проводиться в течение одних суток после доставки пробы в лабораторию.

Измерители pH, которые можно купить, имеют разные индивидуальные характеристики и возможности. Измеритель pH должен иметь как отсекаемую, так и наклонную настройку и должен проводить измерения с точностью ±0,01 единицы pH. Во многих случаях предпочтительнее приборы с комбинированными электродами, имеющими и измерительную и эталонную функции, поскольку они требуют меньшего количества пробы, но набор из двух электродов может также использоваться с измерителем pH. Измерительный стеклянный электрод чувствителен к ионам водорода, и эталонным электродом может быть каломель (хлорид ртути) или серебро/хлористое серебро. Сейчас имеются в продаже электроды с малой ионной силой. Другие эталонные электроды также могут использоваться до тех пор, пока они имеют постоянный потенциал. При выборе электрода проверьте его способность измерять растворы с малой ионной силой путем измерения сертифицированного эталонного материала. Время отклика должно быть меньше 1 мин и при этом не должен требоваться дополнительный хлорид калия (KCl).

Электропроводность раствора является обратным значением ее удельного сопротивления и может быть напрямую измерена с помощью мостика для измерения электропроводности

Таблица 16.2. Химические параметры, обязательные для анализа в Программе ГСА по химическому составу осадков наряду с рекомендованными аналитическими методами

Аналит-вещество	*Статус*	*Предпочтительные методы*[a]
pH	Обязательный	Стеклянный электрод
Электропроводность	Обязательный	Ячейка проводимости
Щелочность	По усмотрению	Титрирование
Cl^-, NO_3^-, SO_4^{2-}	Обязательный	IC
NH_4^+	Обязательный	IC, AC
Na^+, K^+, Ca^{2+}, Mg^{2+}	Обязательный	IC, ICP, AAS/AES
Органические кислоты[b]	По усмотрению	IEC, IC
NO_2^-, F^-	По усмотрению	IC
PO_4^{3-}	По усмотрению	IC, AC

Примечания:
a IC = ионная хроматография; AC = автоматизированная цветометрия; ICP = спектрометрия с индуктивно связанной плазмой; IEC = ионо-эксклюзионная хроматография; AAS = атомно-абсорбционная спектрометрия; AES = атомно-эмиссионная спектрометрия.
b Для районов с пробами, содержащими высокие концентрации органических кислот, рекомендованы анализы на формиаты и ацетаты.

с измерительной ячейкой. Электропроводность изменяется с изменением температуры раствора, и она пропорциональна концентрации и разновидности свободных ионов, присутствующих в растворе. Поскольку электропроводность также зависит от поверхности электрода и расстояния до него, измерительная аппаратура должна тарироваться для достижения емкости сосуда или для регулировки прибора. Раствор KCl известной концентрации и электропроводности используется для тарировки. Электропроводность измеряется и выражается в единицах микросименсах на сантиметр (мкм·см$^{-1}$), приведенных к 25 °C. Диапазон электропроводности проб осадков колеблется от 5 до 1 000 мкм·см$^{-1}$. В случае малого объема пробы, аликвота, которая используется для измерения электропроводности, может использоваться для определения pH. Если так и делается, то сначала необходимо измерить электропроводность, чтобы избежать возможной ошибки из-за солевого загрязнения от pH электрода.

Аппаратура для измерения электропроводности состоит из:

a) измерителя электропроводности (с рабочим диапазоном от 0,1 до 1000 мкм·см$^{-1}$; или лучше, от 0,01 до 1000 мкм·см$^{-1}$). Точность должна быть в пределах 0,5 % диапазона и погрешность 1 % диапазона;

b) ячейки для измерения электропроводности (если ожидается, что значения в пробах осадков будут в основном очень низкие (< 20 мкм·см$^{-1}$), то используется специальная ячейка для измерения электропроводности с низкой емкостью сосуда;

c) термометра (от 0 °C до 40 °C/0,1 °C);

d) водяного термостата при 25 °C;

e) сосуда из полиэтилена или стекла соответствующего диаметру используемой ячейки.

В последние годы широко используется ионная хроматография для анализа главных анионов и катионов в осадках, в основном в сочетании с электрохимическим детектированием.

Сульфаты, нитраты, хлориды, а также другие анионы в осадках сепарируются на ионообменной колонке вследствие их различных свойств с обменным материалом. Обычно для сепарирования анионов используется материал полимер с активным участком, покрытым четвертичным аммонием. После сепарирования анионы проходят через фильтр, который меняет все катионы на ионы H^+. Вместо сильнокислотной катионообменной колонки сегодня применяют микромембраны и самогенерирующиеся подавители с химической или электрохимической регенерацией. В результате реакции подавления соответствующие кислоты элюентных ионов и хлоридов, нитратов и сульфатов достигают детектора электропроводности. Пониженная базовая электропроводность и более сильные аналитические сигналы теперь позволяют обнаруживать анионы в более узком диапазоне мкм·$л^{-1}$.

В продаже сейчас существует несколько анионных обменников с различными свойствами. Время, затраченное для проведения одного анализа, и качество сепарирования одиночных сигналов зависят от типа колонки и элюента, а также от концентрации и скорости потока элюента.

Любые анионы с периодом удержания, похожим на время удержания главных анионов в растворе, могут стать причиной интерференции. Например, когда присутствует NO_2^-, он элюирует сразу после Cl^-, который может стать причиной пика асимметрии. В редких случаях, когда концентрация Cl^- очень высокая по сравнению с NO_3^-, он может также влиять на определение NO_3^-. Следует сверяться с наставлением на предмет получения информации о том, как различные интеграционные программы решают эту проблему.

На одной и той же колонке для сепарирования анионов при аккуратном использовании можно выполнить до нескольких тысяч анализов. Наиболее эффективным методом защиты сепараторной колонки является использование перед основной колонкой колонки предварительной сепарации. Подробности предоставляются производителями колонок в руководстве для их использования.

Принцип измерения катионов тот же самый, что и для определения анионов, за исключением того, что используются другие материалы в колонке, и во многих случаях не нужна подавительная колонка. Материалом для сепарирования катионов обычно служит катионообменная смола с группами активной поверхности. Ионы натрия, аммония, калия, кальция и магния определяются детектором электропроводности без замены элюента, когда используются определенные колонки. В других колонках моновалентные катионы (Na^+, NH_4^+, K^+) определяются с помощью использования элюента и двухвалентных катионов (Mg^{2+} и Ca^{2+}) с другим элюентом (вследствие их более высокого сходства со смолой).

Любой катион с периодом удержания, похожим на тот, что используется для главных катионов, может стать причиной интерференции. Например, в пробах с высокой концентрацией Na^+, пик NH_4^+, становится асимметричным и зачастую является причиной значительных ошибок. В этом случае измерение с использованием более ослабленного элюента может улучшить выделение пиков.

Натрий, калий, магний и кальций в осадках часто анализируются методом атомной спектроскопии. Можно использовать методы, основанные на пламенной (атомно-абсорбционная спектрометрия (ААС) и атомно-эмиссионной спектрометрии (АЭС)), и на плазме (атомно-эмиссионная спектрометрия с индуктивно связанной плазмой (АЭС-ИСП)) и масс-спектрометрии с индуктивно связанной плазмой (МС-ИСП). Для этих ионов ионная хроматография не имеет особых преимуществ в отношении чувствительности, точности и погрешности измерений перед спектроскопическими методами, хотя анализ всех ионов по одной пробе за один раз невозможен с использованием пламенной ААС или АЭС (одноэлементные методы).

Ионы в растворе с пробой трансформируются в нейтральные атомы в пламени смеси воздуха/ацетилена. Свет от полого катода или безэлектродной разрядной лампы проходит сквозь пламя. В режиме ААС абсорбция света атомами в пламени измеряется детектором после монохроматора, установленного на нужную длину волны. Абсорбция света

пропорциональна концентрации ионов в пробе. В режиме АЭС измеряется свет, испускаемый атомами, возбужденными в пламени. Большинство продаваемых приборов можно эксплуатировать в обоих режимах. АЭС является предпочтительным режимом для измерения натрия.

При использовании ААС может отмечаться как ионизация, так и химическая интерференция. Эти интерференции вызваны другими ионами в пробе, которые уменьшают число нейтральных атомов в пламени. Ионизационной интерференции можно избежать путем добавления в пробы и тарировочные растворы относительно большого количества легко ионизирующихся элементов. Для определения натрия и калия добавляется цезий. Для устранения химической интерференции от алюминия и фосфата можно добавлять в пробы и тарировочные растворы лантан для определения кальция и магния.

Муравьиная и уксусная кислоты (HCOOH и CH_3COOH соответственно) являются основными химическими веществами атмосферных осадков как в континентальных, так и морских регионах. Имеющиеся свидетельства позволяют говорить о том, что эти вещества происходят в основном от природных источников биогенной деятельности; оба источника и непосредственная эмиссия этих веществ (над континентами) и эмиссия веществ-предшественников (прекурсоров), очевидно, играют важную роль. Сжигание биомассы и ископаемого топлива также приводит к эмиссии в атмосферу карбоновых кислот и/или их прекурсоров.

Карбоновые кислоты в осадках очень нестабильны и быстро исчезают из пробы без предохранительных мер. Для получения надежных данных пробы атмосферных осадков должны отбираться ежесуточно или для каждого отдельного явления выпадения осадков и без промедления сохраняться путем добавления в них биоцидов, например хлороформа ($CHCl_3$). Чаще всего 250 мл аликвота пробы (или меньше для явлений с низким уровнем осадков) смешивают с 0,5 мл $CHCl_3$. Пробы тщательно закупориваются и хранятся в холодильнике до проведения анализа.

Карбоновые вещества можно анализировать как методами ионной (используя ослабленный элюент), так и с помощью ион-эксклюзионной хроматографии (ИЭХ). Тем не менее, ацетат и пропионат, как правило, элюируют совместно, когда анализируются с применением ионной хроматографии, а значит невозможно при анализе определиться количественно. Метод ион-эксклюзионной хроматографии демонстрирует меньшую интерференцию, связанную с совместно элюирующими веществами, и, таким образом, он предпочтительнее для анализа проб осадков.

Для проведения анализа методом ион-эксклюзионной хроматографии пробы добавляются в элюент соляной кислоты (HCl), который затем пропускают через колонку сепаратора, колонку подавитель и детектор. Смола в колонке сепаратора отделяет анионы, используя принцип исключения Доннана; анионы удерживаются и последовательно сепарируются на основе их соответствующего pK_as и ван-дер-ваальсовского взаимодействия со смолой. Анионы более сильных кислот с меньшим pK_as, таким как у H_2SO_4, HNO_3 и HCl, эффективно выводятся и рано совместно элюируют в хроматограмме; анионы более слабых кислот, таких как HCOOH и CH_3COOH, элюируют в хроматограмме позже. Колонка-подавитель включает в свой состав катионообменную смолу с серебром, добавленным к центру обмена; H^+ обменивается с серебром; высвобожденное серебро последовательно вступает в реакцию с Cl^- в элюенте и образуется хлористое серебро (AgCl), которое осаждается в колонке. Кислый аналит выходит из подавителя с потоком дистиллированной воды. Регистрация осуществляется по электропроводности.

