Руководство по приборам и методам наблюдений

Том III — Системы наблюдений

Издание 2021 г.

ПОГОДА КЛИМАТ ВОДА

ВСЕМИРНАЯ
МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКАЯ
ОРГАНИЗАЦИЯ

ВМО-№ 8

Руководство по приборам и методам наблюдений

Том III — Системы наблюдений

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 . . . . . **xv**

ГЛАВА 1. ИЗМЕРЕНИЯ НА АВТОМАТИЧЕСКИХ МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИХ СТАНЦИЯХ **1**

1.1 Общие сведения 1
1.1.1 Определение 1
1.1.2 Назначение 1
1.1.3 Метеорологические требования 2
1.1.4 Конфигурация системы 5
1.1.5 Типы автоматических метеорологических станций 5
1.1.6 Телесвязь 6
1.1.7 Объединение станций в сети 7
1.2 Конфигурация системы 7
1.2.1 Сети телесвязи 7
1.2.1.1 Односторонняя связь 7
1.2.1.2 Двусторонняя связь 7
1.2.1.3 Спутниковая передача 7
1.2.1.4 Коммутируемые телефонные сети общего пользования 8
1.2.1.5 Сотовые сети 9
1.2.1.6 Удаленное подключение к сети Интернет или ВЧС 9
1.2.1.7 Другие коммуникационные технологии 9
1.2.2 Центральная система обработки 10
1.2.2.1 Платформа сбора 10
1.2.2.2 Платформа обработки 11
1.2.3 Приборы 12
1.3 Аппаратное обеспечение автоматических метеорологических станций 13
1.3.1 Центральный процессорный блок 15
1.3.2 Интерфейс приборов измерения 16
1.3.3 Кабельное подключение и защита от перенапряжения 18
1.3.4 Энергообеспечение 19
1.3.5 Защита корпуса 20
1.3.6 Конструкция установки 20
1.4 Программное обеспечение автоматических метеорологических станций 20
1.4.1 Операционная система 21
1.4.2 Прикладное программное обеспечение 22
1.4.2.1 Инициализация 22
1.4.2.2 Выборка и фильтрация 22
1.4.2.3 Преобразование необработанных данных 23
1.4.2.4 Ручной ввод данных наблюдений 24
1.4.2.5 Приведение данных 24
1.4.2.6 Локальное хранение данных 25
1.4.2.7 Кодирование сообщений 25
1.4.3 Дистанционная диагностика и обслуживание 26
1.5 Контроль качества 26
1.6 Соображения относительно мест размещения автоматических метеорологических станций 28
1.7 Техническое обслуживание и ремонт 28
1.7.1 Уровни обслуживания 30
1.7.2 Калибровка и поверка на площадке 31
1.7.3 Обучение персонала 32
1.8 Рассмотрение вопроса спецификаций и стоимости системы 33

Приложение. Недорогостоящие автоматические метеорологические станции 35

Справочная и дополнительная литература 40

Стр.

ГЛАВА 2. ИЗМЕРЕНИЯ И НАБЛЮДЕНИЯ НА АВИАЦИОННЫХ МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИХ СТАНЦИЯХ **42**
2.1 Общие сведения 42
2.1.1 Определения 42
2.1.2 Единицы измерения 42
2.1.3 Требования 42
2.1.4 Методы 44
2.2 Приземный ветер 44
2.2.1 Общие сведения 44
2.2.2 Приборы и их установка 45
2.3 Видимость 46
2.3.1 Видимость для целей авиации 47
2.3.2 Преобладающая видимость 48
2.4 Дальность видимости на взлетно-посадочной полосе 48
2.4.1 Общие сведения 48
2.4.2 Методы наблюдений 49
2.4.2.1 Измерения, выполняемые наблюдателями 49
2.4.2.2 Измерения с помощью видео 49
2.4.2.3 Измерения с помощью трансмиссометра 49
2.4.2.4 Измерения с помощью измерителей прямого или обратного рассеяния 50
2.4.3 Приборы и их установка 51
2.4.3.1 Трансмиссометры 52
2.4.3.2 Измеритель прямого рассеяния 53
2.4.3.3 Датчик яркости фона 53
2.4.4 Проверка приборов 53
2.4.5 Отображение данных 54
2.4.6 Точность и надежность измерений дальности видимости на взлетно-посадочной полосе 54
2.5 Текущая погода 55
2.6 Облачность 55
2.6.1 Общие сведения 55
2.6.2 Методы наблюдений 56
2.6.3 Точность измерений высоты нижней границы облаков 57
2.7 Температура воздуха 57
2.8 Точка росы 58
2.9 Атмосферное давление 58
2.9.1 Общие сведения 58
2.9.2 Приборы и их установка 59
2.9.3 Точность измерений давления и поправки 60
2.10 Прочая важная для аэродромов информация 61
2.10.1 Общие сведения 61
2.10.2 Наклонная дальность видимости 61
2.10.3 Сдвиг ветра 61
2.10.4 Заметные инверсии температуры 62
2.11 Автоматизированные системы метеорологических наблюдений 62
2.12 Радиолокатор 63
2.13 Датчик льда 63
2.14 Обнаружение молний 64
2.15 Другие сопутствующие наблюдения 64

Справочная и дополнительная литература 65

ГЛАВА 3. САМОЛЕТНЫЕ НАБЛЮДЕНИЯ **66**
3.1 Общие положения 66
3.1.1 Определения 66
3.1.2 Самолетные метеорологические датчики 67

Стр.

3.2 Давление и число Маха . . . 68
3.2.1 Приемник полного и статического давления . . . 68
3.2.2 Барометрическая высота . . . 68
3.2.2.1 Неопределенность измерений . . . 70
3.2.3 Число Маха . . . 71
3.2.3.1 Неопределенность измерений . . . 72
3.3 Температура воздуха . . . 72
3.3.1 Датчик полной температуры воздуха . . . 72
3.3.1.1 Погрешности измерения . . . 73
3.4 Скорость и направление ветра . . . 74
3.4.1 Погрешности измерений . . . 74
3.5 Влажность . . . 76
3.5.1 Погрешность измерений . . . 77
3.6 Турбулентность . . . 77
3.6.1 Оценка интенсивности турбулентности в результате вертикальной перегрузки . . . 77
3.6.1.1 Погрешности измерения . . . 77
3.6.2 Расчетная эффективная скорость вертикального порыва ветра . . . 78
3.6.2.1 Погрешности измерений . . . 78
3.6.3 Скорость диссипации турбулентной энергии . . . 78
3.6.3.1 EDR, измеряемая с помощью вертикального акселерометра . . . 79
3.6.3.2 EDR, определяемая по вертикальным сдвигам ветра . . . 80
3.6.3.3 EDR, рассчитанная по истинной воздушной скорости . . . 80
3.6.3.4 Погрешности измерений . . . 80
3.6.3.5 Соотношение между EDR и DEVG . . . 81
3.7 Обледенение . . . 81
3.7.1 Погрешности измерений . . . 81
3.8 Системы наблюдений, установленные на борту смолетов . . . 81
3.8.1 Система передачи метеорологических данных с воздушного судна . . . 82
3.8.2 Передача тропосферных метеорологических данных с самолетов . . . 82
3.8.2.1 Обзор . . . 82
3.8.2.2 Относительная влажность и температура . . . 83
3.8.2.3 Обнаружение обледенения системой ТАМДАР . . . 84
3.8.2.4 Обнаружение турбулентности системой ТАМДАР . . . 85
3.9 Другие системы и источники самолетных наблюдений . . . 85
3.9.1 Система автоматического зависимого наблюдения ИКАО . . . 85
3.9.2 Автоматические системы передачи полетной информации . . . 86
3.9.3 Новые и разрабатываемые системы . . . 86
3.9.3.1 Режим расширенного наблюдения — адресный . . . 86
3.9.3.2 Режим регулярной метеорологической сводки с борта воздушного судна . . . 87
3.9.3.3 Беспилотные летательные аппараты . . . 87

Справочная и дополнительная литература . . . 89

ГЛАВА 4. МОРСКИЕ НАБЛЮДЕНИЯ . . . 91
4.1 Общие сведения . . . 91
4.2 Наблюдения с судов . . . 92
4.2.1 Функционирование схемы судов добровольного наблюдения ВМО . . . 92
4.2.2. Наблюдения с судов, добровольно проводящих наблюдения . . . 94
4.2.2.1 Наблюдаемые элементы . . . 94
4.2.2.2 Необходимое оборудование . . . 95
4.2.2.3 Автоматизация судовых наблюдений . . . 95
4.2.2.4 Сроки наблюдений . . . 96
4.2.2.5 Передача данных судовых наблюдений . . . 96
4.2.2.6 Ветер . . . 97
4.2.2.7 Атмосферное давление, тенденция давления и характеристика тенденции давления . . . 102

Стр.

4.2.2.8 Температура и влажность воздуха . . . 104
4.2.2.9 Температура поверхности моря . . . 105
4.2.2.10 Облачность и погода . . . 108
4.2.2.11 Видимость . . . 109
4.2.2.12 Осадки . . . 109
4.2.2.13 Океанские волны . . . 111
4.2.2.14 Лед . . . 116
4.2.2.15 Наблюдения за особыми явлениями . . . 120
4.3 Заякоренные буи . . . 121
4.3.1 Атмосферное давление . . . 124
4.3.2 Измерения ветра . . . 124
4.3.3 Температура . . . 126
4.3.3.1 Температура воздуха . . . 126
4.3.3.2 Температура воды . . . 126
4.3.4 Оценки океанских волн . . . 126
4.3.5 Оценки ненаправленного волнения океана . . . 127
4.3.6 Оценки направленных океанских волн . . . 127
4.3.7 Высота водного столба для обнаружения цунами . . . 128
4.3.8 Относительная влажность . . . 128
4.3.9 Океанские датчики . . . 128
4.3.10 Поверхностные океанские течения . . . 128
4.3.11 Профили океанских течений . . . 129
4.3.12 Соленость . . . 129
4.3.13 Осадки . . . 129
4.3.14 Измерения солнечной радиации . . . 130
4.3.15 Видимость . . . 130
4.4 плавучие маяки . . . 130
4.5 Вышки и платформы . . . 131
4.6 Дрейфующие буи . . . 132

Приложение 4.A. Региональные центры морских приборов ВМО/МОК . . . 135

Приложение 4.B. Описания осадков для использования судовыми наблюдателями текущей погоды . . . 138

Приложение 4.C. Рекомендуемые процедуры передачи информации о зыби с судов с неавтоматизированным представлением данных . . . 141

Справочная и дополнительная литература . . . 142

ГЛАВА 5. СПЕЦИАЛЬНЫЕ МЕТОДЫ ПРОФИЛИРОВАНИЯ АТМОСФЕРНОГО ПОГРАНИЧНОГО СЛОЯ И ТРОПОСФЕРЫ . . . 147
5.1 Общие сведения . . . 147
5.2 Методы дистанционного зондирования с поверхности Земли . . . 148
5.2.1 Акустические зонды (содары) . . . 148
5.2.2 Радиолокаторы для измерения профилей ветра . . . 149
5.2.3 Радиоакустические системы зондирования . . . 152
5.2.4 Микроволновые радиометры . . . 153
5.2.5 Лазерные локаторы (лидары) . . . 154
5.2.6 Глобальная навигационная спутниковая система . . . 156
5.2.6.1 Описание Глобальной навигационной спутниковой системы . . . 157
5.2.6.2 Тропосферный сигнал Глобальной навигационной спутниковой системы . . . 158
5.2.6.3 Интегральное содержание водяного пара . . . 158
5.2.6.4 Неопределенности измерений . . . 159
5.3 Контактные методы измерений . . . 159
5.3.1 Шаропилотные наблюдения . . . 159
5.3.2 Радиозонды атмосферного пограничного слоя . . . 160
5.3.3 Специально оснащенные вышки и мачты . . . 160
5.3.4 Специально оснащенные привязные аэростаты . . . 162

Стр.

Приложение. Наземное дистанционное зондирование параметров ветра с использованием гетеродинных импульсных доплеровских лидаров 165

Добавление A. Доплеровский ветровой лидар непрерывного излучения 191

Добавление B. Восстановление вектора ветра 192

Добавление C. Применения 197

Добавление D. Типичные области применения и соответствующие требования 202

Справочная и дополнительная литература 207

ГЛАВА 6. ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ МЕТОДЫ ОБНАРУЖЕНИЯ МОЛНИЙ 210

6.1 Введение 210
6.2 Разряд молнии 210
6.2.1 Типы молний, процессы и параметры 210
6.2.2 Электромагнитные характерные признаки молнии 213
6.2.3 Глоссарий терминов 217
6.3 Принципы определения местоположения молнии 219
6.3.1 Общие сведения 219
6.3.2 Пеленгация магнитного поля 220
6.3.3 Метод регистрации времени поступления сигнала 222
6.3.4 Интерферометрия 223
6.4 Характеристики эксплуатационных показателей 224
6.5 Примеры современных систем определения местоположения молний 225
6.5.1 Система картирования грозопоражаемости, 60—66 МГц 226
6.5.2 Национальная сеть обнаружения молний США, 400 Гц — 400 кГц 226
6.5.3 Сеть определения местоположения молнии, 1—200 кГц 227
6.5.4 Сеть точного обнаружения молний США, 1,5—400 кГц 228
6.5.5 Мировая сеть грозового оповещения, 1 Гц — 12 МГц 228
6.5.6 Мировая сеть определения местоположения молний, 6—18 кГц 229
6.5.7 Глобальный набор данных по молниям, ОНЧ 229
6.5.8 Система обнаружения молний, фиксирующая разницу во времени наступления события 230
6.6 Использование систем локализации молний метеорологическими службами . . . 230
6.6.1 Распознавание бурь и оповещения о явлениях суровой погоды 231
6.6.2 Текущая погода, прогнозирование и производная продукция 231
6.6.3 Молнии и климат 232
6.6.4 Проверка наземного ущерба, вызванного молниями 233

Справочная и дополнительная литература 234

ГЛАВА 7. РАДИОЛОКАЦИОННЫЕ ИЗМЕРЕНИЯ 236

7.1 Общие сведения 236
7.1.1 Метеорологический радиолокатор 236
7.1.2 Характеристики радиолокаторов, термины и единицы измерения 238
7.1.3 Требования к точности измерений радиолокаторов 238
7.2 Принципы радиолокационного измерения 240
7.2.1 Импульсные радиолокаторы 240
7.2.2 Распространение радиолокационных сигналов 243
7.2.3 Ослабление в атмосфере 245
7.2.4 Рассеяние облаками и осадками 246
7.2.5 Рассеяние в безоблачной атмосфере 247
7.3 Уравнение радиолокации для целей при наблюдении за осадками 247
7.4 Система и данные основного метеорологического радиолокатора 249
7.4.1 Отражательная способность 250
7.4.2 Доплеровская скорость 251
7.4.3 Двойная поляризация 254
7.5 Обработка сигнала и данных 255

Стр.

7.5.1 Доплеровский спектр . . . 255
7.5.2 Оценка параметра мощности . . . 256
7.5.3 Отражение от наземных объектов и точечные цели . . . 256
7.5.4 Решение доплеровской дилеммы . . . 259
7.6 Оптимизация характеристик радиолокатора . . . 264
7.6.1 Выбор радиолокатора . . . 264
7.6.2 Длина волны и ширина луча . . . 264
7.6.3 Передатчики и мощность излучения . . . 265
7.6.4 Длительность импульса . . . 266
7.6.5 Частота повторения импульсов . . . 266
7.6.6 Антенная подсистема . . . 267
7.6.7 Подсветка . . . 268
7.6.8 Стандартные характеристики метеорологических радиолокаторов . . . 268
7.6.9 Стратегия радиолокационного сканирования по объему . . . 270
7.6.10 Эксплуатационные характеристики радиолокатора . . . 271
7.7 Обслуживание и калибровка . . . 272
7.7.1 Обслуживание . . . 272
7.7.2 Калибровка . . . 274
7.8 Установка радиолокаторов . . . 276
7.8.1 Выбор оптимального места . . . 276
7.8.2 Обмен данными, организация сетей, база данных и обработка данных . . . 278
7.9 Источники ошибки . . . 280
7.10 Обзор метеорологических применений . . . 288
7.10.1 Общее слежение за погодой . . . 288
7.10.2 Обнаружение опасных явлений погоды и предупреждение о них . . . 289
7.10.3 Прогнозирование текущей погоды . . . 295
7.10.4 Оценка осадков . . . 297
7.10.4.1 Вертикальный профиль отражаемости . . . 298
7.10.4.2 Соотношение Z-R . . . 301
7.10.4.3 Корректировка осадкомеров . . . 303
7.10.4.4 Методики измерения осадков с помощью радиолокаторов с двойной поляризацией . . . 303
7.10.5 Оценка скорости ветра/составление карт ветров . . . 306
7.10.5.1. Измерения профиля ветра . . . 307
7.10.5.2 Характеристики конвективного ветра . . . 307
7.10.5.3 Составление карты ветров . . . 308
7.10.6 Инициализация и модели численного прогнозирования погоды . . . 308
7.10.7 Оценка влажности . . . 308
7.11 Метеорологическая продукция . . . 308

Приложение 7.A. Метеоролический радиолокатор – производительность и эксплуатация системы . . . 312

Добавление A. Измерение параметров производительности системы . . . 353

Добавление B. Пример спецификаций радиолокатора . . . 394

Добавление C. Регистрация результатов измерений . . . 396

Добавление D. Рекомендуемые действия по техническому обслуживанию и калибровке . . . 400

Добавление E. Обмен радиолокационными данными . . . 404

Добавление F. Другие радиолокационные системы . . . 405

Приложение 7.B. Руководящие указания ВМО по размещению метеорологических радиолокаторов/использованию общего спектра радиочастот . . . 410

Приложение 7.C. Руководящие указания ВМО по взаимосогласованному размещению метеорологических радиолокаторов и ветроэнергетических установок . 412

Справочная и дополнительная литература . . . 415

Стр.

ГЛАВА 8. МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИЕ ШАРЫ-ЗОНДЫ 421
8.1 Оболочки 421
8.1.1 Основные виды оболочек. 421
8.1.2 Материалы для оболочек и их свойства 421
8.1.3 Технические характеристики оболочек 422
8.2 Свойства оболочек. 422
8.2.1 Скорость подъема 422
8.2.2 Эксплуатационные качества оболочек 423
8.3 Обращение с оболочками 425
8.3.1 Хранение 425
8.3.2 Подготовка к запуску 425
8.3.3 Наполнение 426
8.3.4 Запуск 426
8.4 Дополнительное снаряжение для подъема шаров. 427
8.4.1 Освещение при подъеме в ночное время. 427
8.4.2 Парашюты 427
8.5 Газы для наполнения оболочек 428
8.5.1 Общие сведения. 428
8.5.2 Газовые баллоны. 428
8.5.3 Генераторы водорода 429
8.6 Использование водорода и меры предосторожности 430
8.6.1 Общие сведения. 430
8.6.2 Проектирование помещения 430
8.6.3 Статические заряды 432
8.6.4 Защитная одежда и средства оказания первой помощи 433

Справочная и дополнительная литература 434

ГЛАВА 9. МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИЕ НАБЛЮДЕНИЯ В ГОРОДАХ 435
9.1 Общие сведения 435
9.1.1 Определения и концепции 436
9.1.1.1 Обоснование необходимости станции 436
9.1.1.2 Горизонтальные масштабы. 436
9.1.1.3 Вертикальные масштабы 437
9.1.1.4 Районы источника («отпечатки») 438
9.1.1.5 Концепции измерений 440
9.1.1.6 Описание городской площадки 440
9.2 Выбор места и площадки для размещения городской станции 442
9.2.1 Место размещения 442
9.2.2 Площадка для установки приборов 445
9.3 Установка приборов 447
9.3.1 Изменения в стандартной практике 447
9.3.2 Температура 447
9.3.2.1 Температура воздуха 447
9.3.2.2 Приземная температура 448
9.3.2.3 Температура почвы и автодороги. 449
9.3.3 Атмосферное давление 449
9.3.4 Влажность 449
9.3.5 Скорость и направление ветра 450
9.3.5.1 Средний профиль ветра. 450
9.3.5.2 Высота измерения и установка 451
9.3.5.3 Соображения, касающиеся датчиков ветра 455
9.3.6 Осадки 455
9.3.7 Радиация 457
9.3.7.1 Приходящая радиация 457
9.3.7.2 Уходящие виды радиации радиационный баланс 458
9.3.8 Продолжительность солнечного сияния 460
9.3.9 Видимость и метеорологическая оптическая дальность 460

Стр.

9.3.10 Испарение и другие потоки . . . 461
9.3.11 Влажность почвы . . . 462
9.3.12 Текущая погода . . . 463
9.3.13 Облачность . . . 463
9.3.14 Состав атмосферы . . . 463
9.3.15 Методы зондирования городского пограничного слоя . . . 463
9.3.16 Спутниковые наблюдения . . . 464
9.4 Метаданные . . . 464
9.4.1 Местная окружающая среда . . . 464
9.4.2 Исторические события . . . 466
9.4.3 Соблюдение других рекомендаций ВМО . . . 467
9.5 Оценка оказываемых городом воздействий . . . 467
9.6 Резюме ключевых пунктов для городских станций . . . 467
9.6.1 Принципы работы . . . 467
9.6.2 Выбор места размещения . . . 468
9.6.3 Измерения . . . 468

Справочная и дополнительная литература . . . 469

ГЛАВА 10. МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ НА ДОРОГАХ . . . 471
10.1 Общие сведения . . . 471
10.1.1 Определение . . . 471
10.1.2 Цель . . . 471
10.1.3 Требования к метеорологическим наблюдениям на дорогах . . . 471
10.2 Создание дорожной метеорологической станции . . . 472
10.2.1 Стандартизированные репрезентативные измерения . . . 472
10.2.2 Метаданные станции . . . 473
10.3 Наблюдаемые переменные . . . 473
10.3.1 Метеорологические измерения на дорогах . . . 473
10.3.1.1 Температура воздуха . . . 474
10.3.1.2 Относительная влажность . . . 474
10.3.1.3 Скорость и направление ветра . . . 474
10.3.1.4 Осадки . . . 474
10.3.1.5 Метеорологические радиационные параметры . . . 475
10.3.1.6 Видимость . . . 476
10.3.1.7 Температура дорожного покрытия . . . 476
10.3.1.8 Температура грунта . . . 476
10.3.1.9 Состояние дорожного покрытия и температура замерзания . . . 476
10.3.1.10 Видеонаблюдение . . . 477
10.4 Выбор оборудования для дорожной метеорологической станции . . . 477
10.4.1 Экологические условия на дорогах . . . 477
10.4.2 Обрабатывающая способность удаленной станции . . . 477
10.4.3 Конфигурация сети и варианты оборудования . . . 478
10.4.4 Конструирование для обеспечения надежности . . . 478
10.5 Кодирование сообщений . . . 479
10.5.1 Функции кодирования . . . 479
10.5.2 Руководство ВМО по кодированию . . . 479
10.6 Центральный компьютер управления и сбора данных . . . 480
10.7 К вопросу о связи . . . 480
10.8 Обработка сигналов датчика и формирование сигналов опасности . . . 480
10.8.1 Алгоритмы обработки сигналов . . . 480
10.8.2 Формирование сигналов опасности . . . 481
10.9 Контроль качества измерений . . . 481
10.9.1 Проверка сомнительных значений . . . 482
10.10 Техническое обслуживание дорожной метеорологической станции . . . 482
10.10.1 Дорожная окружающая среда . . . 482
10.10.2 Планы и документация технического обслуживания . . . 483

Стр.

10.10.3 Инспекции и программы работы 483
10.11 Подготовка кадров 483

Справочная и дополнительная литература 484

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 — Измерения 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 III, подготовленное в 2021 году, было утверждено на семьдесят третьей сессии (ИС-73) Исполнительного совета ВМО. По сравнению с изданием тома III 2018 года, это издание включает обновления к главе 4 «Морские наблюдения».

В процессе обновления этой главы ВМО извлекла пользу из превосходного взаимодействия, осуществлявшегося между экспертами морского сообщества и Постоянным комитетом по вопросам измерений, приборного оснащения и прослеживаемости Комиссии по наблюдениям, инфраструктуре и информационным системам. От имени ВМО позвольте выразить мою искреннюю признательность всем тем, чьи колоссальные усилия сделали возможной публикацию этого нового издания.



(Петтери Таалас)
Генеральный секретарь

ГЛАВА 1. ИЗМЕРЕНИЯ НА АВТОМАТИЧЕСКИХ МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИХ СТАНЦИЯХ

1.1 ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

1.1.1 Определение

Автоматическая метеорологическая станция (АМС) определяется как «метеорологическая станция с автоматическим проведением наблюдений и передачей данных» (ВМО, 1992).

В настоящее время АМС представляют собой обычный набор оборудования, который входит в состав наземных станций метеорологических наблюдений. Большинство приборов зондирования подключены к электронной системе сбора данных. Наземные станции наблюдений, оборудованные АМС, могут быть полностью автоматизированными или смешанными системами, что допускает дополнение их визуальными наблюдениями, которые производят специалисты-наблюдатели. Основными функциями АМС являются преобразование данных измерений метеорологических компонентов в электрические сигналы через посредство датчиков, обработка и преобразование этих сигналов в метеорологические данные, а также запись и/или передача получаемой информации.

Подобная комбинированная система приборов, интерфейсов и блоков для обработки и передачи данных обычно именуется автоматизированной метеорологической системой наблюдения (АМСН) или автоматизированной наземной системой наблюдения (АНСН). Обычной практикой стало ссылаться на подобную систему как на АМС, хотя это не является «станцией», полностью соответствующей данному определению. Тем не менее, во всей этой главе АМС может означать именно подобную систему. Регистраторы данных иногда используются в качестве оборудования для сбора данных системы, и они считаются частью АМС.

1.1.2 Назначение

Автоматические метеорологические станции используются для повышения количества и надежности данных приземных наблюдений. Это достигается за счет:

a) содействия увеличению плотности наблюдательных сетей путем получения данных с новых мест их размещения, где нет людей для производства наблюдений, и из труднодоступных или сложных для проживания мест;

b) проведение наблюдений на обслуживаемых персоналом станциях 24 часа в сутки;

c) повышения надежности измерений посредством использования цифровых методов измерений;

d) обеспечения однородности сетей путем стандартизации методов измерений;

e) удовлетворения новых потребностей в наблюдениях и соответствия новым требованиям;

f) уменьшения ошибок персонала;

g) снижения оперативных расходов благодаря уменьшению числа наблюдателей;

h) проведения измерений и представления информации с высокой частотой и/или постоянно;

i) компенсация нехватки численности наблюдателей;

j) устранение ртути со станций.

Что касается пункта (j), то Минаматская конвенция Программы Организации Объединенных Наций по окружающей среде (ЮНЕП) по ртути вступила в силу во всем мире в августе 2017 года, запрещая в полном объеме производство, импорт и экспорт приборов для производства наблюдений (термометры, барометры и т. д.), которые содержат ртуть (ЮНЕП, 2017 г.). Это соглашение является глобальным договором о ликвидации использования ртути в целях защиты как здоровья человека, так и окружающей среды от неблагоприятного воздействия ртути. В результате национальные метеорологические и гидрологические службы (НМГС) также должны уйти от использования приборов на основе ртути. Для большинства стран это приведет к замещению традиционных приборов, содержащих ртуть, электронными (см. том I, глава 1, 1.4.2).

При наличии множества преимуществ, имеются также недостатки или сложности, которые возникают в процессе автоматизации:

a) сети АМС уменьшают (иногда до нуля) количество наблюдателей, но требуют увеличения численности персонала, который необходим для обеспечения технического обслуживания, проверок, проектирования и обновления систем и программного обеспечения, калибровки электронных приборов и так далее;

b) требуется более квалифицированная рабочая сила в области связи, инфраструктуры информационных технологий (ИТ), метрологии и инженерии;

c) значительные изменения могут произойти в характере некоторых наблюдений, которые могут оказать влияние на мониторинг климата; например, переход от ручных визуальных наблюдений к автоматическим измерениям;

d) качество некоторых наблюдений может ухудшиться из-за того, что ключевые части процесса производства измерений не автоматизированы (например, очистка купола приборов для измерения солнечного излучения или поддонов для испарения);

e) для мест, где затраты на оплату труда являются низкими, а технологии дорогостоящими, переход на автоматизацию может не привести к снижению эксплуатационных расходов.

При рассмотрении вопроса о переходе от ручных к автоматизированным наблюдениям рекомендуется тщательным образом учитывать возможности персонала, затраты на инфраструктуру и обслуживания, а также различные воздействия на качество и объем данных.

1.1.3 **Метеорологические требования**

Общие требования, типы, местоположение и состав, частота и сроки наблюдений изложены в документах ВМО (2015*a*; 2015*b*).

Производительность современной электроники более не служит ограничивающим факторов для соблюдения требований к точности, как изложено в томе I, глава 1, дополнение 1.A настоящего Руководства. Неопределенность в области измерений, связанная с АМС, в основном сопряжена с характеристиками самих приборов и оказываемым на них воздействием.

Руководящие указания, содержащиеся в этой главе, необходимо использовать в сочетании с положениями глав, посвященных измерениям различных метеорологических

переменных, содержащихся в томе I, и, в частности, с положениями глав в томе V, посвященных менеджменту качества (глава 1), выборке данных (глава 2) и приведению данных (глава 3).

Как и для любой наблюдательной сети разработка и установка АМС должны быть результатом определенного скоординированного плана по предоставлению данных пользователям в требуемом формате. Для достижения этого необходимо в первую очередь провести обсуждения с пользователями, с тем чтобы подготовить перечень всех функциональных требований для планируемой системы (ВМО, 2017a).

В *Руководстве по Глобальной системе наблюдений* (ВМО, 2010) приведен перечень функциональных спецификаций для АМС, касающихся метеорологических переменных и соответствующих дескрипторов BUFR для использования (приложение III.1), базового набора переменных, которые должны сообщаться стандартными АМС для множества пользователей (приложение III.2), и метаданных наблюдений АМС (приложение III.3).

Недостаточно полагаться на поставщиков оборудования в оценке оперативных потребностей. Комиссия по приборам и методам наблюдений (КПМН) дает следующую рекомендацию Членам ВМО и организациям, производящим метеорологические измерения.

При рассмотрении вопроса о внедрении новых АМС НМГС следует:

a) вводить в эксплуатацию только такие системы, которые сопровождаются необходимым объемом технической документации, с тем чтобы обеспечить достаточную информацию об их возможностях, характеристиках и любых используемых алгоритмах и адекватное понимание этой информации[1];

b) сохранять и развивать достаточные возможности для технической экспертизы, с тем чтобы иметь возможность самостоятельно формулировать технические требования к системам и оценивать приемлемость технических возможностей и характеристик подобных систем и используемых в них алгоритмов[1];

c) в полной мере изучать потребности пользователей и привлекать пользователей к разработке систем АМС;

d) привлекать пользователей к проверке и оценке новых автоматизированных систем;

e) разрабатывать подробные руководства и документацию по системам для оказания поддержки всем пользователям;

f) разрабатывать адекватные программы для упредительных и корректирующих мер оказания поддержки, связанной с техническим обслуживанием и калибровкой АМС и соответствующих приборов;

g) консультироваться и сотрудничать с пользователями, такими как авиационные ведомства, на протяжении всего процесса от конструирования до ввода в эксплуатацию и оперативного использования АМС.

В отношении автоматизации традиционных визуальных наблюдений (текущая погода, видимость и облачность), НМГС должны понимать, что характеристики наблюдений систем АМС отличаются от возможностей наблюдения специалистами-наблюдателями:

a) измерение видимости является репрезентативным для местоположения прибора (если не установлено несколько измерителей видимости), тогда как при визуальном наблюдении используется поле обзора 360 °, но оно ограничено доступными

[1] Рекомендовано Комиссией по приборам и методам наблюдений на ее двенадцатой сессии (1998 г.), рекомендация 2 (КПМН-XII).

визуальными ориентирами. Это означает, что автоматизированное измерение будет иметь высокую точность для конкретного местоположения, но может не быть репрезентативным для более широкой области.

b) облачный покров обычно оценивается на основе данных измерений высоты нижней границы облака с помощью облакомера, комбинированных или усредненных за заданный период времени (10, 30 или 60 минут), в то время как специалист-наблюдатель имеет более широкий обзор неба, по крайней мере, в течение дня. Автоматизированные измерения представляют собой проводимую по небу линии в направлении ветров на высотах. Это может не коррелировать с наблюдением в моменте всей поверхности неба человеком.

c) приборы для оценки текущей погоды в настоящее время не способны выявить весь диапазон кодов текущей погоды, по которым мог бы готовить сообщения специалист-наблюдатель.

По сути, ручные и автоматизированные наблюдения видимости, облачности и текущей погоды четко различаются. В этой связи метеорологическим службам следует улучшить их определение потребностей, касающихся[2]:

a) областей применения, в которых данные более не требуются;

b) областей применения, для которых необходимы иные или новые данные;

c) приоритетных потребностей в данных, которые должны предоставляться АМС.

В тех случаях, когда задачей предлагаемой АМС является обеспечение данными для климатологических записей (либо там, где важна последовательность применительно к измеряемым величинам), важное значение для целостности, однородности и полезности комплектов данных имеет учет следующих вопросов для принятия соответствующих мер[3]:

a) обеспечить перекрытие периодов сопоставимых измерений между обычными и новыми автоматизированными приборами;

b) убедиться, что имеется соответствующая документация о различиях между старым и новым местоположением, а также об изменениях в приборном обеспечении (метаданные)[4].

Время перекрытия зависит от разных измеряемых переменных и от климатического региона. В тропических регионах и на тропических островах время перекрытия может быть меньшим по сравнению с внетропическими и горными регионами. Для обеспечения достаточного эксплуатационного перекрытия между существующими и новыми автоматизированными системами предлагаются следующие общие руководящие указания:

a) скорость и направление ветра: 12 месяцев;

b) температура, влажность, солнечное сияние, испарение: 24 месяца;

c) осадки: 60 месяцев.

Полезным компромиссным вариантом был бы период перекрытия продолжительностью в 24 месяца (т. е. два сезонных цикла).

---

[2] Рекомендовано Комиссией по приборам и методам наблюдений на ее двенадцатой сессии (1998 г.), рекомендация 5 (КПМН-XII).

[3] Рекомендовано Комиссией по приборам и методам наблюдений на ее двенадцатой сессии (1998 г.), рекомендация 3 (КПМН-XII).

[4] Примите к сведению также публикацию ВМО (2010a), раздел 3.2.1.4.4.4(c) — «один год параллельных измерений является недостаточным; предпочтение отдается периоду, по крайней мере, в два года, в зависимости от климатического региона».

1.1.4 Конфигурация системы

АМС обычно не используется как отдельное оборудование. АМС являются частью системы с тремя основными элементами:

a) локальная АМС и связанные с нею приборы зондирования;

b) локальный модем или интерфейс, используемый для подключения АМС к сети электросвязи;

c) центральная система обработки данных, в которую передаются данные со всех АМС, входящих в сеть наблюдений. Эта центральная система обработки данных обычно подключается к ИСВ или к системе автоматической коммутации сообщений (АМСС), связанной с ИСВ.

Следовательно, АМС нельзя рассматривать в отрыве от условий (приборы, связь и центральная система обработки данных), которые оказывают влияние на роль АМС, распределение обработки данных, контроль качества и тому подобное.

1.1.5 Типы автоматических метеорологических станций

Автоматические метеорологические станции используются для удовлетворения различных потребностей, начиная от простого дополнения к комплекту средств наблюдений на обслуживаемых станциях и кончая заменой наблюдателей на полностью автоматических станциях. Материалы ряда международных конференций по АМС дают весьма ценную информацию о современном состоянии, внедрении сетей АМС, миграции от ручных к автоматизированным изменениям, технических аспектах разработки коммуникации и систем, а также контроле качества и обеспечении соответствии стандартам качества (например, см. ВМО, 2017*b*).

Неоперативная АМС: станция, которая регистрирует данные на объекте без автоматической передачи, используется все реже и реже, поскольку данные недоступны в режиме реального времени и не позволяют оперативное выявление возможного сбоя в работе оборудования. Ввиду богатства выбора средств связи в настоящее время может быть рекомендовано использование АМС режима реального времени, даже для климатологических данных.

Поскольку стоимость АМС может быть весьма высокой, ее возможности можно также использовать с целью удовлетворения общих и специальных нужд и требований нескольких применений, таких, как синоптическая, авиационная и сельскохозяйственная метеорология, гидрология и климатология. Их можно также использовать для специальных целей, таких как безопасность ядерной энергетики, качество воздушной и водной сред, метеорологические условия на дорогах. Они, таким образом, являются многоцелевыми АМС.

На практике существует несколько категорий АМС, хотя некоторые виды оборудования могут охватывать несколько таких категорий:

a) облегченные АМС для измерения нескольких переменных, таких как осадки и/или температура воздуха, применимые как для климатологии, так и для использования в режиме реального времени;

b) «базовые» АМС для производства «базовых» метеорологических измерений (обычно температуры воздуха, относительной влажности, скорости и направления ветра, осадков и в некоторых случаях атмосферного давления);

c) «расширенные» АМС с дополнительными параметрами измерений солнечного излучения, продолжительности солнечного сияния, температуры почвы, испарения и так далее;

d) АМС с автоматизацией визуальных наблюдений: «базовые» или «расширенные» АМС с автоматизированным наблюдением видимости, высоты нижней границы облаков и текущей погоды. Такие станции в некоторых странах обычно называют АМСН или АСОС.

Широкий спектр недорогостоящих АМС, включая сопутствующие приборы, можно приобрести в готовом виде, в основном они используются метеорологами-любителями или частными компаниями. Более подробную информацию о недорогостоящих АМС можно найти в дополнении к настоящей главе. Для снижения цены датчики зачастую интегрированы, а приборы третьих сторон недоступны. Датчики и электроника не рассчитаны на независимую калибровку. Следовательно, степень неопределенности измерений выше, чем у «профессионального» оборудования. Трудно оценить степень неопределенности ввиду отсутствия документации и невозможности вскрыть оборудование. Такое оборудование пока еще не отвечает требованиям КПМН.

Также доступны универсальные АМС, разработанные несколькими поставщиками профессионального метеорологического оборудования. Они включают в себя набор встроенных датчиков с адаптированной электроникой и программным обеспечением. Цена, компактность и простота установки - это преимущества этих универсальных АМС, которые обычно позволяют измерять параметры ветра (с помощью ультразвукового прибора), температуру воздуха и относительную влажность во встроенном экране от солнечной радиации, давления и осадков (с помощью радиолокатора, обнаружение попадания капель или с помощью более привычного плювиографа с опрокидывающимся сосудом в верхней части прибора). Но некоторые приборы с трудом поддаются калибровке, они часто сопровождаются ненадлежащей документацией, и все параметры измеряются на одной высоте, что представляет собой существенный недостаток. При установке на высоте примерно 2 м измерение параметров ветра в высшей степени чувствительно к расположенной ниже поверхности; при установке на высоте 10 м для соответствия рекомендациям, касающимся измерения ветра, другие параметры также измеряются на высоте 10 м, что не соответствует рекомендациям КПМН по размещению.

1.1.6 **Телесвязь**

Доступные средства связи на участках, входящих в сеть наблюдений, являются ключевым фактором при разработке и определении спецификаций системы или сети АМС. Можно рассматривать множество технологий: коммутируемая телефонная сеть общего пользования (КТСОП), выделенные линии, сотовые сети, спутниковые передачи, оптоволокно, доступ к Интернету и использование виртуальной частной сети (ВЧС). Основной технический вопрос перед проектированием сети наблюдений заключается в выявлении доступных средств связи. Также важно учитывать жизненный цикл предполагаемого средства связи, поскольку возможны стремительные изменения с точки зрения покрытия, цены (обычно в сторону понижения), но также и с точки зрения устойчивости. Следовательно, АМС и проектирование сети должно позволять легко менять средство или интерфейс связи, как с точки зрения физического интерфейса, так и с точки зрения программного обеспечения.

Необходимо учитывать аспект безопасности информационных технологий, особенно если Интернет используется в качестве промежуточного средства передачи данных и связи между системами. Можно использовать ВЧС и другие методы, связанные с инфраструктурой межмашинной связи (M2M).

Широкое распространение средств связи и Интернета может позволить применять концепцию «Интернета вещей» (ИВ) к отдельным «умным» метеорологическим приборам, тем самым устраняя потребность в АМС. Эта концепция еще не используется для метеорологических приборов, но станет доступной в ближайшем будущем. С такими подключенными приборами концепция АМС может частично уйти в прошлое на объектах, сбор и обработка данных будут в полной мере осуществляться в центральной системе.

1.1.7 Объединение станций в сети

АМС обычно являются частью сети метеорологических станций, при этом каждая станция с помощью различных средств передает свои обработанные данные в центральную сетевую систему обработки данных. Поскольку задачи, выполняемые этой центральной системой, тесным образом связаны и зачастую дополняют задачи АМС, то требуется координировать функциональные и технические требования как к центральной системе, так и к АМС.

При планировании установки и работы сети АМС важное значение имеет рассмотрение различных проблем, связанных с эксплуатацией и калибровкой средств, их организацией, а также с подготовкой и обучением технического персонала. Вопросы плотности сети не рассматриваются в настоящем Руководстве, поскольку их решение определяется конкретными применениями. Тем не менее, оптимальное территориальное размещение и расположение датчиков станций оказывают важное влияние на достижение ожидаемых от АМС результатов, и поэтому они должны быть изучены перед установкой станций.

1.2 КОНФИГУРАЦИЯ СИСТЕМЫ

1.2.1 Сети телесвязи

1.2.1.1 *Односторонняя связь*

Важно определить, ограничены ли средства телесвязи, которые будут использоваться с сетью АМС, односторонним типом связи (АМС по отношению к центральной системе), или же допускается использование двусторонней связи. При ограничении односторонним типом связи, у АМС не будет иметься сведений о том, были ли отправленные данные успешно получены центральной системой. Поэтому целесообразно форматировать сообщения данных с помощью управляющих кодов, которые позволят получателю проверить целостность сообщения. Коды корректировки также могут использоваться для устранения возможных ошибок передачи. Если объем сообщения позволяет сделать это, то передача данных одного и того же измерения (в одном и том же сообщении или в последовательных сообщениях) может стать хорошим методом обработки ошибок и пропущенных приемов.

1.2.1.2 *Двусторонняя связь*

Если телекоммуникационная сеть позволяет сделать это, то АМС может получать подтверждение правильного приема передаваемых сообщений от центральной системы. Это гарантирует передачу всех новых данных, так как последние данные успешно получены центральной системой. Количество передаваемых данных может быть оптимизировано без необходимости использования передачи избыточных данных для обработки недостающих сообщений.

АМС может также получать команды от центральной системы для изменения ее конфигурации, интервалов передачи, повторной передачи старых данных и т. д.

1.2.1.3 *Спутниковая передача*

Существует множество спутниковых телекоммуникационных систем, некоторые из которых способны покрывать любую часть мира.

Помимо своей основной задачи получения изображений и зондирования, практически все геостационарные метеорологические спутники имеют службу/систему сбора данных (ССД) – ретранслятор сообщений от платформ сбора данных (ПСД) с автосинхронизацией в наземный центр для использования спутниковых данных.

ПСД – это односторонний передатчик, связанный с антенной, ориентированной на геостационарный спутник, подключенный к АМС. Сообщения должны быть короткими (несколько сотен байт) из-за низкой скорости передачи канала (100 бод для стандартной или 300, 1 200 или 4 800 бод для высокой скорости, в зависимости от спутника и ССД) и ограниченного временного слота, выделяемого для каждой станции. Поскольку частота передачи распределяется между несколькими ПСД, каждая ПСД должна соблюдать свой выделенный временной слот, для чего ей необходимы точные часы, что теперь легко достигается с помощью местного приемника GPS. АМС с ПСД обычно передает каждый час, во временной слот и через частотный канал, выделенный оператором спутника. Большинство частотных каналов являются «региональными» каналами, используемыми каждым отдельным спутником, но также существуют «международные» каналы, совместно используемые всеми геостационарными метеорологическими спутниками, которые могут использоваться мобильными платформами (буями, судами), которые могут беспрепятственно перемещаться из зоны обзора одного спутника в зону другого. Одним из основных преимуществ ССД является то, что каналы ПСД доступны на безвозмездной основе для метеорологических, геофизических и гидрологических сообщений при условии, что они также доступны через глобальную систему телесвязи (ГСТ) и доступны для обнаружения в ИСВ. Недостатком является то, что необходим конкретный терминал передачи (ПСД) с небольшим выбором производителей из-за довольно небольшого количества пользователей, а также то, что нормализованные современные телекоммуникационные протоколы (протокол Интернета (IP), протокол передачи файлов (FTP), протокол передачи гипертекстовых файлов (HTTP)) недоступны на уровне ПСД.

Растущее количество коммерческих спутниковых телекоммуникационных услуг основаны либо на геостационарных телекоммуникационных спутниках, либо на низкоорбитальных спутниковых группировках. Помимо голосовых услуг, операторы предлагают услуги по передаче данных, как правило, используя стандартные телекоммуникационные протоколы (на основе IP) и услуги межмашинной связи (M2M). Требуемые модемы предназначены для использования не только в метеорологии, они адаптированы ко многим системам сбора данных и поэтому доступны по довольно низким ценам. Это позволяет спроектировать систему, в которой АМС и передающий модем функционально разделены, что позволяет легко заменять телекоммуникационный модем в течение жизненного цикла системы, например, использовать услуги нового (менее дорогого) телекоммуникационного оператора. Иногда использование услуг телесвязи должно быть оптимизировано для минимизации затрат на передачу, часто связанных с количеством передаваемых данных.

1.2.1.4 ***Коммутируемые телефонные сети общего пользования***

КТСОП часто имеются в развитых странах в населенных районах. Они могут легко использоваться для передачи данных при помощи модема, обеспечивая двустороннюю связь с центральной системой. В соединении могут использоваться как аналоговые сигналы (модем генерирует стандартные частоты модуляции для двоичных кодов), так и цифровые (цифровая сеть с интеграцией служб (ЦСИС) (ISDN)). Подключение к центральной системе может осуществляться несколькими способами:

a) двухточечное соединение, центральная система, имеющая модем или пул модемов на нескольких линиях; может использоваться служба удаленного доступа, позволяющая использовать протоколы на основе IP после установления соединения;

b) доступ локальной АМС к провайдеру интернет-услуг, что позволяет использовать интернет-канал для подключения к центральной системе; это устраняет необходимость использования центральной системой пула модемов. При использовании интернета необходимо учитывать аспекты безопасности, как со стороны АМС, так и, в частности, со стороны центральной системы.

Многие страны и операторы связи объявляют о неактуальности КТСОП (аналоговой и ЦСИС). Фиксированные сети из кабельных линий не должны быть заброшены и могут использоваться для связи на основе IP с асимметричной цифровой абонентской

линией (ADSL) или других целей. Тем не менее, ADSL должна быть достаточно близко к коммутатору, поскольку неактуальность КТСОП может снизить доступность соединения через фиксированную линию для изолированных точек.

1.2.1.5 *Сотовые сети*

Сотовые сети развиваются все активнее, сигнализируя о неактуальности КТСОП, и в настоящее время они являются наиболее часто предлагаемым видом телесвязи. Необходимая для них инфраструктура стоит дешевле, чем кабельная сеть фиксированных линий. Существует несколько видов услуг передачи данных с увеличением скорости потока (общая услуга пакетной радиосвязи (GPRS), Edge, 3G, 4G и т. д.). Учитывая объем данных метеорологических наблюдений, достаточно иметь низкую скорость, и предпочтительнее иметь лучшее покрытие, чем более высокую скорость передачи данных. Существует много промышленных модемов с низким энергопотреблением и полностью совместимых с солнечными панелями достаточного размера. Необходимо учитывать технические характеристики для работы при высокой и/или низкой температуре, так как модемы обычно устанавливаются в щиток АМС и поэтому подвержены воздействию местных атмосферных условий.

Можно использовать стандартные протоколы на основе IP (протокол управления передачей (TCP), FTP, HTTP и т. п.). Операторы также предлагают специальные услуги для передачи M2M с использованием выделенной ВЧС для клиента.

1.2.1.6 *Удаленное подключение к сети Интернет или ВЧС*

Спутниковые, КТСОП, ЦСИС и сотовые сети могут использоваться для IP-подключения к центральной системе, через Интернет или ВЧС. Можно также использовать любое другое подключение к сети Интернет, например, оптическое волокно, технологию широкополосного доступа в микроволновом диапазоне (WIMAX), телевизионный кабель и тому подобное.

1.2.1.7 *Другие коммуникационные технологии*

Арендованные линии могут использоваться, если требуется постоянное соединение между АМС и выделенным пользователем (например, аэронавигационным пользователем, которому требуется одноминутная передача данных в режиме реального времени). Тем не менее, предложение выделенных двухточечных линий замещается (операторами) IP-соединениями, использующими доступную сеть передачи данных.

В районах, не охваченных КТСОП или сотовой сетью, могут использоваться выделенные радиолинии. Но выделение диапазона частот соответствующими регулирующими органами может быть затруднено из-за конкуренции между пользователями диапазона радиочастот. Имеются специальные диапазоны радиосвязи, зарезервированные для передачи данных, с ограничением мощности радиопередачи, что ограничивает расстояние до нескольких сотен метров или нескольких километров. Такие радиопередачи могут быть пригодны для подключения удаленного прибора к АМС, например, на аэродроме.

Появляются новые технологии маломощных широкомасштабных сетей (LPWANs). LPWAN может использоваться для создания частной беспроводной сети приборов, но также может быть услугой или инфраструктурой, предлагаемой третьей стороной, что позволяет владельцам приборов использовать их в полевых условиях без затрат на технологию шлюзов. Объем передаваемых данных ограничен несколькими десятками или сотнями байт, что сопоставимо с почасовыми метеорологическими наблюдениями (в зависимости от типа файла передаваемых метеорологических данных). Основными преимуществами являются: относительно большая дальность действия (до нескольких километров

при надежной передаче данных), очень низкое энергопотребление передатчиков (долговечность до пяти лет на одном аккумуляторе) и низкая стоимость, как с точки зрения аппаратного обеспечения, так и телекоммуникационного обслуживания.

1.2.2 **Центральная система обработки**

Большинство АМС связаны с центральной системой, которая может функционально разделяться на две части:

a) платформа сбора, предназначенная для сбора данных с АМС;

b) платформа обработки, получающая данные с одной или нескольких платформ сбора и функционирующая в качестве интерфейса, обращенного к пользователям данных наблюдений.

Функция сбора и обработки данных для надзора за сетью АМС – стандартные задачи системы надзорного контроля и получения данных (СНКПД). СНКПД используются во множестве промышленных процессов, на фабриках, а также в любой точке, где полевые устройства (приборы) необходимы для осуществления контроля и взаимодействия с производственным процессом. Проблематика наблюдательной сети схожа в подобных системах: наблюдательная сеть состоит из полевых устройств (АМС плюс приборы), инфраструктуры связи, а также сбора и контроля данных (наблюдательной сети). Множество коммерческих пакетов программного обеспечения, которые используются для сбора и мониторинга метеорологических наблюдений, разрабатываются выпускающими СНКПД структурами. Системы разрабатываются производителями гидрометеорологического оборудования и могут быть конкретно ориентированы на их собственные системы получения данных (АМС), а не выпущены с многоцелевого программного обеспечения типа СНКПД, однако они обладают аналогичным функционалом.

1.2.2.1 ***Платформа сбора***

Система наземных наблюдений зачастую состоит из нескольких сетей АМС, охватывающих различные потребности и часто установленных в последовательные периоды. Таким образом, редко наборы оборудования однородны; различные типы АМС, средств связи и протоколы носят смешанный характер. Каждое поколение станций (АМС плюс модем) функционально связано с соответствующей платформой сбора. Для каждого использования возможно учитывать, что каждый тип АМС с заданной сетью связи ассоциирован с конкретной платформой сбора. В случае множественных способов телесвязи может иметься набор платформ сбора. В зависимости от требуемого программного обеспечения и оборудования эти платформы сбора могут внедряться в той же системе или по отдельности.

Платформа сбора обладает подключением к используемой сети телесвязи. Когда необходимо использование модемов (а именно – для КТСОП, ISDN, Глобальной системы мобильной связи (ГСМ) и т. п.), осуществляется управление пулом модемов. Модемы могут представлять собой физическое оборудование (один модем – одна единица оборудования), либо логический эквивалент в составе физического оборудования, такой как сервер удаленного доступа (СУД). Когда количество входящих линий меньше числа АМС, с которых необходимо осуществление сбора данных, что, как правило, и происходит, система должна разрабатываться для совместного использования линий. Если АМС инициирует подключение, необходимо следование «профилю телесвязи», включая график вызовов для совместного использования линий с другими станциями. Если подключение инициируется платформой сбора, АМС могут вызываться последовательно платформой сбора. В любом случае платформа сбора должна проферять оперативный статус каждой входящей линии, с тем чтобы выявлять проблемы, такие как бесшумные линии, процент ошибок связи по каждой линии и тому подобное.

Все чаще сети телесвязи используются в качестве порта для локальной сети управляющего сетью (с применением Интернет или предпочтительно туннеля ВЧС через посредство Интернет). Преимуществом в данном случае является тот факт, что платформа сбора не работает с модемами, а это означает, что физический интерфейс с сетью телесвязи управляется оператором телесвязи. Может использоваться сстандартный протокол на базе IP, такой как передачи FTP, имейлов и так далее.

Платформа сбора должна осуществлять мониторинг связи с сетью АМС путем проверки фактических подключений в сравнении с ожидаемыми. Должны также выявляться бесшумные АМС. Инструменты надзора должны внедряться для предоставления глобального обзора состояния сети (например, зеленые точки для ожидаемых и полученных АМС, красные – ожидаемыз и не полученных) с подробной информацией по каждой станции (такой как метка времени наиболее недавних полученных данных), а также все подключающиеся линии (если таковые имеются).

Если сеть телесвязи имеет возможность установления двусторонней связи, платформа сбора также используется для конфигурации сети и отдельных АМС, в частности с точки зрения графика передач, типа данных для сбора и тому подобное.

Должны устанавливаться средства защиты, с тем чтобы избежать несанкционированного доступа к системе. К ним могут относиться использование сетевого экрана и контроль за адресом IP входящего соединения, либо номер телефона входящего соединения для аутентификации.