16.6 АЭРОЗОЛИ

Атмосферные аэрозоли очень важны для широкого круга вопросов, включая глобальное изменение климата, закисление, качество воздуха в региональном и локальном масштабах и здоровье человека. Воздействие на климат аэрозолей является следствием

радиационных воздействий и их косвенных воздействий на характеристики облачности. Региональные проблемы включают в себя потенциальное воздействие на здоровье человека и смертность, а также воздействие на окружающую среду, такое как ухудшение видимости. Главные источники аэрозолей включают в себя городскую/промышленную эмиссию, смог от сжигания биомассы, вторичное образование от газообразных аэрозольных прекурсоров, морскую соль и пыль. Проблемные вопросы включают в себя определение природных источников аэрозолей и органических фракций.

В таблице 16.3 представлен перечень параметров аэрозолей, рекомендованных для измерения по Программе ГСА. Методические указания по комплексным измерениям аэрозолей представлены в публикациях ВМО (WMO, 2016*d*; WMO, 2011).

16.6.1 Измерения химического состава аэрозолей

В настоящее время отбор на фильтр аэрозолей из воздуха с последующим лабораторным анализом все еще остается самым распространенным используемым экономичным методом, доступным для определения химического состава аэрозолей, несмотря на хорошо документированные артефакты. Артефакты очень часто связаны с присутствием полулетучих веществ, которые могут либо конденсироваться в процессе отбора пробы (позитивный артефакт) или испаряться с фильтра после отбора пробы (негативный артефакт). Для учета этих артефактов был предложен ряд методов. , но ни один из них не удовлетворяет условиям применения ко всем химическим веществам, присутствующим в аэрозоле (Cavalli et al., 2010).

Оптимальное множество для исследования химических свойств аэрозолей состояло бы из ряда разлагателей для удаления способных конденсироваться веществ, присутствующих в газовой фазе (ограничивающие позитивные артефакты) и фильтрующего элемента,

Таблица 16.3. Перечень комплексных переменных факторов аэрозолей, рекомендованных для долгосрочного измерения в глобальной сети

Переменная величина	*Регулярность наблюдений*
Многоволновая оптическая плотность аэрозоля (ОПА)	Постоянно
Суммарная концентрация твердых частиц в двух размерах фракций (мелкодисперсный, крупнодисперсный)	Постоянно
Суммарная концентрация главных химических компонентов в двух размерах фракций	Постоянно
Коэффициент абсорбции света на различных длинах волн	Постоянно
Рассеяние света и полусферный коэффициент обратного рассеяния на различных длинах волн	Постоянно
Численная концентрация аэрозолей	Постоянно
Распределение аэрозолей по размерам	Постоянно
Численная концентрация ядер конденсации облака (ОЯК) при различной степени перенасыщения	Постоянно
Вертикальное распределение обратного рассеяния и угасания аэрозолей	Постоянно
Химический состав с четко определенным разделением на фракции по размерам	Периодически
Зависимость переменных аэрозолей от относительной влажности, особенно распределения по размерам числа аэрозолей и коэффициента обратного рассеяния	Периодически

Источник: WMO (2016*d*)

собирающего как твердые частицы, так и способные конденсироваться вещества, переизлученные с первого фильтра (что является причиной негативных артефактов). Созданы фильтрующие элементы, состоящие из пакета последовательно соединенных фильтров и наполнителей различного типа для отбора проб аэрозолей и избирательного улавливания газов и аэрозольных улетучивающихся продуктов. В идеале отбор проб для неорганических и углеродсодержащих соединений и неорганических соединений проводится по двум различным пробоотборным линиям, поскольку для анализа элементарного и органического углерода (ЭУ/ОУ) требуются разного вида разлагатели и наполнители фильтров. Третья линия могла бы быть задействована для отбора проб и анализа элементарного состава аэрозоля. Оптимальная схема для отбора проб OC/EC описана в публикации EN-16909 (CEN, 2017) и в работе (Cavalli et al., 2010).

Очевидно, что методы ограничения артефактов усложняют измерения по сравнению с обычными фильтрами. Для целей ГСА, учитывая удаленность и наличие ресурсов на ряде станций, использование разлагателей должно рассматриваться как простая рекомендация, а не требование. Однако это означает, что отбираемые в пробе артефакты действительно существуют для ряда полулетучих соединений, особенно когда температура в пробоотборной системе превышает 20 °C. Это должно учитываться при передаче данных в Мировой центр данных по аэрозолям.

Для целей ГСА допускается линии отбора как высокообъемных, так и малообъемных проб. Для простоты предлагается использовать метод дифференцирования для отделения крупнодисперсной фракции от мелкодисперсной фракции. В частности, один фильтр должен располагаться за входным сечением 10 мкм аэродинамического диаметра. Параллельный фильтр следует расположить за входным отверстием, подходящим для мелкодисперсной фракции (то есть, 2,5 мкм аэродинамический диаметр при относительной влажности окружающего воздуха). Одновременно второй фильтр дает мелкодисперсную фракцию, разница между двумя фильтрами будет давать крупнодисперсную фракцию. Для высокообъемных отборов проб использование раздвоенных пробоотборников представляет собой интересную альтернативу дифференциации на крупнодисперсные и мелкодисперсные фракции аэрозолей.

Низкообъемные пробоотборники дешевле, чем высокообъемные пробоотборники. Для повседневных долгосрочных измерений аэрозолей на станциях ГСА рекомендуется на низкообъемных пробоотборниках использовать до трех фильтрующих элементов диаметром 47 мм, соединенных параллельно. Если финансовые ограничения являются лимитирующим фактором, приоритетами для отбора проб на фильтры являются: a) тефлоновые фильтры для гравиметрических и ионных анализов; b) фильтры с кварцевой нитью для анализа углеродсодержащих аэрозолей с линиями, оборудованными разлагателями углерода; c) тефлоновые фильтры для элементных анализов. Каждый комплект в идеале должен состоять из двух фильтров, один для общей массы частиц менее 10 мкм диаметром и один для мелкодисперсной фракции. Разделение будет достигнуто использованием фильтров за входными избирательными по размеру отверстиями. Высокообъемные пробоотборники обычно более дорогие, и поэтому параллельное использование более одного комплекта пробоотборников зачастую непрактично. По этой причине рекомендуется использовать высокообъемные пробоотборники с кварцевыми нитями для неорганических и ЭУ/ОУ анализов. Следует отметить, что разлагатели для высокообъемных пробоотборников только недавно стали коммерчески доступными.

Нет никаких рекомендаций по определению времени отбора проб, поскольку это будет сильно зависеть от месторасположения станции. Обычно пробоотбор за короткое время (от 24 до 48 ч) предоставляет информацию, которую легче использовать в моделях, и следует отдавать предпочтение пробоотбору за период более одной недели, даже если он не непрерывный. Фильтры следует вытащить из устройства для отбора проб сразу после завершения отбора пробы и хранить их при температуре от 0 °C до 5 °C, если анализы нельзя провести немедленно. Следует регулярно выполнять холостые пробы для контроля на предмет загрязнения. В идеале такие холостые пробы готовятся путем установки фильтров в блок отбора проб при выключенном насосе. Рекомендуется выполнять одну холостую пробу на каждые 10 проб.

Для каждой станции ГСА, ведущей наблюдения за аэрозолями, настоятельно рекомендуется составлять перечень измерений основных химических составляющих аэрозоля: a) масса; b) главные ионные соединения; c) углеродсодержащие компоненты; d) пылевые аэрозоли.

Концентрация по массе атмосферных аэрозолей очевидно является важнейшим параметром в программе измерений ГСА. Рекомендуется измерять это гравиметрически на тефлоновых фильтрах. Она выражается в единицах мкм·м$^{-3}$, где объем приведен к СТД. Обновленные методические указания по измерениям концентрации по массе с использованием гравиметрического анализа тефлоновых фильтров приводятся в публикации ВМО (WMO, 2011).

Колебательные микровесы с постепенно затухающим элементом (TEOM) широко используются для измерений аэрозолей по массе. Прибор обеспечивает непрерывное измерение и может выдавать данные с высоким временным разрешением. Рекомендуется использовать TEOM наряду с корректировками системы измерения динамики фильтра для учета потерь полулетучих компонентов аэрозолей и влажности.

Различные типы прибора для непрерывного измерения массы, β-дозиметры, также поступили в продажу. Они работают на принципе ослабления β-лучей слоем аэрозолей. Источником β-лучей обычно служит распад изотопов ^{14}C или ^{85}Kr, и ослабление излучения может быть откалибровано с известной массой. Отбор проб может проводиться на отдельные фильтры или ленты из фильтра, и β-лучи, проходящие сквозь фильтр, непрерывно отслеживаются. β-дозиметры имеют те же самые присущие им трудности с улетучиванием, что и TEOM. Однако по сравнению с гравиметрическими методами они дают обычно разумное решение проблемы. Обновленные методические указания по измерениям концентрации по массе на принципе бета-распада (с использованием модели Met One прибор BAM-1020) представлены в публикации ВМО (WMO, 2011).

Концентрация важнейших неорганических соединений является одним из ключевых параметров, входящих в информацию, рекомендованную для станций ГСА. Основные ионные соединения включают в себя сульфаты, нитраты, хлориды, натрий, аммоний, калий, магний и кальций. Эта селекция соединений основана на том, что аналитические процедуры для этих соединений хорошо отработаны. Более важно, что для большинства атмосферных условий предполагается, что этот набор ионов отвечает за большую часть массы аэрозоля, и измерения в этой части являются важным шагом к замыканию массы аэрозолей. Как уже упоминалось выше, количественные измерения нитрата с использованием фильтрового метода остаются проблематичными и связаны с большими неопределенностями.

В Программе ГСА рекомендуется, чтобы анализы проводились с использованием ионной хроматографии с точки зрения сокращения расходов. Метод ионной хроматографии имеет преимущество по химическому составу и относительно низким расходам в расчете на один проведенный анализ, и он настолько отработан практически, что чувствительность к каждому ионному соединению, расходы и техническое обслуживание оборудования довольно хорошо известны. Если ионная хроматография настроена должным образом, то все рекомендованные ионные соединения могут быть проанализированы за один единственный ввод пробы. Альтернативные аналитические методы существуют, но их использование может привести к систематическим разбросам в данных со станций ГСА. Частью обязанностей лаборатории каждой станции является документирование эквивалентности этих альтернативных методов, таких как ААС или МС-ИСП, методу ионной хроматографии, где бы они ни использовались. Калибровка приборов ионной хроматографии является составной частью стандартных оперативных процедур (СОП) для каждой лаборатории, и каждая лаборатория обязана применять процедуры контроля качества (КК), которые гарантируют точность калибровки. Рекомендации для ГСА те же самые, что приводятся в публикации ВМО (WMO, 2004*a*) для определения химического состава атмосферных осадков. Кроме того, следует тщательно вести протоколы по извлечению фильтров.