1.2.2.2 ***Платформа обработки***

Данные, поступающие с одной или нескольких платформ сбора направляются на платформу обработки. Первичная функция этой платформы состоит в том, чтобы предоставлять данные измерений конечным пользователям. Также весьма важно использовать эту платформу для оказания поддержки в вопросах технического управления сетью и обеспечения технического надзора за наблюдательной сетью. Различные индикаторы могут использоваться для оказания содействия управляющему сетью, такие как:

a) процент отсутствующих данных по всей сети, по каждой станции, за период в один час, за сутки и тому подобное;

b) оповещения по отсутствующим данным для каждого измеряемого параметра (такого как температура воздуха, скорость и направление ветра, а также давление);

c) оповещения по сомнительным или ошибочным значениям после применения проверок контроля качества;

d) напряжение аккумулятора и оповещения по каждой АМС в случае слишком низкого давления (измерения напряжения могут не быть существенными в процессе зарядки аккумулятора, например, от солнечной батареи; необходимо использовать проводимые в ночное время измерения или минимальные дневные значения);

e) наличие или отсутствие сетевого электроснабжения (если таковое имеется в установке), с тем чтобы выявить сбои, такие как выключение автомата защиты сети, которые могут быть скрыты буферным аккумулятором;

f) при использовании приборов интеллектуального зондирования зачастую имеются сервисные параметры в дополнение к желаемым метеорологическим переменным. Эти сервисные параметры полезны для выявления или предвосхищения проблем с прибором (таких, как требуемая очистки) и должны приводить к отправке оповещений управляющему техническим обслуживанием.

Стандартные оперативные функции платформы обработки:

a) контроль качества необработанных данных: алгоритмы контроля могут быть частично разделены между самой АМС и центральной системой;

b) расчет метеорологических параметров для индивидуальных измерений, например, расчет температуры точки росы по данным измеряемой температуры воздуха и относительной влажности. Этот расчет может совместно использоваться АМС и центральной системой.

c) Когда обработка данных может осуществляться либо на уровне АМС, либо центрального сервера, рекомендуется выбирать центральный сервер, поскольку в таком случае проще осуществлять разработку и обновление программного обеспечения. Однако некоторый объем обработки данных самой АМС может быть необходим в случае локального использования наблюдений (например, локальный наблюдатель или аэродром), если только используемая сеть телесвязи не считается в достаточной степени совместимой и безопасной для загрузки локальных данных наблюдений из центральной системы в диспетчерский пункт. Локальное аэронавигационное использование представляет собой особый случай использования, когда может потребоваться локальная обработка данных для передачи диспетчерам воздушного движения локальных данных наблюдений, через посредство локальных аэронавигационных сводок.

d) При кодировке стандартных сообщений для САКС в качестве источника данных обычно используются НМГС; стандартные сообщения в формате, необходимом для распределения по ГСТ, могут также форматироваться в САКС, если не форматироваться напрямую в центральной платформе обработки. Для наземных наблюдений буквенно-цифровые сообщения (SYNOP) заменяются на самостоятельно описывающие коды (таблично ориентированные кодовые формы, ТОКФ). Образцы BUFR были разработаны для наземных наблюдений (ВМО, 2015c).

1.2.3 **Приборы**

Все современные приборы зондирования подходят для использования с АМС. Приборы описаны в томе I данного Руководства. Некоторые ограничения для их использования с АМС таковы:

a) Они должны быть надежными и требовать минимального технического обслуживания и очистки, поскольку во множестве точек нет местных сотрудников по технической поддержке.

b) Они должны быть легко взаимозаменяемыми, и не требовать или требовать лишь незначительных изменений в части конфигурации и калибровки АМС.

c) Их подключение к АМС должно быть полностью задокументировано с точки зрения кабелей, энергоснабжения (диапазон, потребление электроэнергии с или без обогрева, период нагревания, если включено или выключено энергоснабжение, с тем чтобы снизить потребление электроэнергии, и так далее), а также функции передачи (отношения между параметрами выработки электроэнергии и метеорологическими параметрами).

Приборы с аналоговым выводом, как правило, дают лишь одну измеряемую метеорологическую переменную. Приборы с цифровым выводом дают измеряемую метеорологическую переменную, но также предоставляют дополнительные сервисные параметры, полезные для мониторинга состояния прибора и оптимизации его технического обслуживания. Важно, чтобы сервисные параметры также учитывались системой (АМС плюс центральная система).

Радиометры (пиранометры, пиргелиометры и так далее) представляют собой отдельный случай. В большей части этих приборов используется термопреобразователь, который часто напрямую подключается к АМС. В этой связи калибровочный коэффициент термопреобразователя должен применяться за датчиками, либо на самой АМС, либо в центральной системе сбора данных. Когда радиометр заменяется на площадке (по крайней мере, для регулярной калибровки), связанный с ним калибровочный коэффициент должен меняться соответствующим образом в системе. Опыт показывает, что связанные с человеческим фактором ошибки, порой, случаются (например, замена прибора или чувствительного элемента без одновременного обновления калибровочного коэффициента). Некоторые модели радиометров включают микропроцессор для преобразования аналогового сигнала в численные цифровые значения в самом приборе; калибровочный фактор в таком случае включается для прибора и обновляется после калибровки. Такие приборы в полной мере взаимозаменяемы, и обновление калибровочного коэффициента в системе не требуется, что снижает вероятность связанных с человеческим фактором ошибок.

Измерения ветра (средние значения, порывы) требуют высокой скорости сбора (см. Том I, глава 5, 5.8.2) и расчета средних значений и порывов за более продолжительные периоды (10 минут для синоптического использования, 2 минуты для локального аэронавигационного использования). Расчеты могут производиться на самой АМС, однако множество современных анемометров обладают встроенной функцией расчета параметров ветра. Одним из преимуществ является сокращение интервала получения данных на уровне АМС со стандартными ежеминутными обновлениями данных ветра, а не получения образцов данных по нескольким Гц. При этом получение и архивирование необработанных данных ветра до 1 Гц и выше может быть желательным для некоторых применений, например, в расследовании внештатных и аварийных ситуаций для гражданской авиации.

Настоятельно рекомедуется наличие у подключенных к АМС барометров цифрового вывода, с тем чтобы исключить дополнительную неопределенность при преобразовании аналогового сигнала в барометрические данные. Действительно, использование барометра с аналоговым выводом требует высококачественного преобразователя (ADC) аналогового сигнала в цифровой (А/Ц), с тем чтобы добиться соответствия требованиям в области неопределенности и эффективности измерений, обозначенных в томе I, глава I, дополнение 1.A к настоящему Руководству.

Желательным может быть дублирование (или даже увеличение втрое) количества некоторых приборов. Такой подход способен свести к минимуму вероятность отсутствующих значений в случае сбоев с приборами и/или обеспечить избыточность данных измерений в системе, с тем чтобы выявлять возможные плавающие значения приборов. Разница в показаниях двух приборов говорит о дрейфе по меньшей мере одного из них; если используются три прибора, возможным становится автоматическое выявление того, какой инструмент в настоящий момент характеризуется плавающими значениями, чтобы эти значения исключить. Эта процедура использования множественных чувствительных элементов применяется в некоторых приборах. Ряд коммерческих моделей барометров оборудован одной, двумя или тремя ячейками.

1.3 АППАРАТНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ АВТОМАТИЧЕСКИХ МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИХ СТАНЦИЙ

Существует несколько вариантов комплектации АМС:

a) отдельно стоящее оборудование, специально разработанное для производства метеорологических измерений. В зависимости от производителя оно разрабатывается, с тем чтобы принимать заданный перечень приборов. В связи с этим его может оказаться сложно использовать или добавлять к нему новые приборы, которые не поддерживаются. Будучи разработанным для производства

метеорологических измерений метеорологической отраслью, оно характеризуется высокой вероятностью того, что все потребности могут быть удовлетворены и, тем самым, ограничение на добавление новых приборов может не быть проблемой.

b) промышленный регистратор данных, не специфический для производства метеорологических измерений. Преимущество состоит в потенциально большей эксплуатационной адаптируемостью, с аналоговым вводом, счетчиками и тому подобное. Также затраты могут быть ниже, чем на специализированное оборудование. В некоторых случаях, когда метеорологические приборы имеют жесткие характеристики, такие как низкое напряжение на выходе радиометра с использованием термопреобразователя, такие регистраторы данных могут не подойти. Измерения ветра также представляю собой отдельный случай, если регистратор данных должен выводить параметры ветра с замерами по нескольким частотам.

c) В некоторых комплектациях получение данных разделяется между отдельными электронными блоками; некоторые из них связаны с прибором для оцифровки аналогового выхода, будучи максимально возможно приближенными к прибору. Эти интерфейсные блоки взаимодействуют с центральным процессором.

d) В других комплектациях цифровые или «умные» приборы и аналоговые приборы, данные которых оцифровываются при помощи электронного интерфейса, непосредственно подключены к ноутбуку, ПК или промышленному ПК, установленному либо в помещении, либо непосредственно в поле. Это позволяет использовать аппаратное обеспечение и программное обеспечение стандартных микрокомпьютеров. Однако кабели и защита от перенапряжения при этом не должны упускаться из виду.

e) При необходимости взаимодействия специалиста-наблюдателя с АМС, например, для ввода данных визуальных наблюдений, обычно используется локальный ПК, как для вывода информации о данных наблюдений на локальном уровне, так и для редактирования данных визуальных наблюдений. Такой компьютер также может передавать данные наблюдений локальным пользователям, таким как пользователи в сфере аэронавигации.

Компоновка АМС обычно включает следующее:

a) для стандартного района наблюдений (см. том I, глава 1 данного Руководства и ВМО, 2010) – ряд автоматизированных приборов, установленных на рекомендованных позициях и подключенных к одному или нескольким блокам сбора данных при помощи интерфейсов, расположенных так, чтобы избежать помех одного другому, а также соединенных с центральным процессорным блоком (ЦПБ) с помощью экранированных кабелей, линий оптико-волоконной связи или радиосвязи;

b) ЦПБ для сбора данных от приборов и преобразования в читаемый компьютерный формат, необходимой обработки данных при помощи основанной на микропроцессоре системы в соответствии с определенными алгоритмами, временного хранения обработанных данных и их передачи удаленным пользователям метеорологической информации;

c) модем или интерфейс сети телесвязи, который используется для передачи данных в центральную систему;

d) источник постоянного питания, обеспечивающий энергией различные части станции;

e) Для конкретных применений дополнительные элементы станции могут включать местные терминалы для ручного ввода и редактирования данных, дисплеи, принтеры, а также регистраторы.

Рациональной практикой является разработка системы на модульной основе, с тем чтобы адаптировать ее к новым приборам, новым переменным, изменениям в сети телесвязи и так далее. Однако высокий уровень модульности может привести к росту затрат на оборудование; в этой связи важно предвосхитить возможные будущие изменения в максимальной степени, с тем чтобы найти оптимальный компромисс между модульностью, в также компактностью и стандартностью компоновки (по всей сети). Ввиду короткого жизненного цикла многих сетей телесвязи настоятельно рекомендуется использовать АМС с модульным терминалом телесвязи.

Для целей обслуживания АМС компоновка должна способствовать работе «в поле» по упредительному и корректирующему техобслуживанию (например, регулярная замена требуется для приборов, которые нуждаются в калибровке). Опять же, модульность представляет собой одно из решений или, как вариант, возможность с легкостью замещать всю АМС, если это – отдельно стоящая станция. Разъемы с закрепленным положением могут быть предпочтительнее проводов, непосредственно подключенных к клеммной колодке.

В состав важнейших частей АМС часто входят компоненты, неправильное функционирование или выход из строя которых серьезно искажают или делают бесполезными выходные данные. Включение схемы для автоматического мониторинга состояния этих компонентов является эффективным средством постоянного контроля их производительности во время работы (*встроенное испытательное оборудование*). Например, детектор сбоя питания, который перезапускает процессор и продолжает работу АМС после сбоя питания; «сторожевой» таймер для контроля правильной работы микропроцессоров; и тестовые схемы для контроля работы подсистем станции, таких как напряжение аккумулятора и работа зарядное устройство, аспираторы (если используются экраны с вентиляцией по температуре и влажности), преобразователи ADCs и нагреватели. Информация о состоянии также должна отслеживаться и передаваться на центральный сервер для автоматического контроля качества и обслуживания.

1.3.1 Центральный процессорный блок

Ключевым элементом автоматической метеорологической станции является ЦПБ. Конфигурация его аппаратного обеспечения зависит от сложности и общего объема функций, возложенных на станцию. Как правило, основные функции ЦПБ заключаются в сборе, обработке, хранении и передаче данных.

На большинстве существующих АМС все эти функции выполняются одной микропроцессорной системой, установленной в защищенном от воздействий погоды месте, по возможности, ближе к датчикам или в закрытом помещении. Когда устройство располагается вблизи приборов, обработка данных производится на месте, что позволяет уменьшить количество передаваемых данных и представлять эти данные в форме, пригодной для непосредственной подачи в обычные каналы связи. Однако в этих случаях ЦПБ уязвим к отказам в энергоснабжении и обычно должен быть защищен от влияний внешней среды, в которой ему предстоит работать. Если блок располагается в помещении, то, как правило, его можно подсоединить к сети электропитания и эксплуатировать в обычных комнатных условиях. Однако подобная конфигурация требует большого числа длинных сигнальных кабелей и соответствующих формирователей сигналов.

В зависимости от местных условий и требований различные устройства могут выполнять различные функции ЦПБ. В таких случаях каждое устройство имеет свой собственный микропроцессор и соответствующее программное обеспечение, может располагаться в различных местах станции и связываться между собой посредством надежных межпроцессорных линий и процедур передачи данных. Устройства работают по схеме главный–подчиненный, при этом устройство обработки данных является главным. Примером могут быть устройства сбора данных, установленные в районе, близком к приборам, и соединенные с устройством обработки или передачи данных ЦПБ одной или несколькими телефонными линиями, использующими цифровую передачу данных. Также могут использоваться беспроводные каналы с низким энергопотреблением, и некоторые

диапазоны частот выделяются для передачи данных без конкретной процедуры санкционирования, поскольку предполагается маломощный сигнал. Эти устройства могут состоять из одного прибора (например, интеллектуальный прибор, такой как лазерный облакомер), ряда аналогичных датчиков (например, термометров) или ряда различных приборов, таких как аналоговые приборы, подключенные к регистратору данных в поле.

Аппаратное обеспечение по обработке данных является средоточием ЦПБ. Его основные функции состоят в том, чтобы действовать в качестве основного средства контроля входных/выходных данных из и в ЦПБ, а также осуществлять надлежащую обработку всех входных данных путем соответствующего программного обеспечения.

Первые АМС были оборудованы 8-битными микропроцессорами и имели ограниченный объем памяти (32 to 64 килобит). Системы, использовавшие 16-, 32- или 64-битные микропроцессоры с существенным объемом жесткой памяти на настоящее время являются привычным явлением. Эти АМНС предоставляют больше средств ввода/вывода, которые функционируют на гораздо больших скоростях обработки данных и способны производить сложные вычисления. Наряду с этим аппаратным обеспечением применяется сложное программное обеспечение. В дополнение к запоминающим устройствам с произвольной выборкой (ЗУПВ) для данных многие системы имеют доступ к постоянным запоминающим устройствам (ПЗУ). Часть спектра ПЗУ включает программируемое постоянное запоминающее устройство (ППЗУ) для хранения программ. ЦПБ часто использует постоянный ЗУПВ (ЭСППЗУ, также известное как флеш-память). Постоянные системной конфигурации могут модифицироваться, а данные безопасно храниться в случае перебоев с энергоснабжением. Программное обеспечение АМС может загружаться при помощи локального подключения, либо даже из центральной системы. Размер имеющейся памяти в настоящее время достаточно велик для запоминания данных наблюдений за десятки или сотни дней.

Часы реального времени: ЦПБ АМС должен быть оснащен круглосуточными часами реального времени на аккумуляторе, которые обеспечивали бы отсчет времени даже в случае отключения электричества. Соблюдение точности фактических часов АМС требует особого внимания к обеспечению корректного считывания, интервалов выборки и меток времени. Стабильность показаний часов с точностью до секунды за 24-часовой период рекомендуемо и достижимо. Часы в режиме реального времени также должны быть синхронизированы с сигналом GPS или централизованными эталонными часами, имеющимися в сети телесвязи (такими как сервер времени через посредство Интернета).

1.3.2 **Интерфейс приборов измерения**

Как правило, аппаратное обеспечение для сбора данных включает:

a) аппаратное обеспечение формирования сигнала, предотвращающее нежелательные помехи от внешних источников, искажающих первичные сигналы прибора, защиту оборудования ЦПБ и приведение сигналов к форме, пригодной для дальнейшей обработки данных;

b) электронное оборудование для сбора данных с аналоговыми и цифровыми входными каналами и портами, аппаратурой сканирования и преобразования данных для ввода сигналов в память ЦПБ.

Низкочастотное фильтрование: фильтры используются для отделения желаемых от нежелательных сигналов. Нежелательные сигналы – это шум, наводки со стороны линии переменного тока, помехи от радио и телевизионных станций, а также сигналы с частотами выше половины частоты основного сигнала. Обычно для подавления нежелательных источников ошибки используется низкочастотный фильтр, исключающий ту часть частотного спектра, в которой не бывает желаемых сигналов. Эти фильтры могут реализовываться либо путем применения аналоговых методов (электроника), либо цифровых фильтров.

Усилители: сигналы аналогового прибора могут варьироваться по амплитуде в широком диапазоне. А/Ц преобразователь при этом требует сигнала высокого уровня для максимальной эффективности. Во многих случаях усилительный модуль используется для усиления возможных сигналов низкого уровня до желательной амплитуды. Усилительные модули иногда используются также для стандартизации выходного напряжения всех датчиков и приведения к общему уровню напряжения постоянного тока, например 0–5 В, с тем чтобы использовать обычные высокопроизводительные А/Ц преобразователи.

Сопротивления: специальные модули используются для преобразования сопротивлений, например, платиновых термометров, в выходное напряжение сигнала, обеспечивая необходимые выходные токи. Измерение температуры особенно чувствительно к способу преобразования из сопротивления в температуру. В низкокачественных системах могут использоваться двух- или трехпроводный подход, в то время как в более усовершенствованных комплектациях используется четырехпроводный метод и переключение направления измерения. Это позволяет компенсировать любое сопротивление выводов.

Функция сбора данных: функция сбора данных заключается в сканировании выходов приборов или формирующих модулей приборов с заранее заданной скоростью и преобразовании сигналов в формат, пригодный для считывания компьютером.

Для размещения метеорологических приборов различных типов аппаратное обеспечение этой функции состоит из входных/выходных каналов различных типов, рассчитанных на все возможные электрические выходные характеристики датчиков или модулей формирования сигнала. Общее количество каналов каждого типа зависит от выходных характеристик приборов и определяется типом применения.

Аналоговые вводы: число аналоговых каналов зависит от базовой конфигурации оборудования. Обычно базовая конфигурация может быть расширена за счет дополнительных модулей, которые дают большее количество каналов ввода. Особое значение имеют аналоговые входные каналы, поскольку большинство обычно используемых метеорологических приборов, таких как приборы для измерения температуры и влажности, а также радиометры, дают сигнал напряжения либо непосредственно, либо прошедший через формирующие модули датчика.

Задачи по сбору данных представляют собой сканирование каналов и их А/Ц преобразование. Сканер является лишь устройством для переключения, который позволяет обслуживать несколько каналов аналогового ввода с помощью одного А/Ц преобразователя. Программное обеспечение может контролировать эти переключатели для отбора любого из каналов для обработки в конкретный момент времени. В некоторых конфигурациях АМС отдельный А/Ц преобразователь используется для каждого канала. А/Ц преобразователь преобразует исходную аналоговую информацию в пригодную для считывания компьютером (цифровую, бинарный код). Разрешение А/Ц выражается в битах. Разрешение А/Ц 12 бит соответствует примерно 0,025 %, 14 бит – 0,006 %, а 16 бит – 0,0015 % полномасштабного диапазона А/Ц. В первом поколении АМС замещение и дополнение усилителей и А/Ц преобразователей должно было корректироваться при помощи потенциометров. В современной электронике используются стационарные, стабильные и точные эталонные элементы, не допускающие каких-либо ручных корректировок электронной цепи.

Параллельный цифровой ввод/вывод: Общее количество отдельных каналов в большинстве случаев группируется в блоки от 8 до 16 бит с возможностью расширения. Они используются для отдельного бита или состояния измерения или для подключения приборов с параллельным цифровым выводом (например, флюгеры с выводом в коде Грея).

Импульсы и частоты: обычно количество каналов ограничено, поскольку лишь несколько приборов дают такие сигналы. Типичными приборами являются анемометры и дождемеры (с опрокидывающимся сосудом). Используются счетчики с низкой и

высокой скоростью, накапливающие импульсы в памяти ЦПБ. Счетчики должны использовать аналоговые или цифровые фильтры для исключения нежелательных импульсов, таких как электромагнитные выбросы.

Последовательные цифровые порты: это отдельные асинхронные последовательные каналы вход/выход для связи с интеллектуальными приборами. Порты обеспечивают протокольную связь между устройствами на короткие (рекомендованный стандарт 232 (PC-232), несколько метров) и длинные (PC-422/485, несколько километров) расстояния. Иногда на одной линии и входном порте могут быть различные приборы или измерительные системы, и каждый из приборов поочередно запрашивается с помощью кодовых слов. К сожалению, универсальная стандартизация диалогового протокола с приборами отсутствует, за исключением протоколов или форматов, которые определяются некоторыми производителями для их собственного оборудования. SDI-12 (серийный цифровой интерфейс на 1200 бод) представляет собой асинхронный последовательный протокол телесвязи для интеллектуальных датчиков, при помощи которых осуществляется мониторинг данных окружающей среды, которые поддерживаются некоторыми приборами и АМС.

Соединение Ethernet: некоторые приборы весьма автономны и могут осуществлять связь либо с АМС, либо даже с центральной системой (ИВ) с использованием протоколов IP.

1.3.3 Кабельное подключение и защита от перенапряжения

Подключения: кабели и механическая коммутационная система необходимы для подключения приборов к электронным устройствам сбора данных. Кабели могут подключаться непосредственно к системе сбора данных через посредство клеммной колодки с привинченными, спаянными или самофиксирующимися соединителями. Сальниковые уплотнения часто используются перекрестно на коробке корпуса АМС. Еще одно решение – использование парных соединителей, один из которых крепится на коробку корпуса (и подключается к электронному оборудованию). Преимущество состоит в возможности с легкостью разблокировать прибор и его кабель для замены. Тип подключения и местоположения возможных соединителей должны выбираться для содействия оперативной деятельности на местах, памятуя об ожидаемой периодичности замены приборов (например, для целей регулярной калибровки).

Кабели прибора: электрические сигналы от приборов, входящих в систему сбора данных, могут содержать нежелательный шум. Мешает ли этот шум, зависит от отношения сигнала к шуму и от конкретного применения. Цифровые сигналы практически невосприимчивы к шуму в связи с их дискретным (и высокоуровневым) характером. Аналоговые сигналы, в отличие от цифровых, подвергаются помехам даже сравнительно невысокого уровня. Основными путями передачи шума являются емкостные и индуктивные соединения. С целью снижения ошибок, возникающих из-за емкостного соединения, используют экранированные кабели. Для снижения индуктивной связи эффективным средством является использование дополнительных скрученных пар проводов.

Защита от перенапряжения: в случаях, когда АМС может подвергаться случайным всплескам высокого напряжения, обязательной является установка защиты, с тем чтобы избежать возможного повреждения аппаратуры. Высокое напряжение может возникать от магнитных полей, статического электричества и, особенно, от грозовых разрядов. Модули защиты от перенапряжения должны легко поддаваться замене. Они зачастую представляют собой однократную защиту, в связи с чем их состояние должно легко поддаваться тестированию, оптимальным решением является визуальная метка их состояния. Основное правило для рациональной защиты от перенапряжения состоит в том, чтобы обеспечивать эквипотенциальное соединение различных электрических масс системы, включая экран кабелей. Заземляющие соединения должны быть как можно короче, чтобы облегчить прохождение пиков высокого напряжения через эти соединения, а не через электронное оборудование. Заземление АМС и ее периферийных устройств (включая приборы) должно быть

подключено к наземной сети площадки (при наличии). При отсутствии, должен быть установлен местный заземляющий электрод и соответствующая скрытая заземляющая сеть, чтобы обеспечить оптимальный путь для всплесков тока.

Цифровая изоляция: электрические модули используются для получения входных цифровых сигналов с одновременным разрывом гальванического соединения между источником сигнала и измерительной аппаратурой. Эти модули (модемы) не только изолируют, но также трансформируют входные сигналы в стандартные уровни напряжения, которые можно считывать с помощью оборудования для сбора данных. Гальваническая изоляция позволяет избежать использования кабельных линий для реализации эквипотенциального соединения между удаленными точками (медные провода и прокладка на протяжении сотен метров весьма затратны). Тем не менее, защита от перенапряжения цифровой линии остается необходимой, поскольку высокочастотные всплески способны проходить через трансформаторы даже с гальванической изоляцией.

1.3.4 **Энергообеспечение**

Конструкция и технические возможности АМС в значительной мере зависят от используемого способа энергопитания. Наиболее важной характеристикой энергообеспечения АМС является работа с высокой устойчивостью и без помех. С учетом безопасности, широкого распространения и доступности аккумуляторных батарей в 12 В следует уделить внимание использованию источника энергообеспечения постоянного тока в 12 В. Там, где имеется питание от сети, аккумуляторы могут находиться в режиме непрерывного подзаряда от сети. Преимуществом такой системы является автоматическое резервирование энергопитания в случае отказа электросети. Энергоемкость буферных аккумуляторов зависит от средней потребляемой мощности системы (АМС плюс приборы, включая обогрев плюс модем) и допустимой продолжительности перебоев сетевого питания.

Автоматические метеорологические станции, расположенные в удаленных местах, где нет электросети, должны обходиться аккумуляторами, практически всегда подпитываемыми солнечными фотоэлементами или иными источниками питания, такого как дизельный, либо ветровой или водяной генератор. Однако такие системы с недостаточным питанием, как правило, не могут обеспечивать работу более сложных приборов, например, датчиков измерения высоты нижней границы облаков и видимости, для которых требуется большое количество энергии. Более того, АМС с дополнительным оборудованием, таким как подогреватели (например, в анемометрах, дождемерах) и вентиляторы, могут также потреблять значительный объем энергии, что соответственно ограничивает установку таких АМС теми площадками, где имеется сетевое электроснабжение. Если же только питание от сети многоцелевых и сложных систем может обеспечить их функционирование по полной программе, то необходимо предусмотреть резервное энергопитание, либо по крайней мере часы системы, процессор и какое-либо запоминающее устройство, где могут содержаться последние данные, необходимые для перезапуска станции на автоматический режим. Также рациональной практикой является отключение системы при снижении напряжения в аккумуляторах ниже определенного порогового уровня для их защиты, поскольку такие аккумуляторы не выдержат глубокой разрядки.

Важно, чтобы система была спроектирована для измерения и отчетности о состоянии источника питания, например о напряжении батареи, зарядном токе, передаваемом солнечными батареями, а также о наличии или отсутствии сетевого питания.
Эти параметры состояния должны быть переданы в центральную систему, чтобы оптимизировать операции технического обслуживания и оповестить обслуживающий персонал о любых проблемах. Питание от сети защищено автоматическим выключателем, который может отключиться в случае скачка напряжения. На изолированной площадке перемещение персонала только для повторного включения автоматического выключателя может быть весьма затратным и занимать много времени, поэтому может быть полезной

установка автоматического выключателя с возможностью его повторной активации с помощью дистанционной команды, если только отключение не связано с электрической цепью по умолчанию, которую требуется исправить.

1.3.5 Защита корпуса

Электронная часть АМС должна быть защищена от внешней атмосферы, если она не установлена внутри здания. Настоятельно рекомендуется защитная коробка. Она должна быть достаточно большой для простоты доступа к расположенному внутри нее оборудованию, если только конфигурация системы не предполагает замены всего оборудования, включая защитную коробку, в случае сбоя.

Защита от воды и конденсата должна быть обеспечена одним из двух следующих методов:

a) Защитная коробка полностью герметична и не предназначена для вскрытия в полевых условиях. В ней также должно быть предусмотрено наличие внутреннего мешка гигроскопических солей.

b) Защитная коробка проветривается при помощи жалюзи, обладающими дополнительной защитой от проникновения насекомых. Коробка должна быть спроектирована таким образом, чтобы при открытии дверцы в нее не попадала вода.

Материал следует выбирать таким образом, чтобы избежать коррозии, особенно если площадка находится близко к морю. Металлическая коробка помогает защитить электронное оборудование от скачков напряжения.

1.3.6 Конструкция установки

При установке на открытом воздухе коробка(и) АМС, приборы, а также распределение терминалов сети питания или солнечные батареи должны устанавливаться на несущей конструкции. Конструкцией установки нельзя пренебрегать ввиду того, что она может быть весьма затратной. Рациональной практикой является определение стандартных сопутствующих элементов для установки АМС и ее компонентов. Вспомогательные конструкции могут быть предложены производителем АМС. Важно убедиться, что приборы и другое оборудование не создают друг другу помех; в частности, правила оформления, описанные в классификации размещения (см. том I, глава 1, дополнение 1.D к настоящему Руководству), должны сопровождаться разработкой несущей конструкции.

Может быть необходимым бетонное основание. Альтернативой может быть использование металлических заземляющих винтов, предназначенных для поддержки опор, ограждений и тому подобного.

Следует учитывать потребность в локальном заземляющем электроде и скрытой системе заземления.

В зависимости от местоположения станции и сопутствующих рисков (например, животные и люди) может потребоваться ограждение зоны производства наблюдений.

1.4 ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ АВТОМАТИЧЕСКИХ МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИХ СТАНЦИЙ

Три основных конфигурации АМС имеют различные схемы программного обеспечения:

a) В отдельно стоящих АМС используется специальное программное обеспечение, разрабатываемое производителем АМС. Конечный пользователь может вносить ограниченное количество изменений, либо не может вносить изменений вообще, за

исключением некоторых настроек конфигурации. Однако АМС часто поставляются уже готовыми к использованию. Изменение в функциональных настройках АМС должны вноситься самими производителями.

b) Промышленный регистратор данных обычно разрабатывается на командном языке, с тем чтобы дать пользователям возможность настраивать оборудование в соответствии со своими приборами и потребностями (конечно, в пределах, допускаемых конфигурацией регистратора данных). Конфигурация программного обеспечения может быть более сложной и реализованной дистрибьютором регистратора данных, сторонним интегратором, либо самими пользователями.

c) Программное обеспечение ноутбука или промышленного ПК с подключенными к нему цифровыми приборами в меньшей степени зависит от аппаратного обеспечения и может позволить использовать более стандартные инструменты и языки. Некоторые НМГС разрабатывают свое собственное программное обеспечение с такой конфигурацией АМС.

Программное обеспечение представляет собой важную часть АМС. Сложное программное обеспечение вскоре становится негибким и трудным для использования, если не проявить большой осмотрительности при его начальной разработке и не обеспечить строгой дисциплины при кодировании. Небольшие изменения к требованиям, например, часто вызванные необходимостью в новом приборе, изменения в коде или в критериях контроля качества, нередко могут повлечь за собой серьезные и весьма дорогостоящие пересмотры программного обеспечения.

В целом, можно провести различие между прикладным программным обеспечением, состоящим из алгоритмов для должной обработки данных в соответствии со спецификациями пользователей, и системным программным обеспечением, неотъемлемо связанным с конфигурацией аппаратного обеспечения и включающим все программное обеспечение, необходимое для разработки и отладки прикладного программного обеспечения.

Подготовка алгоритмов для синоптических АМС содержится в публикации ВМО (WMO, 1987), а для обработки данных о приземном ветре – в публикации ВМО (WMO, 1991). Информация об алгоритмах, используемых Членами имеется в публикации ВМО (WMO, 2003).

1.4.1 **Операционная система**

Операционная система отдельно стоящей АМС и регистратора данных обычно в значительной степени адаптирована под конкретное программное обеспечение и опирается на промышленную встроенную операционную систему реального времени (так называемое микропрограммное обеспечение), что делает ЦПБ своего рода «черным ящиком». Иногда операционные системы носят более стандартный характер, например, системы на базе Unix. Пользователь может выполнять только заранее определенные команды и вследствие этого полностью зависит от изготовителя в случае неисправностей или модификаций.

При использовании ноутбука или промышленного ПК в качестве ЦПБ операционная система носит более стандартный характер, например, система на базе Unix, либо операционная система Windows. В связи с чем имеется полный спектр инструментов администрирования и коммуникационных слоев. Однако такая система более уязвима для взлома, и необходима установка защиты в области безопасности ИТ, а также регулярное применение обновлений и улучшений программного обеспечения.

1.4.2 **Прикладное программное обеспечение**

Функции обработки, которые должны выполняться ЦПБ, внешними приборами, или вместе теми и другими, зависят от типа автоматической метеорологической станции и целевой задачи, для которой она используется. Обычно требуются все следующие операции или часть из них: инициализация, контроль выхода прибора, преобразование выходных сигналов прибора в метеорологические данные, линеаризация, осреднение, ручной ввод данных наблюдений, контроль качества, приведение данных, форматирование и проверка сводки, хранение данных, передача данных, отображение данных на дисплее. Контроль качества можно осуществлять на различных уровнях: сразу же после проверки, после получения метеорологических переменных, после ручного ввода данных и форматирования сводки, либо в центральной системе (функция контроля качества зачастую разделяется между самой АМС и центральной системой). Если отсутствует контроль качества данных и содержания сообщений, то данные АМС будут содержать, вероятно, не выявленные ошибки. Несмотря на то, что линеаризация может являться неотъемлемой частью функции прибора или модуля формирования сигнала, ее всегда следует проводить до расчета среднего значения.

Выполнение прикладной программы определяется блоком оперативного управления, контролирующим, когда и какие задания следует выполнять. Обзор прикладного программного обеспечения АМС в следующих разделах ограничивается некоторыми практическими аспектами, касающимися АМС.

1.4.2.1 ***Инициализация***

Инициализация — это процесс, который подготавливает все запоминающие устройства, устанавливает все оперативные параметры и начинает исполнение прикладной программы. Для того чтобы начать нормальную работу, для программного обеспечения прежде всего требуется наличие ряда конкретных параметров, которые связаны со станцией: параметров станции (кодовый номер, высота, широта и долгота), даты и времени, физического адреса прибора в разделе сбора данных, типов и характеристик модулей согласования приборов. Преобразование и линеаризация для преобразования выходных данных прибора в метеорологические величины, а также границы абсолютных значений и скорости изменения величин для целей контроля качества данных, места файла буферизаций данных также включаются. В зависимости от станции все или часть этих параметров можно вводить на месте или изменять по усмотрению пользователя с использованием интерактивных меню на терминале. В наиболее недавнем поколении АМС инициализацию можно проводить даже дистанционно, например, с помощью центральной системы сети обработки или удаленного персонального компьютера. Кроме полной инициализации, следует запрограммировать частичную инициализацию. Она автоматически восстанавливает нормальный режим работы без каких-либо потерь накопленных данных после временного отключения, вызываемого установкой часов реального времени, обслуживанием, поверкой или выходом из строя энергоснабжения. Центральная система (обычно платформа сбора) должна быть в состоянии сообщать о полном наборе параметров инициализации по каждой АМС, для управления сетью и техническим обслуживанием.

1.4.2.2 ***Выборка и фильтрация***

Выборку представляет собой процесс получения дискретной пространственной последовательности измерений количества. Для обработки сигналов метеорологического прибора в цифровой форме возникает вопрос, как часто следует делать выборку выходных данных прибора. Важно обеспечить, чтобы последовательность выборок адекватно представляла существенные изменения измеряемой атмосферной переменной. Общепринятым неписаным правилом является один отсчет на временном интервале, равном постоянной времени прибора. Однако в связи с тем, что некоторые метеорологические переменные имеют высокую изменчивость, сначала производят необходимое фильтрование или сглаживание посредством подбора приборов с

подходящей постоянной времени или с помощью методов фильтрации и сглаживания в модулях формирования сигнала (более подробная информация содержится в томе V, глава 2 настоящего Руководства).

Приборы, для которых требуется высокая частота выборки, часто имеют собственный встроенный микропроцессор для расчета соответствующих метеорологических параметров, за счет чего уменьшается количество задач АМС. Типичным примером является анемометр с рекомендуемой выборкой с частотой в несколько Гц.

Естественная мелкомасштабная изменчивость атмосферы; внедрение шума в процесс измерений с использованием электронных устройств и, в особенности, использование приборов с короткими постоянными времени; использование усреднения в качестве наиболее желательного процесса для снижения неопределенности сообщаемых данных. В томе I, глава 1, дополнение 1.A настоящего Руководства содержится рекомендация о том, чтобы за «мгновенные» значения большинства метеорологических переменных принимались усредненные за одну минуту значения (кроме ветра и видимости).

1.4.2.3 ***Преобразование необработанных данных***

Преобразование необработанных данных прибора состоит в трансформировании электрических выходных величин от приборов или от модулей формирования сигнала в метеорологические единицы. Процесс связан с применением алгоритмов преобразования, иногда использующих коэффициенты и соотношения, полученные во время процедур калибровки.

Важно учитывать то, что некоторые приборы являются по своему существу нелинейными; т. е. их выходные сигналы не являются прямо пропорциональными измеряемым атмосферным переменным (например, термометр сопротивления). Другие результаты измерений включают в себя компоненты нелинейного воздействия других переменных (например, некоторые приборы давления и влажности подвержены влиянию температуры). Хотя сами приборы могут быть линейными или включать в себя цепи линеаризации, непосредственно измеряемые переменные и измеряемая атмосферная переменная находятся в нелинейной зависимости (например, коэффициент ослабления, а не видимость или коэффициент пропускания, представляет собой надлежащую переменную, которая подлежит усреднению для получения оценочных значений осредненной видимости). Как следствие, необходимо включать поправки на нелинейность в алгоритмы преобразования, а если это не делать, то использовать модули формирования сигнала. Линеаризация является особенно важной в тех случаях, когда необходимо рассчитывать средние величины за какой-то период времени. Действительно, когда сигнал прибора не является постоянным в течение всего периода осреднения, последовательность действий «осреднить, затем линеаризировать» может привести к результатам, отличающимся от результатов при последовательности «линеаризировать, затем осреднить». Правильная процедура заключается в осреднении только линейных переменных. Более подробная информация представлена в томе V, главе 3 этого Руководства.

Знание о значениях необработанных данных может быть весьма ценным для обслуживающего персонала; в этой связи следует учитывать передачу значений некоторых необработанных данных в центральную систему. Типичным примером является использование аналоговых приборов относительной влажности. Если используется гигрометр с выходными показателями 0-1 В, 0 В означает 0 %, а 1 В — 100 % относительную влажность, максимальное операционное значение. Однако такой гигрометр может выдавать необработанное значение выше 1 В, например, 1.03 В. Разумеется, это — не операционное значение 103 % относительной влажности, однако речь может идти о дрейфовании прибора или значении в пределах допустимых для прибора. В преобразовании в метеорологические единицы, эти 1.03 В должны быть ограничены 100 % с пороговым предельным значением (таким как значение выше 1.05 В, которое

рассматривается как неприемлемое). Однако для процесса технического обслуживания важно знать о том, что эти 1.03 В сообщены гигрометром и могут считаться признаком дрейфа прибора.

1.4.2.4 ***Ручной ввод данных наблюдений***

Ряд приложений требует разработки интерактивных терминальных процедур, позволяющих наблюдателю вводить и редактировать результаты визуальных или иных субъективных наблюдений, для которых на станции не предусматриваются автоматические приборы. Обычно сюда относят характеристики текущей и прошедшей погоды, видимость, облачные слои, состояние поверхности земли и другие особые погодные явления. Если в системе установлены некоторые приборы для этих параметров, то их следует рассматривать как подспорье наблюдателю в периоды наблюдений, производимых человеком. Это означает, что терминальная система (часто ПК), используемая для ручного ввода, должна также отображать измеренные параметры для местного наблюдателя.

1.4.2.5 ***Приведение данных***

Кроме мгновенных метеорологических данных, непосредственно получаемых из выборок данных после соответствующего преобразования, необходимо вычислить связанные с ними другие оперативные метеорологические величины и статистические характеристики. Для большинства из них используются сохраняемые мгновенные значения, в то время как другие данные получают при более высокой скорости замеров, например при расчетах порыва ветра. Например, приведение данных представляет собой расчет температуры точки росы по результатам исходных измерений относительной влажности, а также приведения давления к среднему уровню моря. К статистическим данным относятся экстремальные значения за один срок и более (например, температуры), суммарные значения за определенные периоды времени от минут до суток (например, количества осадков), средние за различные сроки (например, климатологические данные) и интегрированные значения (например, радиация). Эти переменные или количественные характеристики можно рассчитать на АМС или в центральной процессинговой платформе на основе мгновенных данных или экстремальных значений, а также общих сумм, рассчитанных за небольшие периоды (например, за один час). Тенденция в области последних систем, в которых телекоммуникационная сеть позволяет это, заключается в централизованном сборе одноминутных данных (мгновенные значения и метеорологические переменные, вычисляемые каждую минуту; например, параметры ветра) и обрабатывать эти данные в центральной процессинговой платформе. Это позволяет более гибко разрабатывать и модернизировать программное обеспечение для обработки, а также упрощает программное обеспечение АМС. Одноминутные данные могут в значительной степени помочь бригаде техобслуживания обнаружить и определить возможные проблемы с измерениями (см. 1.2.2.1).

Алгоритмы, используемые на АМС для получения значений, так же важны, как и выбор прибора. С течением времени могут вноситься небольшие и незаметные изменения, которые впоследствии могут оказать значительное влияние. Перечень алгоритмов, а также версий программного обеспечения должен храниться в составе метаданных для АМС. В тех случаях, когда алгоритм создается собственными силами, целесообразно документировать процесс и разрабатывать наборы тестовых данных, чтобы в будущем можно было последовательно проверять изменения в программном обеспечении.

Комиссия по приборам и методам наблюдений (КПМН) занимается регулярной программой обзора и стандартизации алгоритмов для всех переменных. Результаты опубликованы в публикации ВМО (WMO, 2003). Подробности о метеорологических переменных см. также в соответствующих главах тома I настоящего Руководства.

1.4.2.6 ***Локальное хранение данных***

При нормальных условиях метеорологические данные регулярно передаются в центральную систему. Тем не менее, в процессе сбора данных может произойти сбой в телекоммуникационной схеме или потеря данных. Поэтому важно, чтобы локальная АМС имела локальное хранилище данных и соответствующую процедуру доступа к данным. Локальное хранение данных больше не является проблемой для компонентов флеш-памяти. Программное обеспечение АМС, как правило, управляет данными в круговой памяти в течение определенного периода, заменяя старые данные на новые. Размеры хранилища данных должны быть совместимы с доступностью места наблюдения, до нескольких месяцев для очень изолированного места. Это может быть тот же самый набор данных, который обычно передается на платформу сбора. При необходимости, для уменьшения объема памяти и/или облегчения процедуры восстановления данных, почасовые мгновенные переменные и почасовые статистические переменные (экстремумы, суммарные значения) также могут храниться локально.

Процедурой доступа к локальным данным может быть:

a) передача старых данных, когда телекоммуникационная инфраструктура снова становится доступной;

b) локальная передача данных с помощью портативного терминала, локально подключенного к АМС во время проведения технического обслуживания;

c) локальное восстановление карты памяти (например, карты флеш-памяти) во время технического обслуживания.

Процедура восстановления должна сопровождаться механизмом дополнения центральной базы данных старыми восстановленными данными.

1.4.2.7 ***Кодирование сообщений***

Функциональные требования зачастую предусматривают кодирование метеорологических сообщений в соответствии с публикацией ВМО (2011, 2015*c*). Внедрение алгоритмов кодирования сообщений не нужно недооценивать; не только их разработка, но и обновление при изменении форматов в соответствии с международными, региональными и национальными правилами могут потребовать значительных усилий. Переход от буквенно-цифровых кодов (обычно SYNOP) к ТОКФ (BUFR или CREX) облегчает обновление содержания сообщений, содержащих данные наблюдений.

Кодировать стандартные сообщения, как правило, проще в центральной процессинговой платформе, где больше вычислительных мощностей, а также доступно больше стандартных программных средств (бесплатное программное обеспечение для кодирования BUFR доступно из нескольких источников). Поэтому большинство сетей АМС предназначены для централизованного кодирования в стандартных кодах. Формат сообщений между АМС и платформой сбора варьируется. Он также должен быть основан на принципе табличного кода, позволяющего обновлять передаваемые переменные без необходимости внесения изменений в уровни передачи. В дополнение к запрашиваемым метеорологическим переменным следует кодировать и передавать дополнительные служебные данные, такие как служебные данные от интеллектуальных приборов, напряжение батареи и необработанные данные от некоторых приборов (например, необработанное значение 0-1 В, выводимое гигрометром, как описано в п. 1.4.2.3). Поскольку такие параметры очень специфичны для конструкции АМС и не перечислены в таблицах BUFR, это является дополнительной причиной для кодирования стандартных сообщений ВМО на центральном уровне.

1.4.3 Дистанционная диагностика и обслуживание

Особые процедуры программного обеспечения введены в программу прикладного программного обеспечения, позволяющую производить ремонт и калибровку на месте эксплуатации. Такие виды деятельности обычно связаны с прогонкой интерактивных программ для испытания конкретного датчика, изменения структуры АМС в случае замены датчиков или модулей, перенастройки параметров системы, испытания телесвязи, введения новых коэффициентов калибровок и т. п. Обычно ремонт и калибровка производятся в неоперативном режиме работы станции при временном прекращении ее нормальной работы.

Некоторые из этих функций также могут быть доступны в режиме онлайн через систему сбора данных. Любая функция, позволяющая проводить дистанционную диагностику, должна поощряться при проектировании системы для снижения затрат на техническое обслуживание. На практике транспортировка обслуживающего персонала к измерительному участку составляет огромный процент от стоимости обслуживания, и любая онлайн возможность приветствуется (например, передача сервисных параметров, перезагрузка автоматического выключателя и загрузка новой версии программного обеспечения для АМС или одного из ее компонентов).

1.5 КОНТРОЛЬ КАЧЕСТВА

Цель контроля качества на АМС — свести к минимуму количество недостоверных данных наблюдений в автоматическом режиме и количество пропущенных наблюдений путем использования соответствующего аппаратного обеспечения, а также программных операций. Достижение обеих целей обеспечивает процесс, при котором результат всех расчетных данных измерений получается из достаточно большого числа прошедших контроль качества выборок данных. Таким образом, выборки с крупными случайными ошибками можно изолировать и исключить, и расчеты могут быть далее продолжены без влияния этой выборки.

Контроль качества обеспечивает гарантированное качество и согласованность выходных данных. Это достигается благодаря тщательно разработанному набору процедур, предназначенных для должного технического обслуживания, ремонта, калибровки и проверок качества данных.

В современных АМС результаты процедур контроля качества данных, выявляющих причины, по которым измерение является сомнительным или ошибочным, и самоконтроль аппаратного обеспечения посредством встроенных средств контроля находятся в соответствующих устройствах хранения информации о состоянии станции. Передача этих результатов и визуальное отображение этих показателей состояния представляет собой очень удобное средство для постоянного мониторинга сети, а также полевых или дистанционных работ по обслуживанию АМС. Крайне рекомендуемым подходом к поддержанию технического обслуживания метеорологического оборудования является передача содержимого устройств хранения информации о состоянии станций в виде приложения к обычным наблюдательным сводкам, отдельной сводки, либо в качестве запрограммированного или запрашиваемого от сети АМС сообщения в центральную сетевую систему обработки.

Для контроля качества данных АМС настоятельно рекомендуются процедуры в масштабе реального времени, и подробные рекомендации содержатся в приложении VI.2 *Руководства по Глобальной системе наблюдений* (ВМО, 2010) и в главе 1 тома V настоящего Руководства. Ниже приводится краткое резюме руководящих принципов, содержащихся в публикации ВМО (2010).

Проверки внутри прибора: Каждая выборка от прибора проходит проверку на самой ранней стадии обработки с учетом динамических характеристик прибора и формирования сигнала для вероятного значения величины и вероятной скорости ее изменения. Возможно проведение некоторых дополнительных тестов, например:

a) Если используются барометры с двумя или тремя преобразователями давления, то разница между ними может вызвать сигнал тревоги, если эта разница превышает заданный порог (например, 0,3 гПа).

b) Если относительная влажность измеряется гигрометром, то можно рассчитать максимальное суточное значение, указанное прибором (см. 1.4.2.3). Этот параметр, анализируемый в течение длительного времени, может помочь выявить признаки возможного смещения в точке насыщения (100 %).

Вероятная оценка: это общая проверка того, что измеряемое значение величины находится в пределах абсолютных границ ее изменений. Эти границы обусловлены характером метеорологической переменной или явления, но зависят также от диапазона измерений отдельных приборов и аппаратного обеспечения для получения данных. Могут также применяться дополнительные проверки по границам диапазона изменения, которые являются функциями географического района, сезона и времени года. Такие проверки помогают определять ошибочные или сомнительные значения.

Вероятная скорость изменения: это проверка на вероятную скорость изменения от предшествующего приемлемого уровня. Настройки такой проверки зависят от наблюдаемого параметра и атмосферных явлений, которые могут на него влиять. Также они зависят от характеристик прибора (например, постоянной времени и устойчивости).

Минимальная требуемая изменчивость мгновенных значений: проверка того, что прибор все еще реагирует на атмосферные изменения. Длительный период без существенного изменения измеренных данных является признаком неисправности (например, заклинило чашечно-крыльчатый анемометр). Колебания и время срабатывания зависят от измеряемого параметра и характеристики прибора.

Максимальная допустимая изменчивость мгновенных значений: идентично предыдущему.

Количество действительных выборок за период: определяет обоснованность среднего значения и его пригодность для использования в дальнейших расчетах.

Проверки согласованности приборов: можно провести контроль внутренней согласованности измеряемой переменной с другими измеряемыми переменными, основываясь на определенных физических или метеорологических принципах, например: точка росы не может превышать температуру окружающей среды; осадки над местом наблюдения при отсутствии облаков или сразу после их прохождения маловероятны; ненулевая скорость ветра при отсутствии колебаний направления ветра предполагает проблему с датчиком направления ветра; нулевая средняя скорость ветра при ненулевых колебаниях направления (дисперсия) убедительно указывают на неисправность датчика скорости ветра.

Технический мониторинг: технический мониторинг всех жизненно важных компонентов АМС.

Проверка сообщений: для АМС с программным обеспечением для прямого кодирования и передачи сообщений по ГСТ важнейшее значение имеет выполнение всех вышеуказанных проверок с особой тщательностью. Кроме того, следует также контролировать соответствие правилам, касающимся знаков, чисел, форматов и т. п. В случае, когда величины оцениваются как сомнительные, следует предусматривать принятие соответствующих мер.

Для АМС, связанных с центральной системой сбора и обработки данных, проверка качества разделена между программным обеспечением АМС и центральным программным обеспечением. Если образцы необработанных данных не передаются в центральную систему, то внутри АМС должны выполняться только проверки с использованием образцов необработанных данных. При централизованной передаче одноминутных данных в центральной процессинговой системе должны быть реализованы другие проверки качества.

1.6 СООБРАЖЕНИЯ ОТНОСИТЕЛЬНО МЕСТ РАЗМЕЩЕНИЯ АВТОМАТИЧЕСКИХ МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИХ СТАНЦИЙ

Надлежащее размещение АМС является довольно сложным вопросом, и в этой области предстоит провести большую исследовательскую работу. Общий принцип размещения состоит в том, что станция должна обеспечивать репрезентативность измерений в прилегающем районе, размер которого зависит от метеорологического применения. Существующие на этот счет руководящие указания для обычных станций действительны также и для АМС и содержатся в томе I, главе 1, приложении 1.D настоящего Руководства, а также в других публикациях ВМО (2010; 2014, 2017*b*).

Окружающая территория и препятствия вблизи приборов не должны снижать репрезентативность измерений. Классификация площадок, определенная в томе I, главе 1, приложении 1.D настоящего Руководства, должна помочь в выборе репрезентативного места: идеальным расположением должна быть площадка класса 1 для всех измерений, но иногда необходим компромисс, так как критерии и другие факторы влияния не идентичны для всех атмосферных параметров. Проектировщик сети должен определить максимальные классы, допустимые для выбора участка, и процедуру отступления в случае особых затруднений при поиске участка по критериям выбранных классов. Можно было бы также рассмотреть вопрос о разделении станции на несколько станций с делокализацией приборов, что является относительно простым вариантом с учетом имеющихся в настоящее время технологий (см. 1.2.1).

Некоторые АМС, установленные в труднодоступных местах как на суше, так и на море, вынуждены работать без обслуживания в течение длительных периодов времени. Расходы на установку могут быть высокими, и могут потребоваться дополнительные расходы на обслуживание. Они вынуждены работать от очень ненадежных источников энергоснабжения или же в местах, где вообще нет постоянных источников энергоснабжения. При выборе площадки следует также учитывать наличие средств телесвязи. Необходимо обеспечивать меры безопасности (от ударов молний, наводнений, воровства, вандализма и т. п.), а станции должны противостоять суровым метеорологическим условиям. Расходы по обеспечению систем, способных работать при всех условиях, которые можно предусмотреть, высоки и могут оказаться неприемлемыми, и поэтому важно иметь полное представление о предполагаемой среде функционирования АМС до получения технического задания или до начала ее проектирования. На ранней стадии планирования должен быть проведен подробный анализ относительной важности метеорологических и технических потребностей, с тем чтобы можно было выбрать и утвердить место для расположения станции до осуществления значительных инвестиций по установке.

1.7 ТЕХНИЧЕСКОЕ ОБСЛУЖИВАНИЕ И РЕМОНТ

Стоимость обслуживания сети АМС на суше и особенно в море может в значительной мере увеличить общие затраты на них. Поэтому важнейшими факторами при конструировании автоматических метеорологических станций являются их надежность и простота обслуживания. Специальная защита от воздействий окружающей среды зачастую оправдывается даже при высоких первичных затратах.

Очевидно, что любая комплексная система требует поддержки по техническому обслуживанию. При выходе из строя отдельных компонентов необходимо проводить их соответствующую замену. Компоненты аппаратного обеспечения могут выходить из строя по многим причинам; компьютерные программы также могут выходить из строя из-за ошибок при их разработке, которые могут оставаться незамеченными в течение длительного периода времени. Для минимизации корректирующего ремонта и улучшения работы АМС рекомендуется хорошо организованное профилактическое техническое обслуживание. Все компоненты системы нуждаются в профилактическом техническом обслуживании, а не только в чистке и смазке механических частей. Благодаря все большей надежности электронных компонентов АМС профилактическое техническое обслуживание, включая обслуживание и калибровку приборов, становится главным фактором технического обслуживания.