Появляются приборы, которые могут выполнять непрерывные и почти непрерывные измерения сульфатов, нитратов и органического углерода (ОУ) в аэрозолях. В частности, успехи в масс-спектрометрии аэрозолей (МСА) привели к созданию приборов, которые могут использоваться для мониторинга аэрозолей, предоставляя возможность измерять количественно общую массу и распределение по размерам нестойких химических компонентов в диапазоне размера аэрозоля меньше микрона. В настоящее время в продаже существуют более простые версии МСА, которые могут обеспечивать данные об установленных по химическим свойствам нагрузках по массе и масс-спектрах аэрозолей с временным разрешением в один час. Пока еще не существуют стандартные рабочие процедуры, одобренные ГСА/ВМО, хотя ACTRIS управляет центральным объектом, ориентированным на МСА, который предоставляет рекомендации для обеспечения долгосрочного мониторинга

Концентрация углеродсодержащих соединений (с элементарными и органическими фракциями) также является одним из ключевых параметров, входящих в информацию, рекомендованную для станций ГСА. Углеродсодержащие соединения все еще являются менее всего изученными и наиболее трудно поддающимися описанию из всех аэрозольных химических компонентов. Общая масса углеродного аэрозоля может быть разделена на три фракции: неорганические карбонаты, ОУ и третья фракция неоднозначно называемая в научной литературе элементарным углеродом (ЭУ), черным углеродом (ЧУ), сажей или устойчивым углеродом с не совсем ясным определением этих терминов. Рекомендации для правильного использования терминологии, связанной с ЧУ, были предложены в работе Petzold et al. (2013) для прояснения терминов, используемых в атмосферных исследованиях; они рекомендуют использовать термин «черный углерод» только в качественном смысле и термины, относящиеся к методике измерения, использовать при сообщении о количественных результатах. В соответствии с этой терминологией термооптические методы могут использоваться для получения данных об общем количестве углерода (ОКУ) и фракций ОУ/ЭУ в атмосферных аэрозольных фильтрах. При использовании оптических методов поглощающий свет компонент называется эквивалентным черным углеродом (ЭЧУ), даже при том, что оптические методы точно не определены для углерода.

В Программе ГСА рекомендуется измерять ОКУ, ОУ и ЭУ, оставляя без внимания относительно второстепенные и трудно определяемые неорганические углеродные компоненты и более сложные вопросы состава ОУ. Пробоотбор аэрозольных углеродсодержащих материалов рекомендуется осуществлять с использованием кварцевых фильтров, предварительно обожженных при температуре от 350 °C до 400 °C в течение 2 часов, и с той же частотой отбора проб, что и для тефлоновых фильтров. Кварцевые фильтры можно анализировать на ОКУ, используя метод термального выделения. Концентрация по массе ОКУ получается термальным окислением углерода, обычно при 750 °C в присутствии катализатора, до поддающегося измерению диоксида углерода. Регистрация выделенного диоксида углерода осуществляется двумя способами: либо восстановлением до метана в присутствии катализатора и затем ПИД, или прямой регистрацией детекторами НДИР (недисперсионным инфракрасным газовым анализатором).

Измерение компонентов ОКУ (ОУ и ЭУ) является более трудной задачей, чем измерение ОКУ (Schmid et al., 2001). Различие между фракциями достигается терморегулируемым испарением/пиролизом. За этим следует катализируемое окисление до CO_2 и обнаружение с помощью НДИР или в некоторых приборах, дальнейшее катализируемое восстановление CO_2 до CH_4 и окончательное обнаружение с использованием ПИД. Используются различные программы терморегуляции. В настоящее время ГСА рекомендует использовать одну из трех термооптических методик: протокол IMPROVE (Interagency Monitoring of Protected Visual Environments = Межведомственная система мониторинга окружающей среды), (Chow et al., 1993; Chow et al., 2005); протокол NIOSH (National Institute for Occupational Safety and Health = Национальный институт профессиональной техники безопасности и охраны здоровья), (Birch and Cary, 1996) и протокол EUSAAR-2 (European Supersites for Atmospheric Aerosol Research = Европейские суперсайты для исследований атмосферного аэрозоля), (Cavalli et al., 2010). Отмечается относительное хорошее согласование между протоколами IMPROVE, NIOSH и EUSAAR-2

для определения ОКУ, в то время как они очень сильно отличаются от определения ЭУ (Chow et al., 2001). В силу того, что ЭУ составляет относительно малую часть ОКУ, определение ОУ с помощью этих трех протоколов также сопоставимо. Считается, что протоколы IMPROVE и EUSAAR-2 лучше всего подходят для фоновых станций, находящихся не в городской местности, в то время как NIOSH применяется для анализа проб с городских объектов Агентством по охране окружающей среды США. Поэтому использование протоколов IMPROVE (Watson et al., 2009) или EUSAAR-2 может быть предпочтительнее, чем NIOSH, для глобальных станций ГСА, расположенных в удаленных местах. Использование протоколов EUSAAR-2 и IMPROVE для определения ЭУ может привести к различным результатам, но следует предпочесть эти методы любым другим альтернативным. Когда бы ни применялся альтернативный подход для измерений ОКУ, рекомендуется периодически проводить определение ОКУ с помощью одного из термооптических методов, для того чтобы можно было сопоставить полученные результаты.

Использование оптических методов для оценки эквивалентного черного углерода (ЭЧУ) заключается в измерении изменения в значении оптического пропускания в отложенных частичках на фильтре (абсорбция) и применении конкретных для станции и типа прибора коэффициентов массовой абсорбции для получения значения ЭЧУ. Необходимо сделать два ключевых допущения для расчета массовой концентрации эквивалентного ЧУ на основании измерений световой абсорбции: a) черный углерод является единственным соединением, отвечающим за световую абсорбцию аэрозоля; b) ЧУ в пробе имеет точно такой же коэффициент массовой абсорбции, как и эталоны, используемые в лаборатории для тарировки абсорбционных приборов. Эти допущения могут изменяться на основании экспериментальных определений коэффициента массовой абсорбции путем проведения одновременных измерений световой абсорбции и измерений ЭУ, как это описано выше. На станциях, где измерение концентрации ЭУ на фильтрах с кварцевой нитью не входит в стандартную программу, можно использовать менее частый отбор проб для получения конкретных для станции и сезона значений коэффициента массовой абсорбции. Таким образом, для измерений ЭЧУ по Программе ГСА необходимо знать экспериментально полученные значения коэффициента массовой абсорбции на станции, когда оценивается массовая концентрация ЧУ по измерениям световой абсорбции.

Использование газокалильных методов (ламп накаливания), таких как одночастичные сажевые фотометры или методы, основанные на летучести, такие как сканирующий измеритель летучих мобильных частиц, может предоставить информацию о тугоплавких материалах, присутствующих в аэрозоле, но их использование для целей мониторинга на станциях ГСА остается проблематичным, учитывая отсутствие стандартных протоколов и соответствующих взаимных сравнений с термооптическими методиками.

Пылевые аэрозоли могут отбираться в пробе относительно легко, без проблем, связанных, в большей степени, полулетучими компонентами аэрозоля, например, органическими веществами и азотно-кислым аммонием. На станциях ГСА рекомендуется использовать методологию многоэлементного анализа для определения компонентов минеральной пыли. Тефлоновые фильтры должны анализироваться, по крайней мере, на четыре основных элемента земной коры: алюминий (Al), кремний (Si), железо (Fe), титан (Ti) и скандий (Sc), и связанные к ними элементы: натрий (Na), магний (Mg), калий (K) и кальций (Ca). Не существует рекомендаций относительно каких-то особых аналитических методов, поскольку имеются в наличии разнообразные методы анализа, включая рентгеновское излучение, индуцируемое потоком протонов; инструментальный нейтронно-активационный анализ; рентгеновская флюоресценция; атомно-абсорбционная спектрометрия (ААС) и масс-спектрометрия с индуктивно связанной плазмой (МС-ИСП). Эти методы обычно имеют высокую чувствительность к корковым элементам. Не все методы могут обеспечить анализ всех необходимых элементов, поэтому может понадобиться сочетание двух и более методов, в зависимости от их пригодности.

16.6.2 Измерения *in situ* аэрозольных радиационных характеристик

Для изучения климата необходимы следующие радиационные характеристики аэрозолей, все на множественных длинах волн по диапазону видимого спектра:

a) коэффициент аэрозольного ослабления света (σ_{ep}) и его два компонента (рассеяние и абсорбция);

b) оптическая плотность аэрозоля (σ, см. 16.6.5), определяемая как интеграл по вертикальному столбу коэффициента аэрозольного ослабления света;

c) альбедо однократного аэрозольного рассеяния (ω_o), определяемое как $\sigma_{sp}/(\sigma_{ap} + \sigma_{sp})$, значение которого описывает относительный вклад рассеяния и абсорбции в общее ослабление света; чисто рассеивающие аэрозоли (такие как серная кислота) имеют значения, равные 1, в то время как очень сильные абсорбенты (например ЧУ) имеют значения около 0,3;

d) модели радиационного переноса обычно требуют одного или двух интегральных свойств углового распределения рассеянного света (фазовая функция): фактора асимметрии (g) или рассеянной к зениту фракции (β); фактором асимметрии является косинус средневзвешенной фазовой функции, изменяющийся в диапазоне значений от –1 для полностью рассеянного света до +1 для полностью рассеянного вперед света; рассеянная к зениту фракция представляет собой фракцию солнечного света, рассеянную в направлении вертикально вверх (обратно в космос), которая зависит от солнечного зенитного расстояния (угла), а также от распределения по размеру частиц и химического состава частиц; она может быть оценена по значению фракции полусферического обратного рассеяния (b);

e) эффективность рассеяния по массе для соединений i, (α_{ai}) используется в моделях химического переноса для оценки радиационного воздействия каждого химического соединения, прогнозируемого моделью; она часто рассчитывается как наклон линейной регрессии, связанной с коэффициентом аэрозольного рассеяния света (σ_{sp}) и концентрацией по массе химических веществ (все же множественная линейная регрессия предпочтительнее для изучения ковариантности некоторых химических соединений); этот параметр имеет единицу измерения $м^2 \cdot г^{-1}$;

f) эффективность абсорбции по массе для соединений i, (α_{ai}) используется в моделях химического переноса для оценки радиационного воздействия каждого химического соединения, прогнозируемого моделью; она часто рассчитывается как наклон линейной регрессии, связанной с коэффициентом аэрозольной абсорбции света (σ_{ap}), и концентрацией по массе химических веществ (все же множественная линейная регрессия предпочтительнее для изучения ковариантности некоторых химических соединений); этот параметр имеет единицу измерения $м^2 \cdot г^{-1}$;

g) функциональная зависимость компонентов коэффициента аэрозольного ослабления света (σ_{ep}, σ_{sp}, σ_{ap}) от относительной влажности, f(RH), выраженная как величина, кратная значению при низкой эталонной относительной влажности (обычно < 40 %).

Коэффициент аэрозольного рассеяния света измеряется с помощью интегрирующего нефелометра. Интегрирующие нефелометры используются на станциях фонового мониторинга с момента установки четырехволнового прибора в обсерватории НУОА США Мауна-Лоа в 1974 г. В настоящее время на всем земном шаре имеется около четырех десятков станций мониторинга σ_{sp} на постоянной основе, входящих в глобальную сеть ГСА. Некоторые их них используют в эксплуатации одноволновые приборы, но большинство измеряют σ_{sp} на трех длинах волн. Многоволновый интегрирующий нефелометр TSI модели 3563 работает на длинах волн 450, 550 и 700 нм и имеет возможность дополнительно измерять σ_{sp} в двух угловых диапазонах: общее рассеяние (7–170°) и полусферическое обратное рассеяние (90–170°, обозначаемое σ_{bsp}). Интегрирующий нефелометр Аврора 3000, производимый компанией Ecotech, дает сопоставимые результаты измерения. Пока не существуют приборы для прямого определения g или β,

можно использовать соотношение $b = \sigma_{bsp}/\sigma_{sp}$ для оценки каждого из этих параметров (обновленные методические указания приводятся в публикации ВМО (WMO, 2011)). Также в продаже имеются более простые, менее дорогие и менее чувствительные одноволновые приборы. Эти приборы могут обеспечить получение полезной информации о коэффициенте аэрозольного рассеяния света на региональных станциях, где аэрозольные нагрузки позволяют использовать менее чувствительные приборы.

Имеются в продаже приборы, способные определять с высоким временным разрешением коэффициент аэрозольной абсорбции света. Они основаны на скорости изменения пропускания света сквозь волоконный фильтр по мере того, как он заполняется осаждающимися на фильтр частицами. Тарировка этих методов, основанных на фильтрах, затруднительна, но необходима из-за того, что соотношение между изменением пропускания света и оптической толщиной аэрозольной абсорбции на фильтре зависит от многих факторов, включая особенности фильтрационного материала и характер рассеяния света частицами.

Широко используется прибор аэталометр. Изначально прибор использовался для тарировки по показателю эквивалентной массы ЧУ вместо определения фундаментального свойства, которое обеспечивает отклик прибора: аэрозольной абсорбции света. Ранние модели аэталометров имели отклик на широкий диапазон длин волн, между тем, как последние версии прибора могут измерять в более узком диапазоне длин волн на нескольких длинах волн.

Другим промышленно выпускаемым фильтровым прибором для определения σ_{ap} является абсорбционный сажевый фотометр (АСФ), который измеряет лабораторные аэрозоли с различными значениями однократно рассеивающего альбедо, используя тарировочный эталон на основе разницы между σ_{ep}, измеренным с помощью ячейки ослабления с большим расстоянием, и σ_{sp}, измеренным с помощью интегрирующего нефелометра. Обновленные методические указания для приборов абсорбционных сажевых фотометров приведены в публикации ВМО (WMO, 2011).

Еще одним прибором на основе фильтра является многоугольный абсорбционный фотометр. Этот прибор использует другую оптическую конфигурацию, отличную от аэталометра и абсорбционный сажевый фотометр с измерениями коэффициента отражения поверхности фильтра под двумя различными углами, помимо измерения пропускания света сквозь фильтр. Два измерения коэффициента отражения поверхности позволяют получить поправку на процесс многократного рассеяния с участием осажденных частиц и матрицы фильтра. Такой подход устраняет потребность в применении поправки на основе независимых измерений коэффициента аэрозольного рассеяния света. Многоугольный абсорбционный фотометр работает на длине волны 670 нм; обновленные методические указания для этих приборов приведены в публикации ВМО (WMO, 2011).

Недавние усовершенствования другого принципа определения коэффициента аэрозольного рассеяния света, называемого фотоакустической спектроскопией, предлагают многообещающую альтернативу методам на основе фильтра. Хотя фотоакустический метод не такой чувствительный, он позволяет определять коэффициент аэрозольного рассеяния света, когда частицы находятся в воздухе во взвешенном состоянии, исключая тем самым артефакты, появляющиеся при осаждении частиц на фильтр. Фотоакустический метод можно использовать в регионах, где уровни абсорбции света умеренно высокие, а также в качестве тарировочного эталона для приборов на основе фильтра.

16.6.3 Численная концентрация частиц и фракционный состав

Счетчики ядер конденсации, также известные как счетчики конденсированных частиц (СКЧ), используются для измерения концентрации частиц диаметром всего в несколько нанометров. Технология хорошо зарекомендовала себя и доступна в продаже у разных производителей. Ядра конденсации можно определить после конденсации воды или

другого конденсируемого пара (часто это спирт, например бутанол) из переохлажденного атмосферного воздуха на частицу. Перенасыщение в СКЧ, как правило, довольно высокое, около 150 %. СКЧ надежны и рассчитаны на длительные сроки эксплуатации. Тем не менее, приборы нуждаются в регулярных проверках контроля качества на местах, особенно в плане чистки сатуратора и оптики. Кроме того, требуется ежегодная калибровка СКЧ по эталонным приборам. Если производительность прибора не контролируется, со временем может произойти смещение, что приведет к незаметным отклонениям в показаниях до нескольких десятков процентов. Измерения численного фракционного состава частиц дополняют счетчики ядер конденсации. Многие серийно выпускаемые измерительные приборы теперь доступны как для мелкодисперсных, так и для крупнодисперсных частиц. Они используют разнообразные физические принципы для классификации частиц по размеру. Некоторые из хорошо известных принципов используют электрическую подвижность частиц, аэродинамический размер или оптический размер, определяемый по рассеянию света. Спектрометры размера подвижных частиц (СРПЧ) измеряют распределение размеров частиц в субмикронном диапазоне примерно от 10 до 800 нм. Технология хорошо зарекомендовала себя и доступна в продаже, но существуют также специально разработанные измерительные системы. СРПЧ надежны и предназначены для длительных сроков эксплуатации, хотя они требуют регулярных проверок контроля качества на местах. Кроме того, требуется ежегодная или двухгодичная калибровка как СРПЧ, так и СКЧ по эталонным инструментам. Если производительность прибора СРПЧ не контролируется, со временем может произойти смещение, вызывающее незаметные отклонения в показаниях как в размерах частиц, так и в концентрациях количеств веществ до нескольких десятков процентов.

Для диапазонов размеров верхнего уровня накопления и крупнодисперсных частиц используются оптические и аэродинамические спектрометры размеров частиц (ОСРЧ и АСРЧ). Технология АСРЧ хорошо зарекомендовала себя и доступна в продаже. С результатами сравнений этих приборов можно ознакомиться в Отчете семинара по АСРЧ-2014. АСРЧ надежны и рассчитаны на длительные сроки эксплуатации. На рынке существуют несколько различных ОСРЧ, из которых некоторые могли бы использоваться для долгосрочных измерений. ОСРЧ включают в себя ряд относительно небольших, недорогих приборов, использующих лазерные диоды, с которыми необходимо работать осторожно, с тем чтобы обеспечить надежные количественные измерения. Как АСРЧ, так и ОСРЧ нуждаются в регулярных проверках контроля качества на местах. Кроме того, требуется ежегодная или двухгодичная калибровка по отслеживаемым стандартам и эталонным приборам. Если производительность ОСРЧ или АСРЧ не контролируется, со временем может произойти смещение в обоих типах приборов, вызывающее незаметные отклонения показаний до нескольких десятков процентов.

16.6.4 **Облачные ядра конденсации**

Измерения облачных ядер конденсации (ОЯК) проводятся для определения концентрации и выявления климатологического значения тех частиц, которые потенциально могут образовывать продуцирование облачных мелких капель при перенасыщении, типичном для природных облаков, которое составляет величину менее 1 %. В прошлом измерения ОЯК по Программе ГСА проводились преимущественно с использованием статических термо-градиентных камер, которые хорошо подходят для относительно нечастого отбора проб с низким разрешением (дифференциальным) определения спектра ОЯК. Приборы с использованием непрерывного потока предполагают другой подход, в настоящее время имеют устоявшуюся технологию и доступны на рынке, и становятся рекомендуемым техническим подходом на растущем числе станций ГСА. Счетчик ОЯК предназначен для длительной эксплуатации. Тем не менее, приборы нуждаются в регулярной шестимесячной калибровке для контроля качества с использованием эталонного аэрозоля на местах. Кроме того, требуются ежегодные или раз в два года калибровки счетчика ОЯК по эталонному прибору. Если производительность счетчика ОЯК не контролируется, поток может изменяться со временем, вызывая плохо определяемое перенасыщение в приборе и смещение в концентрации измеряемого числа. Из-за сложности измерения рекомендуется проводить определения ОЯК на станциях ГСА с более развитыми программами измерений аэрозолей.

16.6.5 **Оптическая плотность аэрозоля**

Оптическая плотность аэрозоля (ОПА) получается из данных наблюдений за атмосферным спектральным пропусканием. Солнечная спектральная освещенность I при заданной длине волны можно выразить в виде:

$$I = I_0 \exp\left(-m\delta\right) \tag{16.3}$$

где I_0 — внеатмосферная (на верхней границе атмосферы) освещенность солнца, m — оптическая воздушная масса и δ — общая оптическая плотность. Оптическая воздушная масса равна 1 для вертикального столба, проходящего сквозь атмосферу и примерно пропорциональна 1/cos z, где z есть зенитный угол солнца во время наблюдения. Общая оптическая плотность δ при заданной длине волны состоит из нескольких компонентов, таких как рассеяние молекулами газа δ_R (рассеяние Релея); ослабление, вызванное частицами аэрозоля δ_A; абсорбция малыми газовыми составляющими δ_G (озон, двуокись азота и др.); и возможное загрязнение облака. Таким образом, ОПА может быть получена из общей оптической плотности путем вычитания смоделированных оценок других компонентов $\delta_A = \delta - \delta_R - \delta_G$.