Адаптивное техническое обслуживание вызывается необходимостью учета быстрых изменений в технологии и наличия запасных частей после нескольких лет эксплуатации АМС. Расходы на ремонт и компоненты часто возрастают очень быстро после того, как какая-либо система не пользуется уже активным спросом, что вызывает необходимость замены модулей новыми, но с другой технологией, так как точные замены (например, при желании перенести программы и операционные системы из одного процессора в другой, ввести модульные изменения для обеспечения надежности системы, сделать соединения с новыми системами телесвязи и т. д.) встречаются редко. Для снижения расходов на такого рода обслуживание и ремонт желательно, чтобы были установлены общепринятые стандарты на оборудование и интерфейсы, а также на программное обеспечение, и чтобы они были включены в технические спецификации АМС.

Установка сети АМС не должна рассматриваться как одноразовая инвестиция. Важно организовать техническое обслуживание в соответствии с рациональным планом, в котором будут подробно описаны все функции, и организовать техническое обслуживание и ремонт таким образом, чтобы свести к минимуму расходы без негативного влияния на производительность. Модульная структура многих современных АМС позволяет организовать техническое обслуживание и ремонт на месте эксплуатации, а также в региональных и национальных центрах.

Техническое обслуживание и ремонт в полевых условиях: в целом нежелательно производить ремонт приборов АМС или других модулей в полевых условиях, поскольку условия могут быть неблагоприятны для эффективной работы. Рекомендуется, чтобы техническое обслуживание с устранением неисправностей на месте эксплуатации производилось специальным техническим персоналом из регионального или национального центра в зависимости от размера страны. Простое профилактическое или корректирующее обслуживание может быть выполнено местным наблюдателем (при наличии) или местным оператором проектирования. Для обеспечения быстрого реагирования на неисправности весьма желательная практика заключается в том, чтобы АМС регулярно передавали диагностическую информацию самопроверки.

Региональный центр: в региональном центре должен быть технический персонал для замены или ремонта модулей и приборов, небольшие неисправности которых можно обнаружить и устранить. Этот персонал должен хорошо знать работу аппаратного обеспечения станции и быть подготовлен к проведению обычного обслуживания программного обеспечения. Такие региональные центры должны быть оснащены соответствующим контрольно-измерительным оборудованием и иметь достаточное количество модулей и приборов для выполнения технического обслуживания и ремонта станций в своей зоне. Им также требуется необходимый доступ через сеть телесвязи к АМС, магистральной сети и, возможно, центральным серверам. Этим центрам необходимы соответствующие средства транспортировки для выполнения работы в полевых условиях. Следует также уделять внимание планированию и периодическому посещению удаленных станций для проверки их работы, выявления случаев вандализма, местных условий, изменений и т. п. Необходимо также установить процедуры для срочных посещений различных станций, основываясь на приоритетах, определяемых для данной станции.

Национальный центр: для национального центра требуется более высококвалифицированный технический персонал, который способен обнаруживать и устранять сложные неисправности в приборах, модулях и средствах передачи данных. В центре должно быть необходимое оборудование для проверки и ремонта всех частей АМС, и работа должна проводиться в самом центре. При обнаружении неоднократных неисправностей такие части следует передавать конструкторам или поставщикам для исправления конструктивных дефектов.

В связи с тем, что программное обеспечение играет очень важную роль в каждой АМС и в центральной системе обработки данных сети, требуется персонал с глубокими знаниями АМС и программного обеспечения центральной сетевой системы. Должны иметься необходимые средства для разработки программного обеспечения, а также средства для тестирования. Кроме того, национальный центр должен быть способен выполнять все задачи, связанные с адаптивным техническим обслуживанием и ремонтом.

Что касается контроля качества данных сети, то крайне важно установить процедуры эффективной связи между службой мониторинга и соответствующей службой технического обслуживания и ремонта, а также калибровки, с тем чтобы способствовать быстрому реагированию на неисправности или передаче сообщения о неисправности от системы мониторинга.

В малых странах задачи региональных центров может выполнять национальный центр. Развивающиеся страны могут рассмотреть вопрос об организации общей с соседними странами службы технического обслуживания и ремонта. Для того чтобы поддерживать расходы на техническое обслуживание и ремонт на разумно низком уровне, можно предусмотреть общий международный центр технического обслуживания и ремонта. Однако для такого международного сотрудничества потребовалось бы использование однотипного оборудования. Если НМГС не может выделять свой персонал или средства для выполнения многих вспомогательных функций, то можно воспользоваться услугами подрядчика. Такая поддержка может, например, оговариваться как часть пакета в системе закупок. Однако необходимо очень хорошо подготовить контракт о техническом обслуживании и ремонте, а выполнение контракта должно тщательно проверяться соответствующим персоналом.

Предложения по методам менеджмента качества изложены в томе V, глава 1.

1.7.1 Уровни обслуживания

Уровень технического обслуживания должен определять максимальную задержку при диагностике проблемы и максимальную задержку при ее устранении. Пример таких максимальных задержек, используемых одной НМГС, приведен ниже:

a) четыре часа на очень большом аэродроме; это означает, что местная бригада техобслуживания доступна 24 часа в сутки, а запасные части — на месте;

b) пятнадцать часов на важном аэродроме или синоптической станции; пятнадцать часов — это быстрое техническое обслуживание в день обнаружения неисправности или на следующее утро, если неисправность возникла вечером или ночью. Это означает, что обслуживающий персонал доступен вблизи объекта (например, менее чем в 2—3 часах езды), в рабочее время и с имеющимися на месте запасными частями, каждый день недели;

c) два или три дня на других станциях; это позволяет тратить больше времени на дорогу и/или получать запасные части из удаленного места (например, из национального центра), а наличие персонала возможно только в рабочие дни;

d) пять дней для менее приоритетных станций.

Уровни обслуживания должны устанавливаться в ходе определения характеристик сети с учетом потребностей пользователей, организации технического обслуживания, расстояний между центрами технического обслуживания и станциями наблюдений, трудностей с организацией перевозок и стоимости запасных частей. Результатом обязательно станет компромисс между ожиданиями пользователей и человеческими и текущими затратами. Для разных станций могут быть определены различные уровни обслуживания.

1.7.2 Калибровка и поверка на площадке

У приборов, особенно у приборов АМС с электрическими выходами, со временем возникает дрейф показаний, и в связи с этим необходимо регулярно проводить поверку и калибровку. В принципе, период между калибровками определяется техническими характеристиками дрейфа, сообщенными изготовителем, а также требуемой неопределенностью. При международных взаимных сравнениях приборов ВМО также даются некоторые объективные показатели дрифта приборов, а также желательные интервалы между калибровками. Поскольку модули формирования сигнала и оборудование для получения и передачи данных также составляют часть цепи измерений, то их надежность и правильность работы также должны контролироваться или периодически проверяться. Ниже приводится краткое описание некоторых практических аспектов, касающихся АМС. Более подробную информацию о методах и технике калибровки см. в различных главах тома I и в томе V, глава 4, настоящего Руководства.

Первичная калибровка: необходимые средства для калибровки и приборное обеспечение должны быть в наличии до закупки и установки АМС, с тем чтобы можно было проверить спецификации, сообщенные изготовителем, провести испытание работы станции в целом, а также удостовериться в том, что транспортировка не повлияла на измерительные характеристики оборудования.

Поверка на местах: абсолютным требованием контроля работы приборов АМС является их периодическая замена и сравнение с транспортируемыми эталонами. Предпочтительно использовать транспортируемые эталоны, имеющие такие же характеристики фильтрации, как и цепь измерений АМС, а также выход для считывания в цифровой форме. Во избежание возможного изменения точности во время транспортировки во многих странах используют два транспортируемых эталона одинакового типа. В целях обнаружения небольших отклонений транспортируемые эталоны должны иметь неопределенность намного ниже, чем соответствующий прибор станции, и в течение всего процесса сравнений должны находиться в таких же условиях среды, что и приборы, в течение достаточно длительного периода времени. Поскольку модули формирования сигнала и оборудование для сбора данных, такое как АЦП, также могут иметь дрифт, следует использовать соответствующие эталонные источники напряжения и многошкальные электроизмерительные приборы для обнаружения мест аномалий. Период между поверочными визитами должен определяться характеристиками дрейфа приборов. По мере накопления опыта работы с приборами может быть оправдана корректировка графика проверок на месте.

До и после проведения проверок на месте транспортируемые эталоны и опорные источники необходимо поверять по рабочим эталонам калибровочной лаборатории. При обнаружении отклонений в неопределенности необходимо как можно скорее информировать об этом службу технического обслуживания и ремонта.

Поверки на местах также должны использоваться для контроля за состоянием пункта наблюдений:

a) Окружающая среда площадки (такие препятствия, как деревья, растительность, здания и т. п.), для выявления возможных изменений в ее классификации (см. том I, глава I, приложение 1.D настоящего Руководства); фотографии чрезвычайно полезны для мониторинга изменений на площадке;

b) состояние растительности на приборном поле и ее срезание при необходимости;

c) состояние всей инфраструктуры: ограждение, несущие конструкции АМС и приборы (например, коррозия);

d) состояние системы электропитания: очистка солнечных батарей, периодическая замена батарей;

e) состояние защиты от перенапряжения;

f) чистка инструментов, по мере необходимости;

g) любое другое задание, которое должно быть определено в зависимости от обстоятельств (в соответствии с руководством по эксплуатации оборудования, предоставленным изготовителем).

Администратор сети должен организовать регулярный выездной осмотр каждые 6–12 месяцев, в зависимости от установленных на сети приборов, доступности пунктов наблюдений и организации обслуживания.

Лабораторная калибровка: приборы, у которых заканчивается срок калибровки; приборы, имеющие отклонения в неопределенности выше дозволенных пределов в течение полевой инспекции, а также приборы, отремонтированные службой технического обслуживания и ремонта, должны возвращаться в лабораторию калибровки для их повторного использования. Калибровка приборов должна проводиться в кондиционируемой среде (в камере искусственного климата) с использованием соответствующих рабочих эталонов и четко определенных процедур. Эти рабочие эталоны должны сравниваться и периодически калиброваться по вторичным эталонам, а также прослеживаться до международных стандартов. Подробное описание стратегии обеспечения прослеживаемости содержится в приложении 1.B главы 1 тома I настоящего Руководства.

1.7.3 Обучение персонала

Поскольку АМС основана на применении технологии, которая значительно отличается от приборного оснащения традиционных станций и сетей, то очевидно необходим глубокий пересмотр существующих программ обучения и повышения квалификации требуемого технического персонала. Любая новая программа обучения должна организовываться в соответствии с планом, направленным на удовлетворение потребностей пользователей. Он должен в первую очередь предусматривать техническое обслуживание и калибровку, упомянутые выше, а также должен соответствовать системе. Перевод существующего персонала на выполнение новых задач, если даже он имеет многолетний опыт работы с традиционными станциями, не всегда возможен и может создать серьезные проблемы, если персонал не обладает основами знаний в области электрических приборов, цифровых и микропроцессорных методов обработки или компьютеров. Может потребоваться наем нового персонала, обладающего такими знаниями. Необходимо иметь персонал, компетентный в различных областях работы АМС, задолго до установки сети АМС (см. WMO (1997) и главу 5тома V, настоящего Руководства).

Важно, чтобы изготовители оборудования АМС обеспечивали подробную эксплуатационную и техническую документацию и организовывали курсы по эксплуатационно-технической подготовке кадров. Как правило, изготовитель должен предоставлять два комплекта документации: руководства пользователя для оперативного обучения основам работы системы и ее использованию и технические руководства с более сложной документацией, описывающей во всех технических подробностях оперативные характеристики системы, вплоть до уровня подблоков и даже электронных компонентов, в том числе с инструкциями по техническому обслуживанию и ремонту. Эти руководства можно рассматривать как основную документацию для программ

обучения, осуществляемого изготовителем системы, которой можно пользоваться в качестве справочного материала, когда уже не будет специалистов изготовителя для оказания помощи.

Для некоторых стран рекомендуется организовывать общие учебные курсы в учебном центре, который обслуживает соседние страны. Такой учебный центр будет работать наиболее эффективно, если он связан с назначенным центром по приборам, а обслуживаемые страны согласились использовать одинаковое стандартизированное приборное оснащение.

1.8 РАССМОТРЕНИЕ ВОПРОСА СПЕЦИФИКАЦИЙ И СТОИМОСТИ СИСТЕМЫ

Установка новой сети АМС или переход от неавтоматических станций к автоматическим является сложным делом, и им следует управлять как проектом:

a) Должна быть создана проектная группа, обладающая необходимыми управленческими навыками.

b) Потребности пользователей должны быть четко определены и переведены в функциональные и технические спецификации.

c) Необходимо определить и задокументировать будущие процессы закупок, выбора площадок, первоначальной установки и технического обслуживания в течение всего срока службы системы.

d) Должны быть определены четкие цели в области качества:

   i) целевая неопределенность измерений, с пониманием того, что она может быть компромиссом между современным уровнем техники и доступными затратами, с соответствующей периодичностью калибровки;

   ii) целевая классификация площадок для наблюдений и принятые компромиссы в случае трудностей с поиском площадок класса 1 (см. том I, часть 1, приложение 1.D настоящего Руководства);

   iii) целевая доступность данных как в реальном времени, так и с задержкой;

   iv) определение принятого уровня обслуживания (например, максимальная задержка для устранения проблемы на месте);

   v) определение продолжительности жизни сети;

   vi) определение резервирования системы (измерение, телесвязь, система центрального блока);

e) Необходимо определить и выбрать доступные сети телесвязи.

f) Необходимо идентифицировать существующее оборудование, подлежащее или не подлежащее повторному использованию (приборы, центральный процессор, площадки, инфраструктура площадки и т. д.).

g) Необходимо определить правила осуществления закупок, которым необходимо следовать, первоначальный бюджет и текущие расходы.

h) Спецификации для всей системы должны быть составлены в письменном виде, и должна быть выбрана процедура закупки (тендер, внутренняя разработка, внешняя или внутренняя установка и обслуживание и т. п.).

i) Необходимо определить и провести процесс закупки, приемочные испытания первого оборудования и приемочные испытания серийного оборудования.

j) Первые установки на месте и связь с центральной системой (платформа сбора, платформа обработки) должны быть подтверждены.

k) Должны быть развернуты инструменты и методы для станций и центрального надзора с соответствующими показателями.

l) Следует планировать регулярное инспектирование площадки.

m) Достигнутые результаты должны быть измерены, сопоставлены с поставленной целью, а затем, соответственно, должны быть приняты корректирующие и предупреждающие меры.

Следует понимать, что АМС обладают многими преимуществами, но не устраняют необходимости в хорошо отлаженной организации их использования и обслуживания.

Расходы на сеть АМС распределяются между многими частями, а расходы на саму АМС составляют небольшой процент от общих расходов, которые включают в себя:

a) стоимость самой площадки наблюдений: участок земли, ограждение и возможная траншея для линий электропередач или телесвязи;

b) стоимость оборудования: АМС, приборы, телекоммуникационный модем или интерфейс;

c) стоимость установки и монтажа конструкций на месте;

d) стоимость разработки и внедрения центральных систем сбора и обработки данных;

e) текущие расходы на связь;

f) текущие расходы на обслуживание и калибровку.

ПРИЛОЖЕНИЕ. НЕДОРОГОСТОЯЩИЕ АВТОМАТИЧЕСКИЕ МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИЕ СТАНЦИИ

1. ВВЕДЕНИЕ

Исторически измерение погодных явлений осуществлялось профессиональными метеорологическими организациями, однако в последние 10 лет на рынке постоянно растет число недорогостоящих АМС. Недорогостоящие АМС варьируются в цене от 50 до, как правило, 7 000 долларов США, и поставляются в различных исполнениях и конфигурациях.

Существуют некоторые общие черты недорогостоящих АМС, в том числе:

a) относительно низкая цена;

b) низкое или очень низкое энергопотребление;

c) передача данных в реальном времени (с регистрацией или без регистрации);

d) часто небольшой размер и компактность.

Существуют три основных класса недорогостоящих АМС: компактные, моноблоки и автономные (Интернет вещей (IoT)).

Компактные АМС состоят из мачты, подставки или столба с монтажными кронштейнами для различных приборов и, как правило, шкафа для размещения регистратора или процессора, блока питания и других модулей (рис. 1.A.1). Эти АМС похожи на профессиональные метеорологические станции; обычно в них используются отдельные приборы для каждой переменной, и приборы могут быть откалиброваны. Приборы также можно настраивать и заменять по отдельности. Эта АМС может иметь некоторые гибкие возможности регистрации и передачи данных, позволяющие адаптировать передачу сообщений к существующей системе приема данных.

Технологическое решение «моноблок», как правило, относится к инструментальному компоненту недорогостоящей АМС (рис. 1.A.2). Наиболее распространенная конфигурация моноблоков включает приборы для измерения температуры, относительной влажности и давления с возможностью добавления дополнительных приборов. Некоторые из них могут производить одно или несколько дополнительных измерений, таких как: скорость ветра, направление ветра, осадки и солнечная радиация. Существуют также блоки, измеряющие явления текущей погоды, такие как град и грозы. Обычно они сконструированы как единое целое и монтируются на небольшом

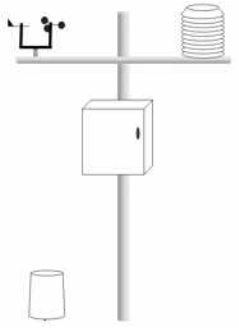


Рисунок 1.A.1. Пример компактной АМС

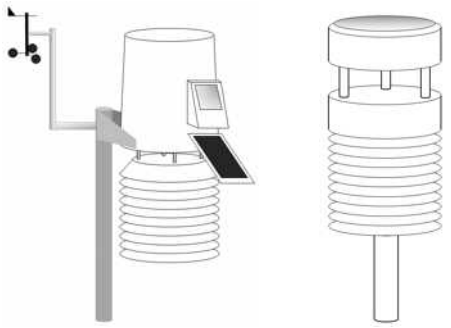


Рисунок 2.A.2. Примеры АМС «моноблок»

столбе или мачте. Некоторые модели включают регистратор данных и аккумуляторную батарею, которая обеспечивает питанием всю систему, включая передачу ограниченных объемов данных. Однако чаще они представляют собой дополнительные компоненты и статьи расходов.

Автономные приборы — это быстро развивающаяся технология, которую обычно называют IoT-устройствами. В этих системах используется сеть отдельных интеллектуальных приборов, передающих информацию с использованием маломощных и низкоскоростных интерфейсов Wi-Fi, Bluetooth или Интернет на серверы централизованной обработки (BMO, 2012). Также растет количество дополнительных устройств к мобильным телефонам, которые измеряют метеорологические параметры.

2. ПРЕИМУЩЕСТВА И НЕДОСТАТКИ

В зависимости от назначения, каждая из этих категорий имеет свои преимущества и недостатки.

Системы «моноблок» просты в установке и эксплуатации. Однако такой вариант исполнения, как правило, приводит к снижению качества собираемой информации. Не все приборы, находящиеся в одном маленьком блоке, могут быть правильно установлены, а некоторые могут снижать точность измерения других. Обычно они также имеют небольшие радиационные экраны, что может привести к искажению взаимодействия прибора с окружающей средой, например, значительное завышение наблюдаемой температуры днем и умеренное ее занижение ночью. Такое искажение также приводит к значительным всплескам температуры. Недостатком систем «моноблок» также является то, что при выходе из строя одного прибора часто требуется ремонт или замена всего блока. Калибровка этих устройств затруднена, и для некоторых переменных это может быть выполнено только производителем. Исследования, проведенные Королевским нидерландским метеорологическим институтом (KHMИ) (Vega, 2017) и Астонским университетом (Bell et al., 2015), показывают, что эти приборы демонстрируют значительные расхождения в измерениях. Например, исследование Астонского университета показало среднее ежечасное отклонение температуры на +0,7 °C летом и +0,4 °C зимой. Кроме того, исследования KHMИ продемонстрировали резкие скачки температуры воздуха от 1 °C до 2 °C и общую недооценку осадков (62 % потерь).

Прочность также является ограничением этих универсальных установок. Блоки, как правило, изготовлены из серийно производимых пластмассовых компонентов, которые разрушаются при воздействии на них элементов. Их монтажные системы также могут быть легкими по весу. При продаже устройства часто включают в себя аккумулятор, дополненный небольшим солнечным элементом. Хотя в теплом климате этого достаточно, при отрицательных температурах аккумулятор часто выходит из строя. Обычно в этих устройствах не предусмотрена возможность использования внешнего источника питания.

Преимущество компактных АМС состоит в том, что в них могут использоваться коммерческие готовые приборы, что дает возможность замены неисправных приборов и позволяет улучшить конфигурацию размещения. Мачты и общая инфраструктура легче по весу и менее прочны, чем профессиональные метеостанции, и с большей вероятностью могут выйти из строя во время суровых погодных явлений. Преимуществом многих моноблоковых и компактных АМС является то, что они поставляются с программным обеспечением для локального сбора, распространения и отображения данных. Все чаще поставщики предоставляют облачные услуги, в которых они собирают и отображают данные, а также предоставляют сетевую статистику через интерфейс веб-браузера и API для взаимодействия с другими системами обработки данных. Преимуществом этого является доступность информации из любого места в любое время и для многих пользователей одновременно. Однако это программное обеспечение и системы управления данными сокращают возможности пользователей по расширению сетей. Большинство из этих систем АМС не будут взаимодействовать с другими марками компактных и моноблоковых АМС.

Системы IoT позволяют оптимизировать расположение и выбор отдельных приборов. Однако эксплуатация и управление этими сетями может усложниться. Эта технология распределенных систем является гораздо более новой и не так хорошо зарекомендовала себя, как компактные и моноблоковые системы. Профессиональные производители метеорологических приборов еще не начали создавать приборы специально для этого рынка. В результате многие из имеющихся на рынке приборов являются недорогими и производятся компаниями—интеграторами электроники без большого опыта в области метеорологических измерений. Большинство производимых устройств имеют потребительский класс, а это означает, что текущее качество данных очень быстро становится неизвестным.

3. СООБРАЖЕНИЯ ВЫБОРА

При выборе недорогой АМС необходимо учитывать широкий круг вопросов, чтобы обеспечить соответствие системы поставленным целям. Одним из наиболее важных соображений является определение требований пользователей, а затем создание соответствующей спецификации для АМС. Большинство производителей предоставляют спецификацию сенсорного элемента, которая опирается на испытания в лабораторных условиях, без экранов или других интерфейсов с окружающей средой. Кроме того, могут существовать ограничения по способу испытания прибора для достижения спецификации. Например, спецификация для приборов относительной влажности часто приводится для прибора, испытываемого при одной температуре в лаборатории. Это не включает в себя такие соображения, как влияние полного диапазона температур, которые прибор может испытывать в полевых условиях. Некоторые приборы могут включать в себя тестирование в определенном диапазоне температур, но не во всем диапазоне рабочих температур.

В связи с низкой затратностью, может вообще не быть никаких приемочных испытаний или калибровки и настройки производителя, вместо этого при представлении всех произведенных единиц он будет полагаться на конструкцию и разработку спецификаций. Все это означает, что при выборе АМС необходимо тщательно следить за тем, чтобы спецификации различных производителей были действительно сопоставимы. Например, если указанная неопределенность измерений мала по сравнению с указанной другими производителями, это может означать, что она применима только в более узком диапазоне условий. С другой стороны, спецификация может быть только одним стандартным отклонением, а не неопределенностью с доверительным интервалом 95 %.

При рассмотрении таких систем, как моноблоки, в спецификации обычно не учитывается влияние корпусов, например, экрана на прибор в поле. Маловероятно, что они включают в себя влияние таких эффектов, как турбулентность, на измерения ветра или осадки, а также влияние прибора, который не устанавливается на стандартной высоте.

Маловероятно, что они включают в себя влияние таких эффектов, как турбулентность, на измерения ветра или осадков, а также влияние прибора, который не устанавливается на стандартной высоте.

В случае системы «моноблок» покупатели должны искать АМС с симметричным дизайном. Такая симметрия минимизирует влияние турбулентности и затенения на приборы. Некоторые системы имеют значительное количество электроники, которая может влиять на показания приборов температуры и влажности. Поэтому рекомендуется выбирать устройства с некоторым разделением между электроникой и экраном. В идеале экран должен находиться в нижней части цилиндрической системы, тем самым минимизируя передачу тепла от других частей моноблока.

Важны также материалы, из которых изготовлена система. Металлические экраны могут оказывать значительное влияние на измеряемую температуру (Warne, 1998), также как и размер и цвет экрана. Экраны диаметром значительно меньше 200 мм и высотой 250 мм приведут к снижению производительности, значительное нагреваясь под воздействием инсоляции и немного охлаждаясь в ночное время из-за радиационного охлаждения по сравнению со стандартной установкой (Warne, 1998). В целом, чем меньше экран, тем сильнее влияние. Важен даже цвет экрана в видимом и инфракрасном диапазоне: там, где это возможно, следует использовать «белый». Некоторые производители могут предоставить подходящий экран, но они при этом предлагают большие конструкции, такие как черные или темно-серые осадкомеры, которые действуют как тепловые массы и близлежащие источники излучения, влияющие на другие датчики (Bell et al., 2015).

4. ДРУГИЕ СПОСОБЫ СНИЖЕНИЯ ОПЕРАЦИОННЫХ РАСХОДОВ

Использование компактных технологий, технологий «моноблок» или IoT в качестве средства получения недорогих наблюдений не обязательно является простым. В зависимости от качества требуемых данных и затрат на человеческие ресурсы эти решения могут не представлять собой оптимального соотношения цены и качества. Приборы АМС «моноблок» более склонны к дрейфу и выходу из строя, и поэтому больше нуждаются в обслуживании. Для стран, где расходы на рабочую силу являются наиболее значительными, это может привести к тому, что расходы на техническое обслуживание (включая калибровку) будут превосходить первоначальную экономию от вложений в оборудование. Если, однако, предполагаемое использование заключается в обеспечении повышенной плотности наблюдений в густонаселенных местах, то эти системы могут быть наиболее экономичным решением. При заявленных производителем характеристиках дрейфа эти системы могут потребовать трех-семикратной замены за десятилетний период, а также обслуживания или калибровки дважды в год для поддержания их в соответствии с заявленными производителем спецификациями.

Компактные системы и системы IoT, в которых используются высококачественные приборы, снижают затраты на техническое обслуживание. Однако если ценность системы заключается в их вкладе в регистрацию экстремальных погодных явлений, то экономия на инвестициях в инфраструктуру может быть потрачена впустую, если системы будут потеряны или повреждены во время экстремального события. В настоящее время многие из приборов IoT ориентированы на любительский и домашний рынок и как таковые не подходят для использования НМГС.

Недорогостоящие АМС могут занять свое место в многоуровневой сети и могут принести значительную пользу, если известны их пределы производительности и эксплуатационные ограничения. С другой стороны, существенное сокращение оперативных расходов может быть достигнуто при эксплуатации сетей профессиональных стандартных АМС благодаря знанию их рабочих показателей, которые достигаются сетью, и факторов, определяющих расходы на поддержание требуемых показателей. Существенная экономия может быть достигнута за счет оптимизации работы сети. Анализ проверок до и после калибровки, сбоев систем в полевых условиях, анализ первопричин и эффективное управление активами обеспечивают доказательства, необходимые для оптимизации

затрат на эксплуатацию сети. Важно, чтобы сетевые менеджеры задавали такие вопросы, как: «Обслуживаются ли наши системы чрезмерно или недостаточно?»; «Правильно ли проводится профилактика?»; «Имеет ли персонал необходимую подготовку?»; «Имеется ли у нас надлежащая инфраструктура для среды, в которой функционирует АМС?». В странах, где затраты на рабочую силу высоки, оптимизация обслуживания может принести более существенную экономию, чем снижение качества и надежности капитальных вложений. В странах, где капитальные затраты на инвестиции высоки, а затраты на рабочую силу относительно низки, следует тщательно рассмотреть вопрос о том, что следует автоматизировать.