Поскольку ОПА представляет собой, главным образом, разницу между двумя большими числами, она чувствительна к небольшим тарировочным ошибкам и, в меньшей степени, к методу, выбранному для моделирования других компонентов. При проведении измерений ОПА следует соблюдать регистрируемые тарировочные неопределенности до 1,5 %, соответствующие неопределенности величиной 0,015 оптической плотности на единицу оптической массы (WMO, 2005).

Длины волн и полоса пропускания частот, специальные для ОПА, которые в значительной степени свободны от различных приводящих к затуханию компонентов (водяной пар и NO_x) и сильного поглощения озоном, рекомендуются в публикации ВМО (WMO, 2003). Опорная сеть для измерения приземной радиации (БСРН) и ПФР-ГСА (сеть наблюдений за оптической плотностью аэрозолей с использованием прецизионных радиометров с фильтром) использует четыре канала ОПА на длинах волн 368, 412, 500 и 862 нм. Несмотря на то, что некоторые другие сети имеют другие избранные длины волн, исходя из своих специфических потребностей (валидация спутниковых датчиков, задачи моделирования), измерения на 500 ± 3 нм и 865 ± 5 нм, как правило, проводятся на большинстве сетей.

Измерения солнечной спектральной освещенности обычно проводятся направленными на солнце радиометрами (солнечными фотометрами), установленными на двухкоординатный солнечный визир с частотой регистрации данных один раз в минуту для обеспечения объективного контроля качества и алгоритма фильтрации влияния облачности. Контроль качества на однородность данных обеспечить труднее с помощью солнечных фотометров, управляемых вручную.

Радиометры с вращающимся фильтровым теневым кольцом измеряют глобальную и рассеянную спектральную освещенность на нескольких диапазонах длин волн. Прямая нормальная облученность, полученная как разница между глобальной и рассеянной радиацией, приведенной к зенитному углу солнца, может использоваться для расчета ОПА таким же способом, что и для солнечных фотометров.

Более сложные приборы, подобные сканирующим небо радиометрам, могут использоваться для получения представления о дополнительных оптических характеристиках аэрозолей в столбе атмосферного воздуха, в том числе о фракционном распределении, альбедо однократного рассеяния или угловой функции, путем осуществления сложных математических инверсионных моделей.

Солнечные фотометры и радиометры с теневым кольцом или сканирующие небо выпускаются несколькими производителями для продажи. Централизованная оценка

данных и техническое обслуживание в области тарировки приборов[1] предлагаются для калибровочных приборов глобальными сетями, например, Роботизированной аэрозольной сетью (АЭРОНЕТ), ГСА-ПФР или СКАЙНЕТ (WMO, 2005).

16.6.6 Лидарные наблюдения за аэрозолями на станциях ГСА

Основной принцип лидарных наблюдений заключается в следующем: лазерный импульс посылается в атмосферу, где он сталкивается с молекулами газа и частицами; небольшое количество энергии рассеивается обратно в направлении приемника, обычно это телескоп, и передается на фотодетектор, действующий как фотоэлектрический умножитель. Полученный электрический сигнал пропорционален полученной оптической силе, которая зависит от наличия, размера и концентрации атмосферных рассеятелей и абсорбентов, встреченных светом на пути сквозь объем атмосферного столба. Лидарные методы позволяют получить характеристики атмосферных аэрозолей в отношении вертикальных профилей коэффициентов ослабления или обратного рассеяния, лидарного соотношения, оптической плотности и микрофизических характеристик, таких как форма, коэффициент преломления и фракционное распределение, во временном масштабе до минут и вертикальном масштабе до нескольких метров.

Лидарные наблюдения имеют гораздо бóльшую ценность, если используются на скоординированных сетях. Лидарные сети являются основополагающими для изучения аэрозолей в больших пространственных масштабах и для изучения переноса и явлений трансформации аэрозолей. Существует несколько исследовательских лидарных сетей, которые вносят вклад в ГСА: Сеть лидарных наблюдений за аэрозолями и выбросами пыли в Азии, Латиноамериканская лидарная сеть, Лидарная сеть Содружества Независимых Государств, Европейская лидарная сеть по исследованию аэрозолей, Микроимпульсная лидарная сеть, Сеть определения изменения состава атмосферы и Кооперативная лидарная научно-техническая сеть НУОА дистанционного зондирования. Деятельность этих сетей координируется в рамках Сети ГСА лидарных наблюдений за аэрозолями (WMO, 2008*a*).

Существует несколько методов лидарных наблюдений, зависящих от конкретной конструкции приборов и, в основном, от процесса рассеяния системы лазер-атмосфера.

Адаптивный лидар обратного рассеяния

Это самый простой тип аэрозольного лидара: длина волны отраженного импульса идентична длине волны посылаемого импульса, и величина принимаемого сигнала в известном диапазоне зависит от поперечного сечения обратного рассеяния отражателями вдоль луча света на всю длину. Обычно рабочие длины волн составляют 355, 532 и 1 064 нм. Чаще всего с помощью лидара обратного рассеяния получают вертикальный профиль коэффициента обратного аэрозольного рассеяния, взятый исходя из лидарного соотношения, т. е. соотношения ослабление/обратное рассеяние, которое в основном является постоянной величиной по всему профилю, и обычно получается по имеющимся климатологическим данным, полученным с помощью измерений рамановским лидаром, описанным ниже. В этом смысле необходимо подчеркнуть, что без предварительных допущений в отношении лидарного соотношения этот тип лидарной системы не может обеспечить получение количественных данных об обратном аэрозольном рассеянии.

Деполяризационный лидар

Это перестраиваемые лидары обратного рассеяния, снабженные каналами для детектирования двух параллельных и кросс-поляризованных составляющих отраженной рассеянной радиации. Они предоставляют количественную информацию

[1] Для дополнительной информации см. вебсайт Всемирного центра исследований и калибровки оптической плотности (ВЦИКОП) (http://www.pmodwrc.ch/worcc/index.html).).

о форме частицы, имеющей большое значение для определения типа аэрозоля, а также об идентификации тонких облаков, загрязняющих полученные профили. Деполяризационный канал позволяет опознать вулканический пепел и другие аэрозольные частицы. Обычно рабочая частота составляет 355 и 532 нм. Системы деполяризационных лидаров требуют точной калибровки.

Рамановский лидар

Принцип работы рамановского лидара основан на измерении неадаптивного комбинационного (рамановского) рассеяния конкретным газом. Радиация рамановского обратного рассеяния молекулой азота (или кислорода) используется обычно для извлечения вертикального профиля коэффициента аэрозольного ослабления, который в паре с адаптивным рассеянием измеряется на той же длине волны излучения, также обеспечивает получение вертикального профиля коэффициента обратного аэрозольного рассеяния без допуска в отношении лидарного соотношения. Обычно рабочая частота составляет 355 и 532 нм. Большинство существующих рамановских лидаров также оснащены деполяризационным каналом, предоставляющим данные о линейном деполяризационном соотношении частиц. Усовершенствованный метод многоволнового рамановского аэрозольного лидара продемонстрировал свою уникальность для получения данных о микрофизических характеристиках аэрозолей, разложенные по диапазону. Кроме того, вращение систем рамановского лидара может помочь в оптимизации измерений ослабления в дневное время.

Лидар с высоким спектральным разрешением

Метод с использованием лидара с высоким спектральным разрешением (ЛВСР) обеспечивает откалиброванные измерения ОПА, ослабления и обратного рассеяния. Данные измерений рассчитываются по соотношениям между рассеянием частиц и измеренным молекулярным рассеянием. Это обеспечивает абсолютную калибровку и делает калибровку нечувствительной к загрязнению или атмосферным осадкам на выходе. Очень узкий угловой охват поля зрения сокращает загрязнение от ложных источников, таких как множественное рассеяние. Небольшое поле зрения в паре с узкой оптической полосой пропускания почти устраняет помехи, вызванные рассеянным солнечным светом, улучшая также соотношение сигнал-помехи во время измерений в дневное время.

Облакомеры

Облакомеры являются, по сути, адаптивными лидарами обратного рассеяния, которые используют диодный низкоэнергетический лазерный источник, излучающий энергию на длинах волн в ИК-диапазоне (обычно 905 или 1 064 нм), но с высокой частотой повторения импульсов (в единицах энергии микроджоуль за один импульс и при частоте повторения в кГц), и которые регистрируют радиацию адаптивного обратного рассеяния облаками и осадками. Облакомер является автономным, полностью готовым к работе наземным устройством для активного дистанционного зондирования, предназначенным для измерения нижней границы облачности и потенциальных сигналов обратного рассеяния аэрозолями. Облакомеры могут предоставить количественную информацию о вертикальном распределении аэрозолей. Как правило, устаревшие и обычно менее мощные приборы едва способны обнаруживать слои с аэрозолями в атмосфере, в то время как последние модели приборов могут быть пригодны для обнаружения вулканического пепла/пыли и прослеживания следа распространения пепла/пыли.

Все эти лидарные методы могут обеспечить получение данных и продукции, пригодных для мониторинга пространственно-временного распределения аэрозолей до высоты верхней тропосферы/нижней стратосферы и могут характеризовать их с динамической и микрофизической точки зрения. Основная лидарная информация относится к наличию дождя, плотного тумана и большого слоя облачности (оптическая плотность больше 2–3 единиц), что не позволяет проводить мониторинг атмосферы в области,

расположенной выше нижней границы облачности. Высотный диапазон, охватываемый лидарами, ограничен снизу высотой перекрытия зон (высота, на которой отмечается полное перекрытие между передатчиком и приемником), которая обычно составляет около 250–500 м над уровнем земли, но она может быть и до 2 км над поверхностью земли, в зависимости от особенностей конструкции прибора. Максимальный высотный диапазон сильно зависит от мощности лазера и оптической системы, достигая до 25–30 км для систем высокой мощности. Сложно давать общие оценки точности различных лидарных данных, поскольку они зависят от конкретной измерительной системы и преобладающих метеорологических условий. В среднем, неопределенности для коэффициента ослабления и обратного рассеяния составляют порядка 20 % (в случае рамановского лидара или ЛВСР). Получение микрофизических характеристик возможно только в том случае, если оптические данные имеют неопределенности ниже 20–30 %.

Продукция, получаемая с помощью аэрозольных лидаров (см. таблицу 16.4 с более подробной информацией):

a) геометрические характеристики:

   i) обнаружение слоя (верхний и нижний уровни, центр массы);

b) профили оптических характеристик:

   i) расширенные оптические параметры: коэффициент обратного рассеяния аэрозоля (β_a), коэффициент аэрозольного ослабления (α_a);

   ii) интенсивные оптические параметры: лидарное соотношение, линейное деполяризационное соотношении частиц (δ_a), экспонента, относящаяся к обратному рассеянию с дискретностью в ангстремах ($Å_\beta$), экспонента, относящаяся к ослаблению с дискретностью в ангстремах ($Å_\alpha$);

c) оптические характеристики в обнаруженном слое:

   i) интегрированное обратное рассеяние, ОПА;

   ii) оптические параметры средней интенсивности (лидарное соотношение; линейное деполяризационное соотношении частиц; экспонента, относящаяся к обратному рассеянию с дискретностью в ангстремах; экспонента, относящаяся к ослаблению с дискретностью в ангстремах);

d) классификация аэрозолей по их типу;

e) оценка концентрации по массе;

f) полученные микрофизические характеристики.

Таблица 16.4. Лидарная продукция, относящаяся к конкретным методам измерения с помощью наземных лидаров (при этом (d) = только дневное время)

Методы измерения с использованием наземных лидаров	*Геометрические характеристики*	β_a	α_a	*Лидарное соотношение*[a]	*ОПА*	$\mathring{A}_\beta$	$\mathring{A}_\alpha$	*Тип*[b]	*Микрофизические характеристики*
Облакомер[c]	✓	✓[d]							
Облакомер + солнечный фотометр	✓	✓	✓(d)[e]		✓(d)				
Облакомер + солнечный фотометр + деполяризационный лидар	✓	✓	✓(d)[e]		✓(d)			✓ (ограниченный)	
1-волновый (1-λ) лидар обратного рассеяния	✓	✓							
1-λ лидар обратного рассеяния + солнечный фотометр	✓	✓	✓(d)[e]		✓(d)				
1-λ лидар обратного рассеяния + солнечный фотометр + деполяризационный лидар	✓	✓	✓(d)[e]		✓(d)			✓(d) (ограниченный)	
Многоволновый (m-λ)[f] лидар обратного рассеяния	✓	✓					✓		
M-λ[f] лидар обратного рассеяния + солнечный фотометр	✓	✓	✓(d)[e]		✓(d)	✓(d)[e]	✓		✓(d)[e]
M-λ[f] лидар обратного рассеяния + солнечный фотометр + деполяризационный лидар	✓	✓	✓(d)[e]		✓(d)	✓(d)[e]	✓	✓	✓(d)[e]
1-λ рамановский лидар/ЛВСР	✓	✓	✓[g]	✓[g]	✓[g]			✓[g] (ограниченный)	
1-λ рамановский лидар/ЛВСР + солнечный фотометр	✓	✓	✓[g]	✓[g]	✓[g]	✓(d)[e]	✓(d)[e]	✓ (ограниченный)	✓(d)[e]
1-λ рамановский лидар/ЛВСР + солнечный фотометр + деполяризационный лидар	✓	✓	✓[g]	✓[g]	✓[g]	✓(d)[e]	✓(d)[e]	✓	✓(d)[e]
M-λ[f] рамановский лидар	✓	✓	✓[g]	✓[g]	✓[g]	✓[g]	✓	✓[g]	✓[g]

Методы измерения с использованием наземных лидаров	*Геометрические характеристики*	β_a	α_a	*Лидарное соотношение*[a]	*ОПА*	$\mathring{A}_\beta$	$\mathring{A}_\alpha$	*Тип*[b]	*Микрофизические характеристики*
М-λ[f] рамановский лидар + солнечный фотометр	✓	✓	✓[g]	✓[g]	✓[g]	✓[g]	✓	✓	✓[g]
М-λ[f] рамановский лидар + солнечный фотометр + деполяризационный лидар	✓	✓	✓[g]	✓[g]	✓[g]	✓[g]	✓	✓	✓[g]

Примечания:

[a] По двум независимым измерениям.

[b] Определение типа рассеяния (аэрозольные частицы, дождевые капли, ледяные кристаллы, информация о некоторых типах аэрозолей).

[c] Облакомер одноволновый, лидар малой мощности, с низким соотношением сигнал-помеха.

[d] Если калиброванный.

[e] Только оценочные.

[f] м > 2.

[g] Большинство рамановских лидарных систем работают в ночное время. Существуют рамановские лидарные системы, работающие круглосуточно, и их работоспособность была доказана. Однако только несколько систем сегодня работают на рамановских каналах в дневное время; ЛВСР не зависит от времени суток.

16.7 ЕСТЕСТВЕННАЯ РАДИОАКТИВНОСТЬ

Глобальное распределение источников/стоков естественных радионуклидов (^{7}Be, ^{10}Be, ^{210}Pb и ^{222}Rn) и антропогенных радионуклидов (^{85}Kr) достаточно хорошо изучено. ^{7}Be и ^{10}Be являются продуктами взаимодействия космических лучей в верхних слоях тропосферы и слоях нижней стратосферы. ^{222}Rn выделяется из почвы на поверхности Земли в результате распада урана в почве. ^{210}Pb является продуктом распада ^{222}Rn в нижних слоях тропосферы. Большинство ^{85}Kr в атмосфере высвобождается в процессе переработки ядерного топлива. Атомы ^{7}Be, ^{10}Be и ^{210}Pb прикрепляются к аэрозольным частицам размером менее микрона и поэтому выступают в роли переносимых аэрозолем изотопных маркеров в атмосфере. ^{222}Rn и ^{85}Kr, которые являются химически и физически инертными, ведут себя в атмосфере как инертные газы.

Измерения радионуклидов не являются приоритетной областью в Программе ГСА. Некоторые рекомендации общего характера приводятся в публикациях ВМО (WMO, 2001; 2004*b*).

ПРИЛОЖЕНИЕ. ЦЕНТРАЛЬНЫЕ УЧРЕЖДЕНИЯ ГСА

Перечень центральных учреждений ГСА и организаций, принимающих их в своих странах (как указано в публикации ВМО (WMO, 2017*a*); мировые центральные учреждения приняли на себя глобальную ответственность, если не указано иное.

Переменная величина	*Центр обеспечения качества/научной деятельности*	*Центральная калибровочная лаборатория*	*Мировой калибровочный центр*	*Региональный калибровочный центр*	*Мировой центр данных*
CO_2	JMA (Азия, Юго-западная часть Тихого океана)	NOAA-ESRL	NOAA-ESRL (межлабораторный контроль) Empa (аудит)		JMA
Изотопы CO_2		MPI-BGC			JMA
CH_4	Empa (Америки, Европа/Африка) JMA (Азия/юго-западная часть Тихого океана)	NOAA-ESRL	Empa (Америки, Европа, Африка) JMA (Азия, юго-западная часть Тихого океана)		JMA
N_2O	UBA	NOAA-ESRL	KIT/IMK-IFU		JMA
					JMA
SF_6		NOAA-ESRL	KMA		JMA
ХФУ, ГХФУ, ГФУ					JMA
Приземный озон	Empa	NIST	Empa	ОСВА (Южная Америка)	NILU
CO	Empa	NOAA-ESRL	Empa		JMA
ЛОС	UBA	NIST (этан, пропан, н-бутан, н-пентан, ацетилен, толуол, бензол, изопрен) NIST (монотерпены)	KIT/IMK-IFU		NILU
NO_x	UBA	NPL (NO)	IEK-8 (NO)	FZJ (IEK-8) (NO)	NILU
SO_2					NILU
H_2		MPI-BGC			JMA
Химия осадков/ влажное осаждение	NOAA-ARL (Америки)	ISWS	ISWS		NOAA-ARL

Переменная величина	*Центр обеспечения качества/научной деятельности*	*Центральная калибровочная лаборатория*	*Мировой калибровочный центр*	*Региональный калибровочный центр*	*Мировой центр данных*
Общее содержание озона	JMA (Азия, юго-западная часть Тихого океана)	NOAA-ESRL (спектрофотометры Добсона) EC (спектрофотометры Брюера)	NOAA-ESRL (спектрофотометры Добсона) EC (спектрофотометры Брюера)	Спектрофотометры Добсона: BoM (Австралия и Океания), NOAA-ESRL, JMA (Азия), MOHp (Европа), CHMI-SOO-HK (Европа), OCBA (Южная Америка), SAWS (Африка) Спектрофотометры Брюера: IARC-AEMET (Европа) Фильтровые приборы: ГГО	EC (наземные наблюдения) DLR (наблюдения из космоса)
Профиль распределения озона	FZJ (IEK-8)	FZJ (IEK-8)	FZJ (IEK-8)		EC
УФ-излучение			PMOD/WRC	NOAA-ESRL (Америки)	EC
Физические характеристики аэрозоля	UBA		IfT		NILU (наземные наблюдения) DLR (наблюдения из космоса)
ОПА		PMOD/WRC (Прецизионные фильтрующие радиометры)	PMOD/WRC		NILU (наземные наблюдения) DLR (наблюдения из космоса)
Химические характеристики аэрозоля					NILU
Солнечная радиация		PMOD/WRC	PMOD/WRC		ГГО

Принимающие учреждения

АБМ	Австралийское бюро метеорологии, Мельбурн, Австралия
ЧГМИ-СОО-ГК	Чешский гидрометеорологический институт, Обсерватория изучения Солнца и озона в Градец-Кралове, Чехия
АЦГ	Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt (Германский аэрокосмический центр), Oberpfaffenhofen, Весслинг, Германия
МООСК	Министерство охраны окружающей среды Канады, Торонто, Канада
ЛИИМ	Швейцарская федеральная лаборатория по испытаниям и исследованиям материалов, Дюбендорф, Швейцария
FZJ (ИЭК-8)	Forschungszentrum Jülich, Институт исследований энергии и климата: тропосфера (IEK-8), Jülich, Germany
ЦАИИ-ГАИТ	Центр атмосферных исследований Исанья - La Agencia Estatal de Meteorología, Тенерифе, Испания
ИТИ	Институт тропосферных исследований, Лейпциг, Германия
ИГВС	Иллинойская государственная водная служба, Шампань, ИЛ, США
ЯМА	Японское метеорологическое агентство, Токио, Япония
ИМИК/ИТК-ИФУ	Институт технологии Карлсруэ (ИТК), Институт метеорологии и изучения климата — Исследования атмосферы и окружающей среды, Гармиш-Партенкирхен, Германия
КМА	Корейская метеорологическая администрация, Сеул, Республика Корея
ГГО	Главная геофизическая обсерватория им. А.И.Воейкова, Федеральная служба России по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды, С.-Петербург, Российская Федерация
МОХ	Метеорологическая обсерватория Хохенпейсенберга, Хохенпейсенберг, Германия
МПИ-БГХ	Институт биогеохимии им. Макса Планка, Йена, Германия
НУОА-ЛВР	НУОА, Лаборатория воздушных ресурсов, Силвер спринг, МД, США
НУОА-ЕСРЛ	НУОА, Лаборатория по изучению системы Земля, Отдел глобального мониторинга, Боулдер, США
НИИВ	Норвежский институт изучения воздуха, Кьеллер, Норвегия
НИСТ	Национальный институт стандартов и технологий, Гейзенсбург, МД, США
НФЛ	Национальная физическая лаборатория, Теддингтон, Миддлсекс, Соединенное Королевство
ЦОБА	Центральная обсерватория Буэнос-Айреса, Буэнос-Айрес, Аргентина
МРЦ/ПМОД	Давосская физико-метеорологическая обсерватория/Мировой радиационный центр, Давос, Швейцария
ЮАМС	Южно-Африканская метеорологическая служба, Претория, ЮАР
UBA	Umweltbundesamt (Германское агентство по окружающей среде), Берлин, Германия

СПРАВОЧНАЯ И ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ЛИТЕРАТУРА

Birch, M.E. and R.A. Cary, 1996: Elemental carbon-based method for monitoring occupational exposures to particulate diesel exhaust. *Aerosol Science and Technology*, 25:221–241.