Причины введения недорогостоящих АМС в профессиональную метеорологическую сеть различны. Это может быть увеличение плотности пунктов наблюдений, создание гибкости и подвижности сети или снижение стоимости операций. Важно понимать, что только потому, что эти альтернативные системы имеют более низкую начальную цену, они не могут быть «дешевым» решением в долгосрочной перспективе. Вопросы, касающиеся требований пользователей к доступности и качеству данных, стоимости рабочей силы для обслуживания, эксплуатации и мониторинга, а также капитальной стоимости оборудования необходимо учитывать при планировании общей сети и ее эксплуатации. Часто более низкая начальная цена может обернуться более высокими затратами.

СПРАВОЧНАЯ И ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ЛИТЕРАТУРА

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

———, 1993: *Руководство по Глобальной системе обработки данных* (ВМО-№ 305). Женева.

———, 2010 (обновлено в 2017 г.): *Руководство по Глобальной системе наблюдений* (ВМО-№ 488). Женева.

———, 2014: *Руководство по системам метеорологических наблюдений и распространения информации для авиационного метеорологического обслуживания авиации* (ВМО-№ 731). Женева.

———, 2015*a* (обновлено в 2018 г.): *Технический регламент* (ВМО-№ 49), том I — Общие метеорологические стандарты и рекомендуемые практики. Женева.

———, 2015*b* (обновлено в 2017 г.): *Наставление по Интегрированной глобальной системе наблюдений ВМО* (ВМО-№ 1160). Женева.

———, 2015*c* (обновлено в 2017 г.): *Наставление по кодам* (ВМО-№ 306), том I.2 — Международные коды. Женева.

Bell, S., D. Cornford and L. Bastin, 2015: How good are citizen weather stations? Addressing a biased opinion. Weather, 70(3):75–84.

Gifford, M.D., G.M. Pearson and K. Hegg, 2000: Operation of automated surface observing systems in harsh climatological environments. In: Papers Presented at the WMO Technical Conference on Meteorological and Environmental Instruments and Methods of Observation (TECO-2000) (WMO/TD-No. 1028). Beijing, 23–27 October 2000. Instruments and Observing Methods Report No. 74. Geneva.

United Nations Environment Programme, 2017: Minamata Convention on Mercury, https://www.mercuryconvention.org/sites/default/files/documents/information_document/Minamata-Convention-booklet-Sep2019-EN.pdf.

Vega, S., 2017: The Quality of Low-cost Weather Stations. Report by KNMI and The Hague University of Applied Sciences.

Warne, J., 1998: A Preliminary Investigation of Temperature Screen Design and their Impacts on Temperature Measurements. Instrument Test Report 649. Melbourne, Bureau of Meteorology.

———, 2017: Desktop analysis of commercially available "All-in-One" and "Compact" weather stations – How well can we do it? In: Papers Presented at the WMO International Conference on Automatic Weather Stations (ICAWS-2017). WMO International Conference on Automatic Weather Stations (ICAWS-2017), “Automatic Weather Stations for environmental intelligence – the AWS in the 21st century”. Offenbach am Main, Germany, 24–26 October 2017. Instruments and Observing Methods Report No. 127, https://library.wmo.int/index.php?lvl=notice_display&id=20023#.XOuzGa6Wapo.

World Meteorological Organization, 1987: Some General Considerations and Specific Examples in the Design of Algorithms for Synoptic Automatic Weather Stations (D.T. Acheson) (WMO/TD-No. 230). Instruments and Observing Methods Report No. 19. Geneva.

———, 1991: Guidance on the Establishment of Algorithms for Use in Synoptic Automatic Weather Stations: Processing of Surface Wind Data (D.J. Painting) (WMO/TD-No. 452). Instruments and Observing Methods Report No. 47. Geneva.

———, 1995: Papers Presented at the International Workshop on Experiences with Automatic Weather Stations on Operational Use within National Weather Services (WMO/TD-No. 670). Vienna, 15–17 May 1995. Austria, ZAMG.

———, 1997: Guidance on Automatic Weather Systems and their Implementation (WMO/TD-No. 862). Instruments and Observing Methods Report No. 65. Geneva.

———, 2003: Algorithms Used in Automatic Weather Stations: Evaluation of Questionnaire (M.D. Gifford) (WMO/TD-No. 1160). Instruments and Observing Methods Report No. 78. Geneva.

———, 2017*a*: WMO Observing Systems Capability Analysis and Review Tool (OSCAR), https://www.wmo-sat.info/oscar/.

———, 2017*b*: Papers Presented at the WMO International Conference on Automatic Weather Stations (ICAWS-2017). WMO International Conference on Automatic Weather Stations (ICAWS-2017), "Automatic Weather Stations for environmental intelligence – the AWS in the 21st century". Offenbach am Main, Germany, 24–26 October 2017. Instruments and Observing Methods Report No. 127, https://library.wmo.int/index.php?lvl=notice_display&id=20023#.XOuzGa6Wapo.

———, 2017*c*: *Challenges in the Transition from Conventional to Automatic Meteorological Observing Networks for Long-term Climate Records* (WMO-No. 1202). Geneva.

ГЛАВА 2. ИЗМЕРЕНИЯ И НАБЛЮДЕНИЯ НА АВИАЦИОННЫХ МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИХ СТАНЦИЯХ

2.1 ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

2.1.1 Определения

В настоящей главе рассматриваются требования к наблюдениям на авиационных метеорологических станциях, а также используемые для этого приборы и методы. В то время как целью синоптических наблюдений является получение по измерениям в одном месте репрезентативного значения величины для довольно большого района, метеорологические наблюдения для авиационных целей обычно выполняются в нескольких точках аэродрома и прилегающей к нему территории и с большей частотой, чтобы получить репрезентативную картину для таких достаточно ограниченных районов, как зона захода на посадку, зона приземления и зона взлета.

Большая часть необходимых метеорологических измерений — это по существу те же, что производятся для других применений, и они описываются в других главах настоящего Руководства. Исключениями являются дальность видимости на взлетно-посадочной полосе (ДВВПП), наклонная дальность видимости и сдвиг ветра в приземном слое атмосферы, которые используются только для рассматриваемой области.

2.1.2 Единицы измерения

Для измерения и передачи значений метеорологических величин в авиационных целях используются те же единицы, что и для других применений; исключение составляют:

a) приземный ветер может измеряться и передаваться в метрах в секунду или в узлах;[1] а направление ветра[2] — передаваться в градусах и измеряться по часовой стрелке от географического севера[3] (см. 2.2.1);

b) высота нижней границы облаков может измеряться в метрах или футах.

Выбор единиц измерений является вопросом национальной практики и зависит от требований авиационных органов, определяющих эту практику.

2.1.3 Требования

Требования к авиационным наблюдениям приводятся в *Техническом регламенте* (ВМО, 2016). Подробные инструкции по процедурам и практикам приводятся в публикации ВМО (2014). Полезные инструкции по проведению наблюдений и мониторингу метеорологических условий приводятся в публикации ВМО (WMO, 2003). Особое внимание следует уделить авиационным метеорологическим станциям, установленным на сооружениях в открытом море в поддержку полетов вертолетов (ICAO, 1996).

---

[1] Используемая единица скорости ветра определяется решением на национальном уровне. Однако основная единица скорости ветра, предписанная в *Техническом регламенте*, том II (ВМО, 2013), — «метр в секунду», а «узел» разрешается использовать в качестве альтернативной единицы измерения, не входящей в систему СИ (дальнейшая информация приводится в публикации ICAO, 2010).

[2] Направление, откуда дует приземный ветер.

[3] Поскольку направление ветра, передаваемое на борт воздушного судна для целей посадки или взлета, может быть преобразовано в магнитные градусы, устройство отображения в органе управления воздушным движением обычно показывает направление относительно северного магнитного полюса.

Требования к погрешности, дискретности и диапазону наблюдений, а также к достигаемому в настоящее время качеству метеорологических измерений приводятся в томе I, глава 1, а к желательной в оперативном отношении точности некоторых измерений — в *Техническом регламенте*, том II, часть II, добавление A.

Несмотря на отличные конструктивные характеристики современных воздушных судов, факторы, связанные с погодой, все еще оказывают заметное влияние на безопасность их эксплуатации. Надежность и репрезентативность наблюдений на аэродромах очень важны для обеспечения безопасных посадок и взлетов. Параметры ветра определяют выбор той или иной взлетно-посадочной полосы, а также максимальный взлетный и посадочный вес. Температура также является важной характеристикой, особенно в аэропортах, находящихся в жарких странах; она влияет на силу тяги двигателей, в связи с чем целесообразно уменьшение полезной нагрузки либо использование для взлета более длинной взлетно-посадочной полосы.

Регулярные наблюдения должны проводиться на авиационных метеорологических станциях в сроки и с частотой, которые устанавливаются Членом ВМО в целях удовлетворения потребностей национальной и международной аэронавигации при должном учете региональных аэронавигационных мероприятий. Специальные и другие нерегулярные наблюдения должны проводиться на той же основе. Регулярные наблюдения на аэродромах следует проводить через час или полчаса круглосуточно, в течение суток или части суток либо в то время, когда выполняются полеты. Специальные наблюдения должны выполняться, когда между регулярными наблюдениями происходят определенные изменения приземного ветра, видимости, ДВВПП, текущей погоды и/или облачности. Эти изменения перечислены в *Техническом регламенте*, том II, часть II, приложение 3, 2.3.2. Такие наблюдения в форме закодированных сводок типа METAR или SPECI включаются в международный обмен данными между авиационными метеорологическими станциями. Сводки других типов предназначены только для обеспечения работы авиации и должны подготавливаться в форме, которая определяется совместно метеорологическими службами и руководством аэропорта.

Ввиду важности метеорологических наблюдений для безопасности полетов воздушных судов необходимо, чтобы наблюдатели прошли правильную подготовку и обладали хорошим зрением. Подготовка наблюдателей должна осуществляться на базовых курсах и регулярных курсах усовершенствования (см. дополнительную информацию в *Техническом регламенте*, том I, часть II, 4, и в публикации ВМО (2012)).

Размещение, состав и выполняемые функции метеорологических систем определяются в *Техническом регламенте*, том II, часть I, 4, а технические спецификации и подробные критерии — в *Техническом регламенте*, том II, часть II, приложение 3. Эти спецификации кратко описываются ниже.

Особое внимание на авиационных метеорологических станциях необходимо уделить правильному выбору места для выполнения наблюдений или размещения приборов, чтобы гарантировать репрезентативность наблюдаемых величин на территории аэродрома или вблизи него. В некоторых случаях, когда необходима информация с большой территории, может потребоваться установка нескольких приборов, с тем чтобы обеспечить репрезентативность измеряемых с их помощью метеорологических величин для всей территории. Например, на длинных взлетно-посадочных полосах или на больших аэродромах с несколькими взлетно-посадочными полосами, где зона захода на посадку, зона приземления и зона взлета могут отстоять друг от друга на 2—5 км, значения различных параметров, влияющих на эксплуатацию воздушных судов, таких, как ветер, высота нижней границы облаков, ДВВПП и т. п., измеренные на одном конце полосы, могут отличаться от значений в другом месте той же взлетно-посадочной полосы или на других участках взлетно-посадочного комплекса, представляющих интерес для аэронавигации.

На всех аэродромах места для проведения наблюдений следует выбирать так, чтобы измеряемые значения различных метеорологических величин были репрезентативными для самого аэродрома и/или для соответствующего участка конкретной взлетно-посадочной полосы или взлетно-посадочного комплекса. На аэродромах, где отсутствует

практика точного захода на посадку и точной посадки (взлетно-посадочные полосы визуального или неточного захода на посадку), данный критерий репрезентативности носит менее ограничительный характер, чем на аэродромах с взлетно-посадочными полосами точного захода на посадку (а именно - взлетно-посадочные полосы категории I, II или III (см. ВМО, 2014, и ICAO, 2011).

При выборе площадок для размещения приборов на аэродромах особенно важно, чтобы приборы и работа с ними не представляли опасности для аэронавигации, и чтобы присутствие или движение воздушных судов на аэродроме (руление, разбег при взлете, приземление, размещение на стоянке и т. п.) и различное аэродромное оборудование чрезмерно не влияли на измеряемые величины, но при этом удовлетворялись оперативные требования к месту проведения наблюдений и установке приборов.

Типы используемых приборов, их характеристики и методы представления и передачи измеренных значений метеорологических величин также важны. Метеорологические приборы следует устанавливать, эксплуатировать и обслуживать в соответствии с практикой, процедурами и спецификациями, изложенными в настоящем Руководстве. Авиационные метеорологические станции должны инспектироваться достаточно часто, с тем чтобы обеспечить высокое качество наблюдений, правильную работу всех приборов и их индикаторов, а также чтобы не происходило существенных изменений в размещении приборов (*Технический регламент*, том II, часть I, 4.1.4).

Конструкция приборов должна предусматривать дистанционное считывание, одновременно в органах управления воздушным движением (УВД) и на метеорологических станциях и в бюро, соответствующих значений следующих метеорологических элементов: приземный ветер, температура, точка росы, атмосферное давление, текущая погода, видимость, ДВВПП (если взлетно-посадочные полосы оборудованы для взлета и посадки в тумане) и высота нижней границы облаков, которые должны быть репрезентативными для соответствующих зон посадки и взлета. Особенно полезны на авиационных метеорологических станциях системы автоматических приборов для измерения высоты нижней границы облаков и ДВВПП.

На аэродромах, где осуществляется точный заход на посадку, и особенно эксплуатируемых по категориям II, III A и III B, и/или на аэродромах с высокой интенсивностью воздушного движения предпочтительнее использовать комплексные автоматические системы получения, обработки и распространения/отображения в реальном масштабе времени значений метеорологических элементов, влияющих на выполнение посадок и взлетов. Эти автоматические системы должны предусматривать возможность ручного ввода метеорологических данных, которые нельзя измерить автоматическими средствами (*Технический регламент*, том II, часть I, 4.1.7). Требования к автоматическим метеорологическим системам наблюдений определены в *Техническом регламенте*, том II, часть II, приложение 3.

2.1.4 **Методы**

При выполнении метеорологических измерений на аэродромах используются по существу те же методы, что и для других метеорологических применений; они описываются в других главах настоящего Руководства. В данной главе приводятся некоторые требования к размещению приборов и выполнению измерений, а также некоторые алгоритмы, специфичные для авиационного применения.

2.2 **ПРИЗЕМНЫЙ ВЕТЕР**

2.2.1 **Общие сведения**

Для авиации первостепенное значение имеют измерения параметров воздушного потока, а также сдвига ветра в приземном слое атмосферы вблизи зон взлета и посадки.

Соответствующие правила изложены в *Техническом регламенте*, том II, часть I, 4.1, а подробное описание — в части II, приложение 3. На международных аэродромах органы УВД, командно-диспетчерские пункты и диспетчерские пункты управления заходом на посадку обычно оборудованы индикаторами скорости ветра и направления ветра, и операторы, обслуживающие воздушное движение, передают показания этих приборов на борт прибывающих и вылетающих воздушных судов. Чтобы обеспечить согласованность данных, индикаторы органов УВД и метеорологической станции следует подключать к одним и тем же датчикам.

Измеряются средние направление и скорость ветра, а также его порывы и определенные значительные изменения направления и скорости. Содержание сводок с данными о ветре, распространяемых за пределы аэродрома (*Технический регламент*, том II, часть II, приложение 3, 4.1.5), имеют то же, что и содержание сводок синоптических наблюдений (10-минутные средние значения, а также направление, сообщаемое по отношению к географическому северу)[4], а передаваемые значения должны быть репрезентативными для всех взлетно-посадочных полос. Для местных регулярных и специальных сводок и для дисплеев индикатора ветра, используемых в местах расположения органов УВД (*Технический регламент*, том II, часть II, приложение 3, 4.1.3.1), период осреднения и для скорости, и для направления ветра составляет 2 минуты, а значения должны быть репрезентативными для используемой взлетно-посадочной полосы. Несмотря на то, что направление ветра сообщается по отношению к географическому северу и выражается в «истинных градусах» (*Технический регламент*, том II, часть I, 4.6.1, и часть II, приложение 3, 4.1.5.1), все еще существует распространенная практика сообщения персоналом органов УВД на борт воздушного судна относительно северного магнитного полюса («магнитные градусы»). Порывы ветра следует определять по трехсекундным скользящим средним значениям. Следует ознакомиться с томом I, глава 5, и томом V, глава 2, настоящего Руководства, где рассматриваются меры, которые должны быть предусмотрены в отношении анемометра, предназначаемого для измерения средних значений, порывов ветра, а также изменчивости скорости и направления ветра. Предпочтение должно отдаваться векторному осреднению, а не скалярному.

Результаты измерений параметров ветра на аэродромах, таких как средние и экстремальные значения и т. д., должны рассчитываться и отображаться предпочтительно автоматически, особенно, если на различных взлетно-посадочных полосах используется несколько датчиков. Когда требуется несколько датчиков, индикаторы должны быть четко помечены в целях определения взлетно-посадочных полос и их участков, мониторинг которых осуществляется каждым датчиком.

2.2.2 **Приборы и их установка**

На авиационных метеорологических станциях для наблюдений за ветром обычно используются приборы того же типа, что описаны в томе I, глава 5. Динамические характеристики датчиков направления и скорости должны соответствовать требованиям, изложенным в данной главе.

Датчики направления и скорости следует устанавливать на высоте примерно 10 м над взлетно-посадочной полосой, и они должны обеспечивать измерения, репрезентативные для средних зон отрыва и приземления взлетно-посадочной полосы.

Поскольку показания датчиков ветра, устанавливаемых на аэродромах, должны быть репрезентативными для зон взлета или посадки, необходимо избегать любых возмущений или турбулентности, создаваемых воздушными судами (ложная информация о порывах ветра из-за взлетов и посадок). По аналогичным причинам их не следует размещать слишком близко к зданиям или холмам, или размещать в зонах

[4] Обычно именуется как «истинный» север с единицей измерения «истинный градус». Слово «истинный» в словосочетаниях «истинный север» или «истинный градус» не следует путать с «истинным ветром» (определено ВМО, 1992*a*). «Истинный ветер» представляет собой вектор ветра относительно поверхности Земли. Для движущегося объекта, такого как воздушное судно — это векторная сумма кажущегося ветра (а именно - вектор ветра относительно движущегося объекта) и скорости объекта.

с особыми микроклиматическими условиями (морской бриз, частые штормы и т. п.). Предпочтительным вариантом размещения ветроизмерительных приборов является размещение на открытой местности, которая определяется как район, где расстояние между анемометром и любым препятствием, по крайней мере, в 10 раз больше высоты препятствия.

Во избежание перерывов передачи данных в органы УВД рекомендуется обеспечить установку дополнительного оборудования, находящегося в «холодном» или «горячем» резерве на случай выхода из строя основного прибора. Там, где того требуют местные условия, следует устанавливать один и более комплектов датчиков на каждой взлетно-посадочной полосе. В таких случаях рекомендуется использовать цифровую технику, поскольку она позволяет передавать по одному или двум телефонным проводам данные с большого числа датчиков, а также использовать цифровые индикаторы со светоизлучающими диодами различных цветов для отображения параметров ветра. Устройства отображения должны показывать «мгновенные» скорость и направление ветра (с длиной пути синхронизации от 2 до 5 м), средние скорость и направление ветра за 2 или 10 мин, а также минимальную и максимальную скорости ветра. Иногда с помощью одного и того же индикатора возможно отобразить и выбрать показания для различных точек измерений ветра (таким образом уменьшается количество необходимых индикаторов).

Устанавливая датчики ветра на аэродроме, необходимо уделить особое внимание их защите от атмосферных грозовых разрядов (используя громоотводы, заземление мачты, а также экранированные или оптико-волоконные кабели); электронное оборудование для обработки данных также должно быть защищено.

С целью поддержания требуемой точности показаний приборов для измерения параметров ветра их следует содержать в хорошем состоянии и регулярно проверять и калибровать. Качество работы датчика, особенно для аналоговых систем, необходимо периодически проверять в аэродинамической трубе. Цифровая техника со встроенным контролем определенных функций требует меньше проверок, но при этом не исключаются ошибки, связанные с трением. Для определения дефектных компонентов и ухудшения работы отдельных частей датчиков должны проводиться регулярные проверки.

Из источников ошибок можно назвать трение, плохой выбор места установки, а также проблемы со средствами передачи или отображения данных. Ошибки также могут быть вызваны конструкцией самих датчиков; они особенно заметны при слабом ветре (пороговая скорость, при которой начинается вращение, является слишком высокой, излишняя инерция) или при переменном ветре (занижение или завышение скорости ветра; неправильные показания направления из-за излишнего или неадекватного демпфирования колебаний).

2.3 ВИДИМОСТЬ

Определение понятия метеорологической оптической дальности (МОД) и ее оценка или инструментальное измерение описываются в томе I, глава 9. Измерение видимости в авиации является специфическим измерением МОД. Однако термин МОД все еще не получил широкого использования в авиации, и в этой главе для описания оперативных требований оставлен термин видимость. Для целей авиации существует общепринятая практика сообщать дальность видимости, например, ДВВПП и «видимость для целей авиации» (VIS-AERO). Следует отметить, что последняя используется в сводках и обозначается только как «видимость», которая отличается от общего определения видимости (см. том I, глава 9). Приборы, применяемые для измерения МОД, можно также использовать для измерения ДВВПП (см. 2.4) и VIS-AERO (см. раздел 2.3.1). В *Техническом регламенте*, том II, часть II, приложение 3, 4.2 и 4.3, содержится официальное описание этих вопросов, предназначенное для международной авиации.

На международных аэродромах наблюдения за видимостью, проводимые для включения в сводки, распространяемые за пределами аэродрома, должны быть репрезентативными

для территории аэродрома и его ближайших окрестностей. Наблюдения за видимостью, проводимые для включения в сводки, используемые для посадки и взлета и распространяемые только в пределах аэродрома, должны быть репрезентативными для зоны приземления взлетно-посадочной полосы; при этом следует помнить, что эта зона может отстоять на несколько километров от наблюдательной станции.

Для целей авиации диапазон измерений видимости составляет от 25 м до 10 км. Значения, превышающие или равные 10 км, указываются как 10 км. В связи с этим датчик должен предусматривать измерение значений больше 10 км или показывать, если измерение больше или равно 10 км. При оперативной работе желательно, чтобы на средствах отображения измеренные значения округлялись в сторону меньшего значения, кратного 50 м при видимости до 600 м, 10 % между 600 и 1500 м и 20 % при видимости более 1500 м (*Технический регламент*, том II, часть II, добавление A). Сведения о точности измерений можно найти в томе I, главы 1 и 9.

Ввиду того, что метеорологические минимумы определяют принятие оперативных решений о возможности успешной посадки или взлета воздушного судна, точная и надежная информация должна даваться всегда, когда видимость достигает пороговых значений, а именно, всегда, когда видимость, уменьшаясь или увеличиваясь, проходит граничные значения 800, 1500 или 3000 и 5000 м, например, в случае начала, прекращения или изменения интенсивности тумана или осадков (*Технический регламент*, том II, часть II, приложение 3, 2.3.3 (b)).

Там, где видимость значительно изменяется по направлениям, особенно в зонах взлета и посадки, следует давать дополнительную информацию — указывать направление наблюдения, например «VIS 2000 M TO S».

Когда видимость менее 800 м, ее следует регистрировать с шагом 50 м в форме VIS 350M; когда она составляет 800 м и более, но менее 5 км — с шагом 100 м; когда она составляет 5 км и более, но менее 10 км — с шагом километр в форме VIS 7KM, и когда она составляет 10 км и более, ее следует давать как 10 км, за исключением условий, при которых используется аббревиатура CAVOK (Ceiling And Visibility OK — «Видимость, облачность и текущие погодные условия лучше предписанных») (*Технический регламент*, том II, часть II, приложение 3, 4.2.4.1).

Применяются методы, описанные в томе I, глава 9. Метеорологические наблюдения за видимостью должны проводиться наблюдателем с «нормальным» зрением, который наблюдает выбранные объекты с определенными характеристиками, находящиеся на известных расстояниях от метеорологической станции. Эти наблюдения можно также проводить с использованием приборов для измерения видимости, таких, как трансмиссометры и измерители коэффициента рассеяния. Место проведения наблюдений должно обеспечивать непрерывный обзор аэродрома, включая все взлетно-посадочные полосы.

Если для измерения видимости используется трансмиссометр, то для авиационных целей подходит базовое расстояние (длина базы) 75 м. Однако если прибор также используется для измерения ДВВПП, то длину базы следует выбирать с учетом оперативных минимумов погоды, действующих на аэродроме.

2.3.1 **Видимость для целей авиации**

Технический регламент, том II, часть I, 1.1, определяет видимость. VIS-AERO является наибольшей из следующих величин:

a) максимальное расстояние, с которого объект черного цвета надлежащих размеров, расположенный у поверхности земли, может быть виден или различим при наблюдении на светлом фоне;

b) максимальное расстояние, с которого источники света порядка 1 000 кд могут быть видны или различимы на неосвещенном фоне.

VIS-AERO — это, по сути, «дальность видимости», например, как ДВВПП, включающая такие субъективные элементы как психофизиологические характеристики глаза человека и искусственные источники света. Однако, слово «видимость» обычно используется без добавления фразы «для целей авиации», и может возникнуть путаница с официальным определением понятия «видимость», данным ВМО (см. том I, глава 9), которая известна как МОД (метеорологическая оптическая дальность). Оптическая дальность целиком основана на физическом состоянии атмосферы и не включает факторы, связанные со зрением человека и использованием искусственных источников света, и поэтому является объективной величиной. Эта видимость (для целей авиации) сообщается в сводках METAR. Поскольку авиационная метеорологическая станция может быть объединена с синоптической станцией, видимость в сводках SYNOP будет отличаться от видимости в сводках METAR, хотя и измеряется одним и тем же оборудованием.

Видимость для целей авиации может измеряться и рассчитывается аналогично ДВВПП (для получения более подробной информации см. раздел 2.4), за исключением того, что для интенсивности источника света I, используется постоянное значение 1 000 кд. Стоит отметить, что это значение верно для света, обычно используемого для оценки видимости, который в 10 раз интенсивнее, чем свет умеренной интенсивности (а именно - 100 кд, см. том I, глава 9).

2.3.2 Преобладающая видимость

Преобладающая видимость определяется как значение наибольшей видимости, наблюдаемое в соответствии с определением термина «видимость (для целей авиации)», если это значение наблюдается в пределах, по крайней мере, половины линии горизонта, либо в пределах, по крайней мере, половины поверхности аэродрома. Обозреваемое пространство может включать в себя смежные или несмежные секторы. Это значение может быть установлено на основании наблюдений, проводимых персоналом, и/или с помощью инструментальных систем, и если приборы установлены, то они используются для получения наилучшей оценки преобладающей видимости (*Технический регламент*, том II, часть I, 1.1). Преобладающую видимость следует передавать в кодовых формах METAR и SPECI.

2.4 ДАЛЬНОСТЬ ВИДИМОСТИ НА ВЗЛЕТНО-ПОСАДОЧНОЙ ПОЛОСЕ

2.4.1 Общие сведения

ДВВПП — это расстояние, на котором пилот воздушного судна, находящегося на осевой линии взлетно-посадочной полосы, может видеть разметку поверхности взлетно-посадочной полосы, либо огни, обозначающие взлетно-посадочную полосу или определяющие ее осевую линию. Этот вопрос рассматривается в *Техническом регламенте*, том II, часть I, 4.6.3, и часть II, приложение 3, 4.3. Подробная информация о наблюдении и сообщении ДВВПП содержится в публикации ИКАО (2005). Рекомендуется производить это измерение в течение периодов, когда горизонтальная видимость менее 1 500 м.