Cavalli, F., M. Viana, K.E. Yttri, J. Genberg and J.-P. Putaud, 2010: Toward a standardised thermal-optical protocol for measuring atmospheric organic and elemental carbon: the EUSAAR protocol. *Atmospheric Measurement Techniques*, 3:79–89.

Chow, J.C., J.G. Watson, L.-W.A. Chen, G. Paredes-Miranda, M.-C.O. Chang, D. Trimble, K.K. Fung, H. Zhang and J. Zhen Yu, 2005: Refining temperature measures in thermal/optical carbon analysis. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 5:2961–2972.

Chow, J.C., J.G. Watson, D. Crow, D.H. Lowenthal and T. Merrifield, 2001: Comparison of IMPROVE and NIOSH carbon measurements. *Aerosol Science and Technology*, 34:23–34.

Chow, J.C., J.G. Watson, L.C. Pritchett, W.R. Pierson, C.A. Frazier and R.G. Purcell, 1993: The DRI thermal/optical reflectance carbon analysis system: Description, evaluation, and applications in U.S. air quality studies. *Atmospheric Environment*, 27A(8):1185–1201.

Coplen, T.B., W.A. Brand, M. Gehre, M. Gröning, H.A.J. Meijer, B. Toman and R.M. Verkouteren, 2006: New Guidelines for $\delta^{13}C$ Measurements. *Analytical Chemistry*, 78(7):2439–2441.

EMEP, 2014: *EMEP Manual for Sampling and Chemical Analysis.* Kjeller, Norwegian Institute for Air Research, available from http://www.nilu.no/projects/ccc/manual/index.html.

European Committee for Standardization (CEN), 2017: Ambient air - Measurement of elemental carbon (EC) and organic carbon (OC) collected on filters. EN-16909:2017. Comité European de Normalisation.

de Laeter, J.R., J.K. Böhlke, P. De Bièvre, H. Hidaka, H.S. Peiser, J.K.R. Rosman and P.D. Taylor, 2003: Atomic weights of the elements: Review 2000. IUPAC Technical Report. *Pure and Applied Chemistry*, 75:683–800.

Ge, B., Y. Sun, Y. Liu, H. Dong, D. Ji, Q. Jiang, J. Li and Z. Wang, 2013: Nitrogen dioxide measurements by cavity attenuated phase shift spectroscopy (CAPS) and implications in ozone production efficiency and nitrate formation in Beijing, China. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres,* 118:9499–9509, doi:10.1002/jgrd.50757.

Götz, F.W.P., A.R. Meetham and G.M.B. Dobson, 1934: The vertical distribution of ozone in the atmosphere. *Proceedings of the Royal Society of London*, A145(855):416–446.

Grant, A., C.S. Witham, P.G. Simmonds, A.J. Manning and S. O'Doherty, 2010: A 15 year record of high-frequency, in situ measurements of hydrogen at Mace Head, Ireland. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 10:1203–1214 (available from http://www.atmos-chem-phys.net/10/1203/2010/acp-10-1203-2010.pdf).

Herndon, S.C., M.S. Zahniser, D.D. Nelson Jr., J. Shorter, J.B. McManus, R. Jiménez, C. Warneke and J.A. de Gouw, 2007: Airborne measurements of HCHO and HCOOH during the New England Air Quality Study 2004 using a pulsed quantum cascade laser spectrometer. *Journal of Geophysical Research*, 112(D10S03).

Hönninger, G., C. von Friedeburg and U. Platt, 2004: Multi axis differential optical absorption spectroscopy (MAX-DOAS). *Atmospheric Chemistry and Physics,* 4:231–254, https://doi.org/10.5194/acp-4-231-2004.

International Organization for Standardization/International Electrotechnical Commission, 2008: *Uncertainty of Measurement – Part 3: Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement*, ISO/IEC Guide 98-3:2008, Incl. Suppl. 1:2008/Cor 1:2009, Suppl. 1:2008, Suppl. 2:2011. Geneva. (equivalent to: Joint Committee for Guides in Metrology, 2008: *Evaluation of Measurement Data – Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement*, JCGM 100:2008, Corrected in 2010).

Jaroslawski, J., 2013: Improvement of the Umkehr ozone profile by the neural network method: analysis of the Belsk (51.80° N, 20.80° E) Umkehr data. *International Journal of Remote Sensing*, 34(15):5541–5550.

Jordan, A. and B. Steinberg, 2011: Calibration of atmospheric hydrogen measurements. *Atmospheric Measurement Techniques,* 4:509–521.

Kelly, T.J., C.W. Spicer and G.F. Ward, 1990: An assessment of the luminol chemiluminescence technique for measurement of NO_2 in ambient air. *Atmospheric Environment,* 24A(9):2397–2403.

Kuang, S., Newchurch M.J., Burris J. and Liu X., 2013: Ground-based lidar for atmospheric boundary layer ozone measurements. *Applied Optics*, 52(15):3557–3566, http://dx.doi.org/10.1364/AO.52.003557.

Lebegue, B., M. Schmidt, M. Ramonet, B. Wastine, C. Yver Kwok, O. Laurent, S. Belviso, A. Guemri, C. Philippon, J. Smith and S. Conil, 2016: Comparison of nitrous oxide (N_2O) analyzers for high-precision measurements of atmospheric mole fractions. *Atmospheric Measurement Techniques*, 9:1221–1238.

Mateer, C.L. and J.J. DeLuisi, 1992: A new Umkehr inversion algorithm. *Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics*, 54(5):537–556.

Mateer, C.L. and H.U. Dütsch, 1964: *Uniform Evaluation of Umkehr Observations from the World Ozone Network, Part I – Proposed Standard Evaluation Technique*. NCAR, Boulder, Colorado.

Nash, T., 1953: The colorimetric estimation of formaldehyde by means of the Hantzsch reaction. *Biochemical Journal*, 55(3):416–421, doi: 10.1042/bj0550416.

Novelli, P., A.M. Crotwell and B.D. Hall, 2009: Application of gas chromatography with a pulsed discharge helium ionization detector for measurements of molecular hydrogen in the atmosphere. *Environmental Science and Technology*, 43(7):2431–2436, doi: 10.1021/es803180g.

Petropavlovskikh, I., P.K. Bhartia and J. DeLuisi, 2005: New Umkehr ozone profile retrieval algorithm optimized for climatological studies. *Geophysical Research Letters*, 32(L16808).

Petzold, A., J.A. Ogren, M. Fiebig, P. Laj, S.-M. Li, U. Baltensperger, T. Holzer-Popp, S. Kinne, G. Pappalardo, N. Sugimoto, C. Wehrli, A. Wiedensohler and X.-Y. Zhang, 2013: Recommendations for reporting "black carbon" measurements. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 13:8365–8379.

Platt U. and J. Stutz, 2008: Differential Optical Absorption Spectroscopy (DOAS)—Principles and Applications. 10.1007/978-3-540-75776-4.

Ramanathan, K.R. and J.V. Dave, 1957: The calculation of the vertical distribution of ozone by the Götz Umkehr Effect (method B). *Annals of the International Geophysical Year*, V(1):23–45.

Rella, C. W., H. Chen, A.E. Andrews, A. Filges, C. Gerbig, J. Hatakka, A. Karion, N.L.Miles, S.J. Richardson, M. Steinbacher, C. Sweeney, B. Wastine and C. Zellweger, 2013: High accuracy measurements of dry mole fractions of carbon dioxide and methane in humid air. *Atmospheric Measurement Techniques*, 6:837–860.

Schmid, H., L. Laskus, H.J. Abraham, U. Baltensperger, V. Lavanchy, M. Bizjak, P. Burba, H. Cachier, D. Crow, J. Chow, T. Gnauk, A. Even, H.M. ten Brink, K.P. Giesen, R. Hitzenberger, C. Hueglin, W. Maenhaut, C. Pio, A. Carvalho, J.-P. Putaud, D. Toom-Sauntry and H. Puxbaum, 2001: Results of the "carbon conference" international aerosol carbon round robin test stage I. *Atmospheric Environment*, 35(12):2111–2121.

Schultz, M.G., H. Akimoto, J. Bottenheim, B. Buchmann, I.E. Galbally, S. Gilge, D. Helmig, H. Koide, A.C. Lewis, P.C. Novelli, C. Plass-Dülmer, T.B. Ryerson, M. Steinbacher, R. Steinbrecher, O. Tarasova, K. Torseth, V. Thouret and C. Zellweger, 2015: The Global Atmosphere Watch reactive gases measurement network. *Elementa Science of the Anthropocene*, 3:1–23, http://doi.org/10.12952/journal.elementa.000067.

Sofieva, V.F., N. Rahpoe, J. Tamminen, E. Kyrölä, N. Kalakoski, M. Weber, A. Laeng, T. von Clarmann, G. Stiller, S. Lossow, D. Degenstein, A. Bourassa, C. Adams, C. Roth, N. Lloyd, P. Bernath, R.J. Hargreaves, J. Urban, D. Murtagh, A. Hauchecorne, M. van Roozendael, N. Kalb and C. Zehner, 2013: Harmonized dataset of ozone profiles from satellite limb and occultation measurements. *Earth System Science Data Discussions*, 6:189–222.

Tegtmeier, S., M.I. Hegglin, J. Anderson, A. Bourassa, S. Brohede, D. Degenstein, L. Froidevaux, R. Fuller, B. Funke, J. Gille, A. Jones, Y. Kasai, K. Krüger, E. Kyrölä, G. Lingenfelser, J. Lumpe, B. Nardi, J. Neu, D. Pendlebury, E. Remsberg, A. Rozanov, L. Smith, M. Toohey, J. Urban, T. von Clarmann, K.A. Walker, and R. Wang, 2013: SPARC Data Initiative: A comparison of ozone climatologies from international limb satellite sounders. *Journal of Geophysical Research*, 118:12229–12247.

Tuzson, B., K. Zeyer, M. Steinbacher, J.B. McManus, D.D. Nelson, M.S. Zahniser and L. Emmenegger, 2013: Selective measurements of NO, NO_2 and NO_y in the free troposphere using quantum cascade laser spectroscopy. *Atmospheric Measurement Techniques*, 6:927–936.

van der A, R. J., M.A.F. Allaart and H.J. Eskes, 2010: Multi sensor reanalysis of total ozone. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 10:11277–11294.

Vardag, S.N., S. Hammer, S. O'Doherty, T.G. Spain, B. Wastine, A. Jordan and I. Levin, 2014: Comparisons of continuous atmospheric CH_4, CO_2 and N_2O measurements – results from a travelling instrument campaign at Mace Head. *Atmospheric Chemistry and Physics,* 14:8403-8418.

Warneke, C., P. Veres, J.S. Holloway, J. Stutz, C. Tsai, S. Alvarez, B. Rappenglueck, F.C. Fehsenfeld, M. Graus, J.B. Gilman and J.A. de Gouw, 2011: Airborne formaldehyde measurements using PTR-MS: calibration, humidity dependence, inter-comparison and initial results. *Atmospheric Measurement Techniques*, 4:2345–2358.

Watson, J.G., J.C. Chow, L.-W. A. Chen and N.H. Frank, 2009: Methods to assess carbonaceous aerosol sampling artifacts for IMPROVE and other long-term networks. *Journal of the Air and Waste Management Association*, 59(8):898–911.

Wisthaler, A., E.C. Apel, J. Bossmeyer, A. Hansel, W. Junkermann, R. Koppmann, R. Meier, K. Müller, S.J. Solomon, R. Steinbrecher, R. Tillmann and T. Brauers, 2008: Technical note: Intercomparison of formaldehyde measurements at the atmosphere simulation chamber SAPHIR. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 8:2189–2200.

World Meteorological Organization, 2001: *Global Atmosphere Watch Measurements Guide*. Global Atmosphere Watch Report No. 143 (WMO/TD-No. 1073). Geneva.

———, 2003: *Quality Assurance in Monitoring Solar Ultraviolet Radiation: the State of the Art* (A.R. Webb). Global Atmosphere Watch Report No. 146 (WMO/TD-No. 1180). Geneva.

———, 2004*a*: *Manual for the GAW Precipitation Chemistry Programme a Guidelines, Data Quality Objectives and Standard Operating Procedures* (M.A. Allan, ed.). Global Atmosphere Watch Report No. 160 (WMO/TD-No. 1251). Geneva.

———, 2004*b*: *1st International Expert Meeting on Sources and Measurements of Natural Radionuclides Applied to Climate and Air Quality Studies (Gif sur Yvette, France, 3–5 June 2003)*. Global Atmosphere Watch Report No. 155 (WMO/TD-No. 1201). Geneva.

———, 2005: *WMO/GAW Experts Workshop on a Global Surface-based Network for Long Term Observations of Column Aerosol Optical Properties* (U. Baltensperger, L. Barrie and C. Wehrli, eds.) (Davos, Switzerland, 8–10 March 2004). Global Atmosphere Watch Report No. 162 (WMO/TD-No. 1287). Geneva.

———, 2007: *A WMO/GAW Expert Workshop on Global Long-Term Measurements of Volatile Organic Compounds (VOCs)* (Geneva, Switzerland, 30 January to 1 February 2006). Global Atmosphere Watch Report No. 171 (WMO/TD-No. 1373). Geneva.

———, 2008*a*: *Plan for the Implementation of the GAW Aerosol Lidar Observation Network GALION* (J. Bösenberg and R. Hoff) (Hamburg, Germany, 27–29 March 2007). Global Atmosphere Watch Report No. 178 (WMO/TD-No. 1443). Geneva.

———, 2008*b*: *The Tenth Biennial WMO Consultation on Brewer Ozone and UV Spectrophotometer Operation, Calibration and Data Reporting* (C.T. McElroy and E.W. Hare, eds.) (Northwich, United Kingdom, 4–8 June 2007). Global Atmosphere Watch Report No. 176 (WMO/TD-No. 1420). Geneva.

———, 2008*c*: *Operations Handbook – Ozone Observations with a Dobson Spectrophotometer* (W.D. Komhyr 1980; revised by R.D. Evans). Global Atmosphere Watch Report No. 183 (WMO/TD-No. 1469). Geneva.

———, 2009: *Guidelines for the Measurement of Methane and Nitrous Oxide and their Quality Assurance*. Global Atmosphere Watch Report No. 185 (WMO/TD-No. 1478). Geneva.

———, 2010: *Guidelines for the Measurement of Atmospheric Carbon Monoxide*. Global Atmosphere Watch Report No. 192 (WMO/TD-No. 1551). Geneva.

———, 2011: *WMO/GAW Standard Operating Procedures for In situ Measurements of Aerosol Mass Concentration, Light Scattering and Light Absorption* (J.A. Ogren, ed.). Global Atmosphere Watch Report No. 200. Geneva.

———, 2012: *Standard Operating Procedures (SOPs) for Air Sampling in Stainless Steel Canisters for Non-Methane Hydrocarbons Analysis* (R. Steinbrecher and E. Weiß). Global Atmosphere Watch Report No. 204. Geneva.

———, 2013: *Guidelines for Continuous Measurements of Ozone in the Troposphere* (I.E. Galbally and M.G. Schultz). Global Atmosphere Watch Report No. 209 (WMO-No. 1110). Geneva.

———, 2014: *Quality Assurance and Quality Control for Ozonesonde Measurements in GAW* (H.G.J. Smit and ASOPOS Panel). Global Atmosphere Watch Report No. 201. Geneva.

———, 2015*a*: *Report of the Second Session of the CAS Environmental Pollution and Atmospheric Chemistry Scientific Steering Committee (EPAC SSC)* (Geneva, Switzerland, 18-20 February 2015). Global Atmosphere Watch Report No. 220. Geneva.

———, 2015*b*: *Eighth Intercomparison Campaign of the Regional Brewer Calibration Center for Europe (RBCC-E)*, (El Arenosillo Sounding Station, Heulva, Spain, 10-20 June 2013), Global Atmosphere Watch Report No. 223. Geneva.

———, 2015*c*: *Ninth Intercomparison Campaign of the Regional Brewer Calibration Center for Europe (RBCC-E)*, (Lichtklimatisches Observatorium, Arosa, Switzerland, 14-26 July 2014). Global Atmosphere Watch Report No. 224. Geneva.

———, 2015*d*: *Absorption Cross-Sections of Ozone (ACSO) Status Report as of December 2015*, Global Atmosphere Watch Report No. 218. Geneva.

———, 2015*e*: *Analytical Methods for Atmospheric SF6 Using Gas Chromatography with micro Electron Capture Detector (GC-μECD)*, Global Atmosphere Watch Report No. 222 (KMA Technical Note CCMD 2015-3). Geneva.

———, 2016a: The Global Observing System for Climate: Implementation Needs, GCOS-200 (GOOS-214). Geneva.

———, 2016*b*: *WMO/UNEP Dobson Data Quality Workshop*, (Hradec Kralove, Czech Republic, 14-18 February 2011), Global Atmosphere Watch Report No. 225. Geneva.

———, 2016*c*: *18th WMO/IAEA Meeting on Carbon Dioxide, Other Greenhouse Gases and Related Tracers Measurement Techniques (GGMT-2015)*, (La Jolla, CA, USA, 13-17 September 2015), Global Atmosphere Watch Report No. 229. Geneva.

———, 2016*d*: *WMO/GAW Aerosol Measurement Procedures, Guidelines and Recommendations*, 2nd Edition, Global Atmosphere Watch Report No. 227 (WMO-No. 1177). Geneva.

———, 2017*a*: *WMO Global Atmosphere Watch (GAW) Implementation Plan: 2016-2023*. Global Atmosphere Watch Report No. 228. Geneva.

———, 2017*b*: *Report of the WMO/GAW Expert Meeting on Nitrogen Oxides and International Workshop on the Nitrogen Cycle*, (York, United Kingdom, 12 - 14 April 2016), Global Atmosphere Watch Report No. 232. Geneva.

———, 2018: *WMO/GAW Calibration Methods of GC-μECD for Atmospheric SF6 Measurements, KMA Technical Note CCMD2016-6*, Global Atmosphere Watch Report No. 239. Geneva.

World Meteorological Organization, World Health Organization, UN Environment, International Global Atmospheric Chemistry and the European Monitoring and Evaluation Programme: *Low-cost Sensors for the Measurement of Atmospheric Composition: Overview of Topic and Future Applications* (A.C Lewis, E. von Schneidemesser and R.E. Peltier, eds) (WMO-No. 1215). Geneva.

Wunch, D., G.C.Toon, P.O. Wennberg, S.C. Wofsy, B.B. Stephens, M.L. Fischer, O. Uchino, J.B. Abshire, P. Bernath, S.C. Biraud, J.-F.L.Blavier, C. Boone, K.P.,Bowman, E.V. Browell, T. Campos, B.J. Connor, B.C. Daube, N.M. Deutscher, M. Diao, J.W. Elkins, C. Gerbig, E. Gottlieb, D.W.T. Griffith, D.F. Hurst, R. Jiménez, G. Keppel-Aleks, E.A. Kort, R. Macatangay, T. Machida, H. Matsueda, F. Moore, I. Morino, ,S. Park, J. Robinson, C.M. Roehl, Y. Sawa, V. Sherlock, C. Sweeney, T. Tanaka and M.A. Zondlo, 2010: Calibration of the Total Carbon Column Observing Network using aircraft profile data. *Atmospheric Measurement Techniques*, 3:1351–1362, https://doi.org/10.5194/amt-3-1351-2010.

Zellweger, C., C. Hüglin, J. Klausen, M. Steinbacher, M Vollmer and B. Buchmann, 2009: Inter-comparison of four different carbon monoxide measurement techniques and evaluation of the long-term carbon monoxide time series of Jungfraujoch. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 9:3491–3503.

Zellweger, C., M. Steinbacher and B. Buchmann, 2012: Evaluation of new laser spectrometer techniques for in situ carbon monoxide measurements, *Atmospheric Measurement Techniques*, 5:2555–2567.

Zellweger, C., L. Emmenegger, M. Firdaus, J. Hatakka, M. Heimann, E. Kozlova, T.G. Spain, M. Steinbacher, M.V. van der Schoot and B. Buchmann, 2016: Assessment of recent advances in measurement techniques for atmospheric carbon dioxide and methane observations. *Atmos. Meas. Tech.,* 9: 4737-4757, doi:10.5194/amt-9-4737-2016.

За дополнительной информацией просьба обращаться:

World Meteorological Organization

7 bis, avenue de la Paix – P.O. Box 2300 – CH 1211 Geneva 2 – Switzerland

Strategic Communications Office

Тел.: +41 (0) 22 730 83 14 – Факс: +41 (0) 22 730 80 27

Электронная почта: cpa@wmo.int

public.wmo.int

JN 211522