Высота порядка 5 м считается соответствующей среднему уровню глаз пилота воздушного судна, находящегося на осевой линии взлетно-посадочной полосы. Отметим, что уровень глаз пилота широкофюзеляжного самолета может находиться по крайней мере на высоте 10 м. На практике ДВВПП нельзя измерить непосредственно с того места, где находится пилот, который смотрит на осевую линию, и поэтому ДВВПП должна представлять собой оценку того, что пилот может увидеть с этого места. Тем не менее, согласно существующей практике ДВВПП следует оценивать на высоте примерно 2,5 м над взлетно-посадочной полосой для инструментальных систем или приблизительно 5 м над взлетно-посадочной полосой для наблюдателя (*Технический регламент*, том II, часть II, приложение 3, 4.3.1.1).

Результаты наблюдения ДВВПП следует сообщать в органы УВД всегда, когда происходит изменение ДВВПП, соответствующее градации порогов, определяющей необходимость такого сообщения. Обычно такие сообщения должны передаваться в течение 15 с после завершения наблюдения. Эти сообщения должны передаваться открытым текстом.

2.4.2 **Методы наблюдений**

ДВВПП может определяться по косвенным измерениям наблюдателями, которые могут оценивать ее непосредственно или пользоваться вспомогательными приборами, либо с помощью специального оборудования, такого как трансмиссометр или датчики для измерений рассеянного света, либо с помощью видеосистем. На аэродромах, где осуществляется точный заход на посадку, особенно по категориям II, III A и III B, измерения ДВВПП следует выполнять непрерывно с помощью соответствующих приборов, а именно, с помощью трансмиссометров и измерителей прямого рассеяния (*Технический регламент*, том II, часть II, приложение 3, 4.3.2.1 для категорий II и III, и рекомендация для категории I в приложении 3, 4.3.2.2).

Для оперативных целей ДВВПП можно оценить по таблицам или, что предпочтительнее, с помощью автоматических средств, которые выдают значения ДВВПП в цифровом виде. В соответствии с *Техническим регламентом*, том II, часть II, приложение 3, 4.3.5, дальность видимости вычисляется отдельно для каждой взлетно-посадочной полосы.

2.4.2.1 ***Измерения, выполняемые наблюдателями***

Подсчет наблюдателями огней ВПП (или огней, установленных параллельно ВПП специально для этой цели), видимых в тумане, является простым и удобным методом определения ДВВПП (но для точной посадки по приборам только, если инструментальная система вышла из строя). Трудность, возникающая при использовании данного метода, связана с разрешающей способностью глаза человека, которая при превышении некоторого расстояния (зависящего от наблюдателя) не позволяет различать и подсчитывать огни ВПП.

Поскольку местонахождение наблюдателя относительно огней ВПП не соответствует местонахождению пилота, то для определения истинной ДВВПП важную роль играют переходные графики. Для оценки ДВВПП в светлое время суток можно также использовать специально сконструированные щиты-ориентиры, размещаемые сбоку от взлетно-посадочной полосы.

2.4.2.2 ***Измерения с помощью видео***

Для оценки ДВВПП с помощью видеосистем используется видеокамера и приемное устройство для слежения за маркерами на известном расстоянии, которыми служат либо огни взлетно-посадочной полосы, либо специальные огни, либо ориентиры, установленные сбоку от нее. Такая система также представляется полезной для определения клочьев тумана или приземного тумана, которые не могут быть обнаружены приборами.

2.4.2.3 ***Измерения с помощью трансмиссометра***

В настоящее время наиболее общеупотребительным прибором для оценки ДВВПП является трансмиссометр, с помощью которого измеряется коэффициент прозрачности ограниченного участка атмосферы (см. том I, глава 9). ДВВПП можно определять следующим образом:

a) ДВВПП по огням взлетно-посадочной полосы (ДВВПП на основе пороговой освещенности): ДВВПП зависит от коэффициента прозрачности воздуха, яркости

огней взлетно-посадочной полосы и порога световой чувствительности глаза наблюдателя (и пилота), что, в свою очередь, зависит от яркости фона. ДВВПП можно вычислить по уравнению:

$$E_t = I\ R^{-2}\ T^{R/a} \tag{2.1}$$

где E_t — порог световой чувствительности глаза наблюдателя (пилота), зависящий от яркости фона L; I — сила света огней осевой линии или ламп сбоку от ВПП в направлении на наблюдателя (пилота); T — коэффициент прозрачности, измеренный трансмиссометром; R — ДВВПП, и, a — длина базы трансмиссометра или оптический путь света. Отметим, что для световой чувствительности E глаза наблюдателя (пилота) верно уравнение $E = I / R^2$. Требования к характеристикам интенсивности света огней взлетно-посадочной полосы приведены в публикации ICAO (2013). В действительности, и для света огней осевой линии, и для света боковых огней ВПП верно, что световая чувствительность глаза наблюдателя (пилота) имеет угловую зависимость и, как следствие, I зависит от R. Поэтому $I = I(R)$ и $E = E(I, R)$. Вычислить R по уравнению 2.1 можно только итерационно, что относительно просто с помощью обычного калькулятора, подходящего для вычислительной математики. Значение E_t определяется с помощью датчика яркости фона (см. 2.4.3.3);

b) определение ДВВПП по контрасту (ДВВПП на основе порогового значения контрастности): когда при посадке и взлете пилоты ориентируются на другие маркеры, а не на огни взлетно-посадочной полосы, определение ДВВВП следует производить по контрасту специальных ориентиров с фоном. Для вычисления по нижеследующему уравнению следует брать за основу пороговое значение контрастности, равное 0,05:

$$R = a\frac{\ln 0.05}{\ln T} \tag{2.2}$$

где R — ДВВПП, определенная по контрасту. Поскольку пороговый уровень контрастности составляет 0,05, ДВВПП, определенная по контрасту, идентична МОД, а именно, R = МОД. Отметим, что в темное время суток ДВВПП (на основе пороговой освещенности) всегда будет превышать ДВВПП (на основе порога контраста), или ДВВПП ≥ МОД.

2.4.2.4 ***Измерения с помощью измерителей прямого или обратного рассеяния***

Приборы для измерения коэффициентов прямого или обратного рассеяния (иногда известные как нефелометры), описываются в томе I, глава 9. С учетом физических принципов рассеяния света аэрозолями неопределенность измерений с помощью измерителя прямого рассеяния (угол рассеяния — около 31°—32°) меньше, чем неопределенность измерений с помощью измерителя обратного рассеяния. Таким образом, измеритель прямого рассеяния является предпочтительным. С помощью этих приборов можно определить коэффициент ослабления σ, который является главной переменной для расчета ДВВПП. Опыт и исследования в части измерителей прямого рассеяния продемонстрировали их способность измерять ДВВПП для авиационных применений (WMO, 1990, 1992*b*).

Поскольку точность приборов различных конструкций может отличаться, до выбора прибора, предназначенного для оценки ДВВПП, следует проверить его рабочие характеристики. В связи с этим калибровку измерителя прямого рассеяния необходимо проверять и контролировать на предмет соответствия стандарту трансмиссометра, точность которого проверяется в предполагаемом эксплуатационном диапазоне (*Технический регламент*, том II, часть II, приложение 3, 4.3.2).

Измеритель рассеяния определяет по полученному рассеянному свету коэффициент ослабления σатмосферы для захватываемого измерителем оптического объема

(см. том I, глава 9). Поскольку σ является прямой мерой видимости, R можно определить относительно легко (из σ или МОД, где МОД = –ln 0,05/$\sigma \approx$ 3/МОД). ДВВПП можно определить следующим образом:

a) ДВВПП в условиях предпочтения ориентации по огням взлетно-посадочной полосы (ДВВПП на основе пороговой освещенности): ДВВПП будет рассчитываться так же, как и с помощью трансмиссометра, за исключением того, что используется не T, а σ. Ее можно рассчитать следующим образом:

$$R = \frac{1}{\sigma}\left(\frac{I(R)}{E_t \cdot R^2}\right) \tag{2.3}$$

где R — дальность видимости на взлетно-посадочной полосе; σ — коэффициент ослабления (или 3/МОД); E_t — порог световой чувствительности глаза наблюдателя (пилота), зависящий от яркости фона; а I — сила света огней осевой линии или боковых огней ВПП в направлении на наблюдателя (пилота). Как и в случае с трансмиссометром, R следует рассчитывать итеративно;

b) определение ДВВПП по контрасту (ДВВПП на основе пороговой контрастности): когда при посадке и взлете пилоты ориентируются на другие маркеры, а не на огни взлетно-посадочной полосы, определение ДВВВП следует производить по контрасту специальных ориентиров с фоном. Для вычисления по нижеследующей формуле следует брать за основу значение порога контраста, равное 0,05:

$$R = -\ln 0.05 / \sigma = \mathrm{MOR} \tag{2.4}$$

где R — ДВВПП, определенная по контрасту. Отметим, что ДВВПП (на основе пороговой освещенности) всегда будет превышать ДВВПП (на основе пороговой контрастности), а именно, ДВВПП ≥ МОД.

2.4.3 Приборы и их установка

Инструментальные системы могут быть основаны на трансмиссометрах или измерителях прямого рассеяния для оценки ДВВПП. Наблюдения дальности видимости на ВПП следует проводить на расстоянии не более 120 м от осевой линии взлетно-посадочной полосы. Место проведения наблюдений, которые являются репрезентативными для зоны приземления, следует располагать вдоль взлетно-посадочной полосы примерно в 300 м от ее начала. Места проведения наблюдений, которые являются репрезентативными для середины или дальних участков взлетно-посадочной полосы, следует располагать вдоль полосы на расстоянии 1000–1500 м от ее начала и на расстоянии 300 м от ее конца (*Технический регламент*, том II, часть II, приложение 3, 4.3.1.2). Точное положение этих мест и, если необходимо, дополнительных мест для проведения наблюдений (для длинных взлетно-посадочных полос) следует определять после анализа аэронавигационных, метеорологических и климатологических факторов, таких как наличие затопляемых водой участков и других подверженных туману территорий. Наблюдения дальности видимости на взлетно-посадочной полосе следует проводить на высоте примерно 2,5 м над взлетно-посадочной полосой для инструментальных систем или приблизительно на высоте 5 м над взлетно-посадочной полосой для наблюдателя (*Технический регламент*, том II, часть II, приложение 3, 4.3.1.1).

Об изменениях в рабочем состоянии систем наблюдений ДВВПП следует немедленно сообщать органам, осуществляющим управление воздушным движением и аэронавигационное информационное обслуживание аэродромов.

Для вычисления ДВВПП в нескольких точках аэродрома, а также для отображения результатов измерений на экране с указанием времени наблюдения, коэффициентов прозрачности, измеренной яркости в одной или более точках аэродрома и интенсивности огней взлетно-посадочной полосы обычно используется компьютер. Данные передаются на устройства отображения, установленные в органах УВД, метеорологических и других соответствующих подразделениях, либо на принтеры для целей регистрации.

Интенсивность огней ВПП должна вводиться в компьютер автоматически в соответствии с процедурой, описанной в *Техническом регламенте*, том II, часть II, приложение 3, 4.3.5, либо в соответствии с официальной договоренностью между органами УВД и местным метеорологическим органом.

Для регистрации коэффициентов прозрачности T и яркости фона L можно также использовать аналоговые или цифровые графические самописцы (с временной разверткой). Устройство графического отображения ДВВПП должно также четко показывать зарегистрированные значения E_t и I (см. уравнение 2.1).

2.4.3.1 ***Трансмиссометры***

Описания трансмиссометров, их установки в месте проведения наблюдений и обслуживания, а также источников ошибок приводятся в томе I, глава 9, со ссылками на другие литературные источники.

Система трансмиссометра состоит из прожектора, который направляет свет известной интенсивности на фотоэлектрический приемник, расположенный на известном расстоянии от прожектора. Изменения прозрачности атмосферы, вызванные туманом, мглой и т. д., постоянно измеряются и регистрируются. Калибровка прибора позволяет напрямую считывать значения коэффициента прозрачности, выраженные в процентах.

Излучатель и приемник должны быть смонтированы на одной и той же высоте, на прочных, безопасных, рассчитанных на длительный срок службы опорах, и, по возможности, устойчиво установленных таким образом, чтобы смещения грунта, мороз, неоднородное нагревание опор и т. д. не оказывали неблагоприятного воздействия на соосность обоих блоков. Оптический луч должен проходить на высоте не менее 2,5 м над уровнем взлетно-посадочной полосы.

В одном из типов трансмиссометров излучатель и приемник объединены в одном блоке (см. том I, глава 9). В этом случае отражатель (например, зеркало) устанавливается в том месте, где обычно располагается приемник. Свет выходит и отражается обратно; при этом длина базы равна двум расстояниям между передатчиком/приемником и отражателем. Трансмиссометр может иметь одну или две базы в зависимости от того, используются один или два приемника либо светоотражающие устройства, расположенные на различных расстояниях.

Длина базы трансмиссометра, а именно длина оптического пути, проходимого лучом света между излучателем и приемником, определяет диапазон измерения ДВВПП. Для ДВВПП между 50 и 1 500 м наибольшее распространение имеет длина базы от 15 до 75 м.

Однако для более коротких баз трансмиссометра необходимы более высокая точность измерения коэффициента прозрачности и лучшая линейность системы. Если должны измеряться низкие значения ДВВПП, соответствующие требованиям для посадки по категориям II и III, то следует выбирать трансмиссометр с короткой базой. Однако максимальная ДВВПП, которая может быть при этом измерена, является относительно малой. Нужно найти компромисс. Существуют трансмиссометры с двумя базами, обеспечивающие более широкий диапазон измерения путем выбора той или иной базы; однако необходимо позаботиться о том, чтобы при переключении баз обеспечивалась согласованность измерений ДВВПП по каждой базе.

Большие значения ДВВПП можно измерять трансмиссометрами с более длинными базами, но для этого требуются более сильные источники света, чтобы компенсировать ослабление света между излучателем и приемником в плотном тумане, а также более узкий угол зрения приемника, чтобы избежать появления помех, обусловленных рассеянием. Измерение самых слабых сигналов также зависит от фонового шума в измерительных устройствах.

Трансмиссометры, как правило, располагаются параллельно взлетно-посадочной полосе. Однако следует избегать прямого (или отраженного) солнечного света, поскольку он может вызвать повреждение. Поэтому оптические оси следует ориентировать приблизительно по направлению север-юг горизонтально (для широт ниже 50°). В противном случае следует использовать систему экранирующих насадок.

2.4.3.2 *Измеритель прямого рассеяния*

Измерители прямого рассеяния следует устанавливать рядом с взлетно-посадочной полосой аналогично трансмиссометрам. Установка измерителей прямого рассеяния требует меньшей предосторожности, чем установка трансмиссометров. Тем не менее, следует проявлять осторожность, чтобы избежать прямого или рассеянного солнечного света, который может повлиять на работу приемника (или повредить его). В частности, солнечный свет может повлиять на приемник после рассеяния в снежном покрове или на поверхности озера или моря. Современные приборы компенсируют загрязнение оптических компонентов.

2.4.3.3 *Датчик яркости фона*

Когда рассчитывается ДВВПП, пороговое значение светочувствительности глаза E_t должно быть известно. Датчик яркости фона следует размещать в конце взлетно-посадочной полосы, вдоль которой установлены один или несколько трансмиссометров или измерителей рассеяния. В аэропорту могут быть установлены один или несколько датчиков яркости в зависимости от числа охватываемых ими взлетно-посадочных полос.

Датчик яркости фона измеряет яркость горизонта или неба в противоположном направлении от солнца. Найденные пороги светочувствительности глаза вводятся в расчет ДВВПП в качестве либо гладкой, либо ступенчатой функции (2—4 ступени). График для определения порога чувствительности глаза по яркости фона приводится в *Техническом регламенте*, том II, часть II, добавление D, и в публикации ИКАО (2005). Рекомендуемая зависимость, используемая для данного графика, следующая:

$$\log_{10} E_t = 0.05\left(\log_{10} L\right)^2 + 0.573 \log_{10} L - 6.667 \qquad (2.5)$$

где L — яркость неба у горизонта.

Датчик яркости фона включает в себя фотодиод, расположенный в фокусе объектива с угловой апертурой в пределах от 10° до 20°, ориентированного в направлении север-юг (чтобы избежать попадания в объектив прямого солнечного света), с углом возвышения над горизонтом приблизительно от 30° до 45°.

2.4.4 Проверка приборов

В целях обеспечения надежной работы, а также калибровки системы важно проводить периодические проверки всех компонентов системы трансмиссометров или измерителей рассеяния для измерения ДВВПП. Обычно документация, предоставляемая компаниями-изготовителями и разработчиками таких приборов, содержит подробные инструкции по осуществлению этих проверок, а также указания о мерах по устранению выявленных недостатков, которые следует предпринять в тех случаях, когда не выдерживаются разрешенные инструментальные допуски. Для трансмиссометров, когда видимость превышает 10—15 км, легко проверить, показывает ли прибор коэффициент прозрачности, приблизительно равный 100 % (см. том I, глава 9). Для измерителей рассеяния могут использоваться «рассеивающие пластины», эмулирующие определенные значения ослабления. Тем не менее, калибровку измерителя прямого рассеяния необходимо проверять и контролировать на предмет соответствия стандарту трансмиссометра (см. 2.4.2.4).

Правильное обслуживание и калибровка необходимы для того, чтобы:

a) предотвратить скопление загрязнения на оптических поверхностях;

b) проверить изменения интенсивности света, испускаемого излучателем;

c) избежать дрейфа параметров в период после калибровки;

d) проверить соосность излучателей и приемников.

В местах наблюдений, подверженных сильному загрязнению, необходимо более частое обслуживание. Следует позаботиться о том, чтобы в ходе обслуживания не прекращалась работа всего оборудования одновременно, и чтобы перерывы в работе не были длительными, особенно в течение периодов, когда прогнозируется туман.

Если в течение нескольких дней подряд устойчиво держится туман, то следует производить проверку прожектора и убеждаться, что интенсивность его света стабильна; а оборудование следует проверять на наличие дрейфа параметров. В условиях очень густого тумана проверка настройки оптики весьма затруднена или вообще невозможна, поэтому весьма существенно, чтобы механическая часть приборов была надежной, а оптическая — устойчивой.

2.4.5 Отображение данных

Данные по ДВВПП, выводимые на дисплейные устройства для соответствующих аэродромных служб, обновляются в соответствии с действующими местными соглашениями каждые 15—60 с, а в некоторых случаях лишь каждые 2 мин. Изменения ДВВПП обычно следует передавать не позднее чем через 15 с после окончания наблюдения.

2.4.6 Точность и надежность измерений дальности видимости на взлетно-посадочной полосе

Если применяются датчики, использующие метод измерения рассеянного света, отличающиеся от трансмиссометров, то уравнения для расчета ДВВПП приемлемы для случаев очень малых размеров капель воды, например, таких, которые образуют туман, а не для тех случаев, когда видимость снижается за счет наличия других гидрометеоров, таких как ледяной туман, дождь, снег или литометеоры (песчаные бури). В таких ситуациях измерения МОД и ДВВПП должны использоваться с большой осторожностью, поскольку удовлетворительные соотношения для них еще не приняты.

Расхождение между ДВВПП, определяемой пилотом, и ее измеренным значением может достигать 15—20 % при допускаемом стандартном отклонении не более 10 %. Что касается наблюдателей, то вследствие колебаний порога светочувствительности глаза и условий наблюдений различия в сообщаемой дальности видимости вместе могут достигать 15—20 %.

Измерения ДВВПП, выполненные с использованием трансмиссометров или приборов для определения коэффициента рассеяния света, репрезентативны только для небольшого объема атмосферы. Из-за значительных изменений плотности тумана во времени, а также в пространстве приобретает важную роль среднее значение, полученное по большому количеству измерений. Быстрые изменения ДВВПП могут вызывать трудности в органах УВД при передаче информации на воздушные суда. По этим причинам для вычисления среднего или скользящего среднего значения рекомендуется период осреднения от 30 с и до 1 мин.

Желательные в оперативном отношении показатели точности измерений ДВВПП определены в *Техническом регламенте*, том II, часть II, добавление A.

2.5 ТЕКУЩАЯ ПОГОДА

Наблюдения и передача сводок текущей погоды описываются в томе I, глава 14, а процедуры — в *Техническом регламенте*, том II, часть I, 4.6.4, с подробным описанием в части II, приложение 3, 4.4. Для авиации особое внимание должно уделяться наблюдениям и сообщениям о возникновении, исчезновении, интенсивности и месте нахождения метеорологических явлений, важных для безопасной эксплуатации воздушных судов, например, грозы, твердых осадков, а также элементов, ухудшающих видимость в полете.

Для взлета и приземления информация о текущей погоде должна быть, по мере возможности, репрезентативной для зоны взлета и начального набора высоты или для зоны захода на посадку и посадки. В информации, которая передается за пределы аэродрома, данные о текущей погоде должны быть репрезентативными для данного аэродрома и его ближайших окрестностей.

Большая часть наблюдений за текущей погодой выполняется визуально. Следует уделить внимание выбору таких мест для проведения наблюдений, которые давали бы возможность производить отвечающий требованиям обзор местности во всех направлениях от станции. В помощь наблюдателю могут использоваться приборы, в особенности для определения интенсивности осадков.

Устройства для определения типа осадков (дождь, снег, морось и т. п.) или снижающих видимость явлений, отличных от осадков (туман, дымка, дым, пыль и т. п.) могут быть полезны наблюдателю и могут помочь, если это осуществляется автоматически. Эти приборы основаны преимущественно на измерении коэффициента ослабления или сцинтилляции; в них также могут использоваться зависимости между явлениями погоды и другими количественными величинами, такими как влажность. В настоящее время не имеется никаких международных соглашений по поводу алгоритмов, используемых для обработки данных в целях определения этих явлений. Поскольку требуется присутствие наблюдателей, то особой потребности в этом оборудовании авиационная метеорология не испытывает.

Описания явлений, сообщаемых в текущей погоде, приводятся в томе I, глава 14, а также в публикациях ВМО (1992*a*, *2011, 2017*) и ИКАО (2011).

Спецификации специальных сводок, касающихся текущей погоды, содержатся в *Техническом регламенте*, том II, часть II, приложение 3, 4.4.2. Сокращения и кодовые цифры, используемые в составляемых открытым текстом сводках METAR или SPECI, приводятся в *Техническом регламенте*, том II, часть II, приложение 3, 4.4.2.3—4.4.2.9.

2.6 ОБЛАЧНОСТЬ

2.6.1 Общие сведения

Наблюдения и измерения облачности описываются в томе I, глава 15. Для авиационных применений (см. *Технический регламент*, том II, часть I, 4.6.5, и часть II, приложение 3, 4.5) информация об облачности (количество, высота нижней границы, тип) должна быть репрезентативной для аэродрома и его ближайших окрестностей, а в сообщениях для посадки — для зоны захода на посадку. Когда информация об облачности передается воздушным судам, идущим на посадку на взлетно-посадочную полосу, оборудованную для точного захода на посадку, то эта информация должна быть репрезентативной для метеорологических условий в месте установки среднего маркера системы посадки по приборам или на аэродромах, где средний маркер не используется, на расстоянии 900–1200 м от посадочного порога ВПП в начале ВПП (*Технический регламент*, том II, часть II, приложение 3, 4.5.1).

Если небо не различимо или не видимо, то высота нижней границы облаков заменяется вертикальной видимостью, сообщаемой в местных регулярных (MET REPORT) и

местных специальных (SPECIAL) сводках (*Технический регламент*, том II, часть I, 4.5.1(i)) и в метеорологических сводках METAR и SPECI (ВМО, 2011, FM 15/FM 16, пункт 15.9). Вертикальная видимость определяется как максимальное расстояние, на котором наблюдатель может увидеть и различить объект, находящийся на одной с ним или с ней вертикали, выше или ниже. Вертикальную видимость можно получить из профиля оптического ослабления, определяемого с помощью лидарного облакомера. Предположив, что полное ослабление σ на высоте h можно получить из коэффициента ослабления обратного рассеяния σ_B на этой высоте после соответствующей калибровки для всего диапазона высот, и предположив, что порог контраста в 5 % применяется также, как и к МОД, для вертикальной видимости VV должно выполняться следующее условие:

$$\int_0^{VV} \sigma(h) \cdot dh = \ln\left(\frac{I(VV)}{I_0}\right) = \ln(0.05) = 3 \tag{2.6}$$

Поскольку лидарный облакомер определяет коэффициент локального ослабления для фиксированных интервалов Δh, VV можно относительно легко получить следующим образом:

$$\sum_{i=1}^{N} \sigma_i \cdot \Delta h = 3, \text{ with } h_N = VV \tag{2.7}$$

Типичные кодовые слова, например, CAVOK, SKC (ясное небо), NCD (без облаков) и NSC (нет существенной облачности), используются в сводках, когда состояние атмосферы или погода не влияют на взлет и посадку; замена количественной информации простыми сокращениями выгодна. Подробная информация об использовании этих методов приведена в *Техническом регламенте*, том II, часть II, приложение 3, 2.2 и 4.5.4.3. Например, кодовое слово CAVOK используется, когда облачность и текущая погода лучше, чем предписанные значения или условия, но, если эти определенные условия соблюдены. Особую осторожность следует соблюдать при использовании этих сокращений в автоматических системах измерений, которые не способны измерять облачность или вертикальную видимость в рамках установленных требований.

Высота нижней границы облаков сообщается относительно высоты аэродрома. Однако, если используется оборудованная для точного захода на посадку взлетно-посадочная полоса, порог которой ниже на 15 м или более ниже высоты аэродрома, то проводятся локальные мероприятия для передачи на прибывающие воздушные суда высоты облаков относительно высоты порога полосы.

2.6.2 **Методы наблюдений**

Основные методы, применяемые для определения высоты нижней границы облаков, следующие:

a) прожектор для обнаружения нижней границы облаков;

b) облакомер с вращающимся лучом;

c) облакомер;

d) шар-пилот;

e) визуальная оценка;

f) сводки с воздушных судов.

Если возможно, высоту нижней границы облаков всегда следует измерять. На очень загруженных или на международных аэродромах с системами точного захода на посадку измерения высоты нижней границы облаков следует выполнять автоматически, с тем чтобы эту информацию и ее любые изменения можно было получать непрерывно.

Метод измерения нижней границы облаков с помощью шаров-пилотов требует слишком много времени и часто дает ошибки, чтобы принять его в качестве основного метода измерения высоты нижней границы облаков на аэродромах; визуальный метод также часто дает ошибки, особенно ночью, чтобы применяться там, где эти наблюдения являются критически важными. Сообщения с воздушных судов о высоте нижней границы облаков могут дать наблюдателю ценную вспомогательную информацию. Интерпретируя информацию пилотов, необходимо проявлять осторожность по той причине, что эта информация может относиться к месту, расположенному в нескольких километрах от точки наблюдений на земной поверхности.

2.6.3 Точность измерений высоты нижней границы облаков

Разорванный, диффузный и неустойчивый характер основания многих видов облаков ограничивает степень точности, с которой можно измерять высоту их нижней границы. Отдельные или редкие измерения, например, с помощью шаров-пилотов, могут быть нерепрезентативными для облачности в целом. Для получения достоверной оценки требуется изучение квазинепрерывной регистрации измерений, проведенной с помощью одного из вышеупомянутых приборов в течение нескольких минут.

Указываемая производителями приборов точность измерений, осуществляемых с их помощью, обычно устанавливается при использовании твердых или искусственных целей. Однако в оперативной работе точности достигнуть труднее ввиду размытости нижнего основания облаков.

2.7 ТЕМПЕРАТУРА ВОЗДУХА

Общие сведения о приборах и методах наблюдений за температурой воздуха даются в томе I, глава 2. Для аэронавигационных целей (см. *Технический регламент*, том II, часть I, 4.1 и 4.5.1(j)) необходимо знать температуру воздуха над взлетно-посадочной полосой. Обычно данные, получаемые с помощью приборов в правильно размещенных и хорошо вентилируемых метеорологических будках, дают достаточную аппроксимацию требуемых значений этого элемента. О быстрых изменениях температуры воздуха (2—3 °C за полчаса) следует незамедлительно уведомлять органы УВД, главным образом, в тропических и субтропических зонах.

Датчики температуры должны размещаться таким образом, чтобы на них не влияли движущиеся или припаркованные воздушные суда, а получаемые с их помощью значения температуры были репрезентативными для взлетно-посадочной полосы. Во избежание незначительных флуктуаций температуры (при средней скорости ветра 5 $м \cdot с^{-1}$) предпочтительнее использовать термометры с постоянной времени, равной 20 с, или, в случае автоматических измерений, следует использовать соответствующий цифровой усредняющий или резистивно-ёмкостный фильтр. Полезно применение систем дистанционной индикации и регистрации. Кроме того, на аэродромах с ВПП, предназначенных для заходов на посадку и посадок по приборам по категориям II и III, требуется размещение автоматических средств измерения и устройств отображения информации в месте установки автоматических систем сбора информации. Измерения температуры стали чаще осуществляться автоматическими станциями или системами сбора данных, и результаты этих измерений отображаются в цифровой форме в виде осредненного за 1—10 мин значения, полученного после линеаризации выходного сигнала датчика. Для авиационных целей указанное значение следует округлить до ближайшего целого числа.

2.8 ТОЧКА РОСЫ

На авиационных погодных станциях влажность воздуха обычно представляется в виде температуры точки росы. Показание прибора, измеряющего эту величину, округляется до ближайшего целого числа, как и в случае температуры воздуха. Процедуры описываются в *Техническом регламенте*, том II, часть I, 4.1 и 4.5.1(j). Методы наблюдений описываются в томе I, глава 4.

Современные датчики влажности позволяют использовать дистанционные индикаторы и регистрирующие приборы. В случае неавтоматизированных наблюдений обычно используется психрометр. Для не превышения заявленной неопределенности измерений предпочтительнее использовать психрометр с принудительной вентиляцией. Широко используются следующие типы приборов:

a) емкостные датчики, основанные на измерении емкости конденсатора, в котором диэлектрическая проницаемость прокладки из полимерного диэлектрика является функцией содержания водяного пара в окружающем воздухе. На практике измеряемая емкость связана с относительной влажностью практически линейной зависимостью. Точка росы рассчитывается по температуре окружающего воздуха (измеряется отдельно и на очень коротком расстоянии от емкостного датчика) ($t_d = t_d(t, U)$). Соответствующие формулы приведены в томе I, глава 4, приложение 4.B. Чтобы избежать конденсации, которая способна продолжаться даже после того, как U < 100 %, и может быть замедлена фильтром, защищающим датчик, последний можно подогреть. Для такого метода не следует при расчетах использовать температуру окружающего воздуха; следует использовать значение температуры воздуха, окружающего подогретый датчик. На практике, соответствующую процедуру можно проводить только после тщательной калибровки в хорошо сконструированных климатических камерах;

b) конденсационные гигрометры, измеряющие температуру, при которой на зеркальце происходит едва заметная конденсация росы. Зеркальце подогревается или охлаждается, чаще всего с использованием термоэлектрического эффекта Пельтье, с целью достижения условий равновесия, при котором сохраняется образовавшийся конденсат. Зеркальце снабжается фотоэлектронной системой слежения за конденсатом. Хотя такие устройства позволяют получать непосредственно значения точки росы, загрязнение зеркальца и ухудшение его состояния могут привести к значительным погрешностям. В частности, зеркальце может разрушиться от мороза. По крайней мере, каждые шесть месяцев зеркальце должно проверяться, но только квалифицированным персоналом. Особую осторожность следует соблюдать при чистке зеркальца и строго следовать инструкциям изготовителя гигрометра.

2.9 АТМОСФЕРНОЕ ДАВЛЕНИЕ

2.9.1 Общие сведения

Общее описание наблюдений за атмосферным давлением можно найти в томе I, глава 3, а описание наблюдений за атмосферным давлением для целей авиации имеется в *Техническом регламенте*, том II, часть I, 4.6.7. Измерения давления на авиационной станции очень важны для установки высотомеров воздушных судов. Давление рассчитывается с точностью до десятых долей гектопаскаля (0,1 гПа). В коде Q атмосферное давление обозначается как QFE и QNH, где:

a) QFE (давление на уровне порога ВПП) определяется, как значение давления на высоте, соответствующей официальной высоте аэродрома (*Технический регламент*, том II, часть II, приложение 3, 4.7.2). Контрольная точка аэродрома, высота и превышение ВПП описываются в публикации ICAO (2013);

b) QNH (атмосферное давление над уровнем моря) определяется как значение давления, по которому устанавливается высотомер воздушного судна, чтобы он показывал официальную высоту аэродрома, когда воздушное судно находится в этом месте на земле. QNH вычисляется с использованием значения QFE и соотношения давление-высота, принятого в стандартной атмосфере ИКАО. На самом деле, стандартная атмосфера ИКАО — это поддиапазон Международной стандартной атмосферы, который закреплен стандартом ИСО 2533 (ISO, 1975) и разработан в сотрудничестве с Комитетом по космическим исследованиям, ИКАО и ВМО. Эта стандартная атмосфера представляет собой статическую атмосферу с фиксированным давлением и температурой на уровне моря и фиксированным градиентом температуры. Подробная информация о стандартной атмосфере и ее установленных константах приведена в публикациях ВМО (WMO, 1966) и ИКАО (1993). Для расчета QNH из QFE, а именно приведения к среднему уровню моря, используется данная виртуальная атмосфера, а не текущее истинное состояние атмосферы. Как следствие, QNH будет отличаться от сообщаемого атмосферного давления, приведенного к среднему уровню моря, о чем изложено в томе I, глава 3, 3.7, и для которого используется фактическая температура. Расчет QNH из QFE основан на линейном соотношении (для станций ниже примерно 3000–4000 м):

$$\mathrm{QNH} = A + B \times \mathrm{QFE} \tag{2.8}$$

где A и B зависят от геопотенциальной высоты станции (для получения подробной информации см. WMO, 1966, Introduction to Table 3.10). Для получения QNH следует выполнить следующую трехэтапную процедуру:

i) определить барометрическую высоту станции, исходя из QFE (барометрическая высота рассчитывается из QFE с использованием формул стандартной атмосферы);

ii) вычесть (или прибавить для станций ниже среднего уровня моря) из этой барометрической высоты высоту станции по отношению к среднему уровню моря, чтобы получить барометрическую высоту на высоте среднего уровня моря (значение может быть положительным или отрицательным);

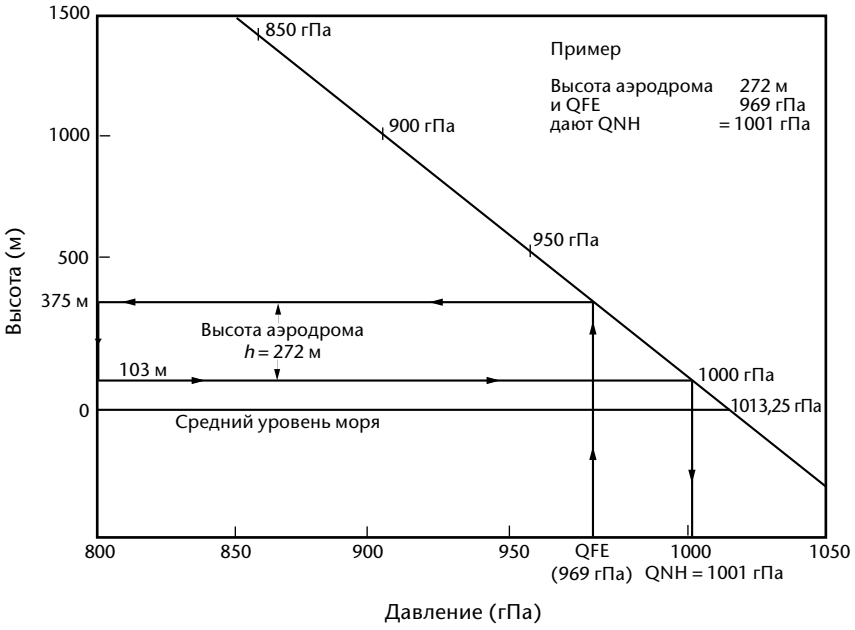
ii) получить из этой барометрической высоты соответствующее значение давления в соответствии со стандартной атмосферой, которое и будет QNH.

Пример данной процедуры получения QNH из QFE показан на рисунке ниже. Измеренные значения давления, а также QNH и/или QFE должны быть вычислены в десятых долях гектопаскаля. Значения QNH и QFE должны включаться в локальные сводки и в сводки, распространяемые за пределы аэродрома, и значения должны округляться до ближайшего целого гектопаскаля. О больших и быстрых изменениях давления следует уведомлять органы УВД.

Данный график представляет стандартную атмосферу (барометрическая высота как функция давления).

2.9.2 **Приборы и их установка**

Приборы для измерения давления, используемые на авиационной станции, аналогичны тем, что используются на синоптической станции, за исключением того, что более часто применяются точные автоматические цифровые барометры, показания которых удобнее и быстрее считывать при регулярных наблюдениях. Авиационные станции следует оснащать одним или несколькими хорошо откалиброванными барометрами, привязанными к стандартному эталону. Следует соблюдать установленный график регулярных сравнений приборов с этим стандартным прибором. Подходят как неавтоматические, так и автоматические барометры при условии, что температурная зависимость, дрейф и гистерезис достаточно компенсированы. Подробная информация о подходящих барометрах содержится в томе I, глава 3.



Соотношение между QFE и QNH

Размещение барометров на авиационной станции такое же, как и на синоптической станции. Если барометры должны быть помещены внутри здания, то нужно, чтобы датчики сообщались с внешней средой с помощью соответствующим образом размещенного статического устройства. Из-за воздействия ветра на здание разность давлений внутри и снаружи здания может быть больше 1 гПа. Для предотвращения таких отклонений, которые при высоких скоростях ветра могут достигать плюс-минус 3 гПа, статическое устройство должно располагаться достаточно далеко от этого здания. Кроме того, на измерения давления может повлиять кондиционер, что можно будет избежать, используя такое статическое устройство.

Имеются приборы с непосредственным считыванием значений QNH, и их можно использовать вместо обычного барометра-анероида или ртутного барометра, по показаниям которых значения QNH рассчитываются с помощью таблицы. Для таких устройств следует вводить правильные значения A и B, которые являются функцией геопотенциальной высоты станции (см. уравнение 2.8). Показания этих приборов необходимо периодически сравнивать со значениями QNH, вычисляемыми по данным измерений ртутным барометром.

2.9.3 Точность измерений давления и поправки

Значения давления, используемые для установки высотомеров воздушных судов, должны иметь погрешность измерений до 0,5 гПа или лучше (*Технический регламент*, том II, часть II, добавление A). К показаниям ртутного барометра следует применять все соответствующие поправки, а поправки, полученные в результате регулярных сравнений ртутных и анероидных приборов, обычно используемых для наблюдений, должны применяться ко всем значениям, полученным по барометрам-анероидам. Там, где в диспетчерских пунктах УВД используются анероидные высотомеры, для более четкого преобразования их показаний в официальный уровень высоты аэродрома или взлетно-посадочной полосы должны быть предусмотрены поправки, отличающиеся от тех, которые используются на наблюдательной станции (*Технический регламент*, том II, часть II, приложение 3, 4.7).

Значения давления, используемые для установки высотомеров, должны относиться к официальной высоте аэродрома. Для взлетно-посадочных полос с неточным заходом на

посадку, пороги которых находятся на 2 м или более ниже либо выше высоты аэродрома, и для взлетно-посадочных полос с точным заходом на посадку значения QFE, если это необходимо, должны относиться к соответствующим пороговым значениям высоты.

2.10 ПРОЧАЯ ВАЖНАЯ ДЛЯ АЭРОДРОМОВ ИНФОРМАЦИЯ

2.10.1 Общие сведения

Наблюдения, выполняемые на авиационных станциях, должны также включать любую имеющуюся информацию о метеоусловиях в зонах захода на посадку и набора высоты, касающуюся следующих явлений: кучево-дождевые облака или грозы, умеренная или сильная турбулентность, горизонтальный и/или вертикальный сдвиг ветра и значительные изменения ветра по маршруту полета, град, сильные фронтальные шквалы, умеренное или сильное обледенение, переохлажденные осадки, выраженные горные волны, песчаные и пыльные бури, низовая метель или воронкообразные облака (торнадо или водяные смерчи), например, SURFACE WIND 320/10 WIND AT 60M 360/25 IN APCH или MOD TURB AND ICE INC IN CLIMB OUT.

2.10.2 Наклонная дальность видимости

Несмотря на разработки, выполняемые в различных странах, никакие приборы для измерения наклонной дальности видимости не стали использоваться в оперативной работе. Быстрое технологическое развитие систем всепогодной посадки дало возможность понизить посадочные минимумы на аэродромах (категории II, III A и III B) и постепенно привело к тому, что данный параметр считается менее важным. Никаких рекомендаций по измерению этого параметра не установлено.

2.10.3 Сдвиг ветра

Сдвиг ветра — это пространственное изменение скорости и/или направления ветра (включая восходящие и нисходящие потоки). Интенсивность сдвига ветра в соответствии с его воздействием на воздушное судно можно классифицировать как слабую, умеренную, сильную или опасную. Сдвиг ветра на малых высотах, который может повлиять на посадку и взлет, может представлять собой вертикальный градиент ветра в низких слоях термически устойчивой атмосферы, либо может быть связан с воздействием препятствий и фронтальных поверхностей на поток ветра, с влиянием берегового и морского бризов, а также с ветровым режимом внутри и вокруг конвективных облаков, особенно в штормовых облаках. Сильные штормы являются главной причиной сдвига ветра в приземном слое, приводят к авиационным катастрофам как при заходе воздушных судов на посадку и во время нее, так и при взлете.

Подготовка и выпуск предупреждений о сдвиге ветра на траекториях набора высоты и захода на посадку описываются в *Техническом регламенте*, том II, часть II, приложение 3, 4.8.1.4.

Измерения вертикального сдвига ветра, основанные на информации, представленной в томе I, глава 5, могут проводиться напрямую с помощью анемометров, установленных на высоких мачтах, которые должны быть расположены на определенном расстоянии от аэропорта. Из систем дистанционного зондирования имеются: доплеровский радиолокатор, лидар, содар и измерители профиля ветра. В лидаре используется лазерный луч, в содаре — акустическое излучение, в радиолокаторе для получения профилей ветра используется электромагнитное излучение с частотами приблизительно 50 МГц, 400 МГц или 1 000 МГц.

Горизонтальный сдвиг ветра обычно определяется с помощью системы анемометров, установленных по всему аэродрому. Эта система называется системой предупреждения

о сдвиге ветра на малых высотах. Алгоритмы компьютерной обработки дают возможность выдавать предупреждения о сдвиге ветра. Эта система используется, в частности, в тропических и субтропических регионах, где часто возникают интенсивные штормы.

Данный вопрос рассмотрен на глобальном уровне в *Руководстве ИКАО по сдвигу ветра и турбулентности на малых высотах* (Док. 9817), первое издание, 2005 г.

Хотя сдвиг ветра может оказывать существенное влияние на полеты воздушных судов, никаких рекомендаций или критериев до сих пор не установлено. Тем не менее, подробная информация о предупреждениях о сдвиге ветра приводится в публикации ИКАО (ICAO, 2011), глава 4.

2.10.4 Заметные инверсии температуры

Информацию о заметных инверсиях температуры, превышающих 10 °C между поверхностью ВПП и уровнями до 300 м, следует предоставлять, если таковая имеется. Данные обычно получаются с помощью аэрологических радиозондов, дистанционного зондирования, наблюдений с самолетов (например, АМДАР) либо анализа метеорологической ситуации.

2.11 АВТОМАТИЗИРОВАННЫЕ СИСТЕМЫ МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИХ НАБЛЮДЕНИЙ

На авиационных станциях специально разработанные приборные системы для измерения, обработки, дистанционной индикации и регистрации значений различных метеорологических величин, репрезентативных для зон захода на посадку, посадки и взлета, а также для взлетно-посадочных полос аэропорта, стали обычной практикой (*Технический регламент*, том II, часть I, 4.1).

Эти автоматизированные системы включают:

a) систему приема и накопления данных для преобразования результатов электрических аналоговых измерений (вольты, миллиамперы, сопротивление, емкость) в цифровые значения, выраженные в соответствующих единицах, и для прямого ввода цифровых данных;

b) устройство предварительной обработки данных (осреднение показаний за период времени от 1 до 10 мин в зависимости от измеряемого параметра и выборка минимальных, максимальных и средних значений различных параметров);

c) компьютер, который используется, например, для подготовки сводок SYNOP, METAR и SPECI, а также для программного обеспечения телесвязи.

Наблюдатель должен иметь возможность включать в эти сводки те сведения, которые не измеряются автоматической станцией; сюда могут входить текущая погода, прошедшая погода, облачность (тип и количество), а иногда видимость. Поэтому для целей авиации эти станции часто являются только вспомогательными для получения метеорологических данных и не могут применяться без наблюдателей.

Приборы, установленные на автоматической станции, должны регулярно проверяться и инспектироваться. Проверки качества необходимы и рекомендуются во избежание больших ошибок и получения информации о дрейфе параметров оборудования. Измерения, осуществляемые АМС, подробно рассматриваются в данном томе III, глава 1. Обеспечение качества и другие вопросы управления рассматриваются в данном томе, глава 1. Чтобы обеспечить заявленное качество работы автоматических приборов, следует

разработать подробный план оценки с указанием подробной информации о техническом обслуживании и периодичности калибровки и процедур обратной связи для улучшения системы наблюдений.

Рекомендации по передаче метеорологической информации, поступающей с автоматических систем наблюдений, содержатся в *Техническом регламенте*, том II, часть II, приложение 3, 4.

2.12 РАДИОЛОКАТОР

На аэродромах с интенсивным воздушным движением стали незаменимыми метеорологические радиолокаторы, поскольку они обеспечивают эффективные, постоянные наблюдения в реальном масштабе времени, дополняющие обычные метеорологические наблюдения, необходимые для посадок и взлетов. Радиолокатор может предоставить информацию по обширной зоне до 150—200 км. Он также является вспомогательным средством для краткосрочного прогнозирования в пределах часа или нескольких часов после наблюдения (возможная помощь при подготовке сводки TREND).

Принятые эхо-сигналы интерпретируются для определения типа осадков в зоне наблюдений станции: осадки из слоистых или конвективных облаков, изолированные области осадков или обложные осадки, либо осадки, связанные с грозами, а при определенных условиях для определения вида осадков: снег или град. Полученные отображения дают возможность отследить траектории линий шквалов или фронтов, а также осуществлять мониторинг их развития (усиление или ослабление). Если радиолокатор оборудован доплеровской системой, то тогда можно вычислять скорость и направление движения этих эхо-сигналов от наблюдаемых явлений.

Наиболее широко используются радиолокаторы, работающие на длинах волн 3, 5 или 10 см. Выбор зависит от района земного шара и предполагаемой цели использования, но общей тенденцией в настоящее время является использование волн длиной 5 см.

В определенных районах центры сбора собирают радиолокационные отображения, поступающие с ряда радиолокационных станций в стране или в регионе, и составляют из них комплексное отображение. Происходит также обмен отображениями между различными центрами, чтобы с помощью радиолокаторов обеспечивать безопасность в максимально возможной большой зоне.

Общее описание радиолокационных наблюдений можно найти в данном томе, глава 7.

2.13 ДАТЧИК ЛЬДА

Данный тип приборов, описанный в томе I, глава 14, устанавливается на ряде аэродромов для предоставления информации об условиях на взлетно-посадочных полосах зимой. Измеряются или обнаруживаются следующие параметры: температура на поверхности и на глубине несколько сантиметров ниже поверхности взлетно-посадочной полосы, наличие снега, воды, прозрачного или матового льда и наличие солей или продуктов очистки ВПП ото льда, если таковые применяются. Такие датчики, выполненные в виде компактного устройства, располагаются в определенном ряде точек взлетно-посадочных полос или рулежных дорожек; при этом их число зависит от размера аэродрома и количества взлетно-посадочных полос, безопасность которых должна быть обеспечена. Вблизи взлетно-посадочных полос также размещаются метеорологические датчики для измерения температуры и влажности воздуха, ветра и осадков.

Система сбора данных и обработки данных отображает измеренные параметры и их изменения во времени. В зависимости от типа используемого программного обеспечения

системы предупреждения оповещают администрацию аэропорта, ответственную за функционирование аэродрома, о наличии прозрачного льда или о прогнозах условий, опасных для воздушных судов.

2.14 ОБНАРУЖЕНИЕ МОЛНИЙ

В последние годы разработаны системы для определения местоположения гроз, основанные на регистрации низкочастотного электромагнитного излучения, создаваемого молниями (см. данный том, глава 6). Эти системы измеряют время прохождения сигнала и/или направление, с которого он приходит. Некоторые системы также анализируют характеристики каждого импульса электромагнитного излучения для определения разрядов молний из облака на землю. В определенных районах установлен ряд таких устройств, предназначенных для измерения и определения местоположения этих явлений в зоне 50—100 км вокруг аэродрома.

2.15 ДРУГИЕ СОПУТСТВУЮЩИЕ НАБЛЮДЕНИЯ

Необходимо предоставлять дополнительную информацию, если атмосфера подвержена опасному загрязнению, например, в период вулканического извержения. Также следует предоставлять информацию в поддержку спасательных операций, особенно на прибрежных станциях. Если это касается обеспечения полетов воздушных судов во время взлета и посадки, информация о состоянии взлетно-посадочной полосы должна сообщаться в сводках METAR и SPECI, передаваемых соответствующим полномочным органом аэропорта.

Данные о вулканическом пепле должны передаваться (в сводках SIGMET) в качестве части дополнительной информации (*Технический регламент*, том II, приложение 3, 4.8.). Подробная информация о наблюдениях за облаками вулканического пепла, радиоактивных материалов и токсических химических веществ приведена в публикациях ИКАО (2004, 2007).

В сводки METAR и SPECI следует включать информацию о температуре поверхности моря и состоянии моря или значительной высоте волны, полученную с авиационных метеорологических станций, установленных на прибрежных сооружениях в поддержку полетов вертолетов (*Технический регламент*, том II, часть II, приложение 3, 4.8.1.5).

СПРАВОЧНАЯ И ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ЛИТЕРАТУРА

Международная организация гражданской авиации, ИКАО, 1993*: Руководство по стандартной атмосфере ИКАО (с верхней границей, поднятой до 80 километров)*. Третье издание, Док. 7488, Монреаль.

———, 2005: *Руководство по практике наблюдения за дальностью видимости на ВПП и передачи сообщений о ней.* Третье издание, Док. 9328, Монреаль.

———, 2007: *Руководство по облакам вулканического пепла, радиоактивных материалов и токсических химических веществ.* Второе издание, Док. 9691, Монреаль.

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

———, 2011: *Наставление по кодам* (ВМО-№ 306), том I.1. Женева.

———, 2012: *Наставление по применению стандартов образования и подготовки кадров в области метеорологии и гидрологии* (ВМО-1083), том I. Женева.

———, 2014: *Руководство по системам метеорологических наблюдений и распространения информации для метеорологического обслуживания авиации* (ВМО-№ 731). Женева.

———, 2015 (*обновлено в 2018 г.): Технический регламент* (ВМО-No. 49), том I. Женева.

———, 2016: *Технический регламент (ВМО*-No. 49), том II. Женева.

Committee on Low-Altitude Wind Shear and its Hazard to Aviation, 1983: *Low-Altitude Wind Shear and Its Hazard to Aviation.* National Academy Press, Washington, D.C. (available from https://nap.nationalacademies.org/catalog/558/low-altitude-wind-shear-and-its-hazard-to-aviation).

International Civil Aviation Organization (ICAO), 1996: *Manual on the Provision of Meteorological Service for International Helicopter Operations*. Doc. 9680, Montreal.

———, 2004: *Handbook on the International Airways Volcano Watch (IAVW)*. Second edition, Doc. 9766, Montreal.

———, 2010: *Units of Measurement to be Used in Air and Ground Operations*. ICAO Annex 5, Fifth edition, Montreal.

———, 2011: *Manual of Aeronautical Meteorological Practice.* Ninth edition, Doc. 8896, Montreal.

———, 2013: *Aerodromes*. ICAO Annex 14, Volume I, Sixth edition, Montreal.

International Organization for Standardization, 1975: Standard Atmosphere. ISO-2355:1975. Geneva.

World Meteorological Organization, 1966: *International Meteorological Tables* (S. Letestu, ed.) (1973 amendment). (WMO-No. 188, TP 94). Geneva.

———, 1990: *The First WMO Intercomparison of Visibility Measurements: Final Report (United Kingdom 1988/1989)* (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). Papers Presented at the WMO Technical Conference on Instruments and Methods of Observation (TECO-92). Instruments and Observing Methods Report No. 49 (WMO/TD-No. 462). Geneva.

———, 2003: *Guide to Practices for Meteorological Offices Serving Aviation* (WMO-No. 732). Geneva.

———, 2017: *International Cloud Atlas - Manual on the Observation of Clouds and Other Meteors* (WMO-No. 407). Geneva.

ГЛАВА 3. САМОЛЕТНЫЕ НАБЛЮДЕНИЯ

3.1 ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

3.1.1 Определения

В настоящей главе описываются методы, используемые для автоматических метеорологических измерений на современных коммерческих воздушных судах, известных под общим названием «самолетные наблюдения». Принципы, описанные в настоящей главе, могут быть использованы для обработки данных на любом адекватно оборудованном приборами воздушном судне в целях определения и разработки систем наблюдений с воздушных судов.

Система наблюдений ВМО, именуемая как «Система передачи метеорологических данных с воздушных судов (АМДАР)», является системой наблюдений с воздушных судов, которая описывается ВМО (2017) в качестве системы для удовлетворения метеорологических потребностей, связанных с сообщением метеорологических данных с платформы, расположенной на воздушном судне. Эксплуатация системы АМДАР осуществляется Членами ВМО в рамках соглашения о сотрудничестве с авиакомпаниями-партнерами, и полученные таким образом данные передаются в Информационную систему ВМО (ИСВ). Дополнительная информация имеется в публикации ВМО (2017).

АМДАР и другие самолетные системы наблюдений, как правило, эксплуатируются на воздушных судах, оборудованных сложными навигационными и другими зондирующими системами. Имеются датчики для измерения скорости воздушного потока, температуры и давления воздуха. Другие данные, относящиеся к месту положения воздушного судна, времени наблюдения, ускорению и ориентации, поступают от навигационной системы воздушного судна. На воздушном судне также находятся бортовые компьютеры для управления полетом и навигационные системы, с помощью которых навигационные и метеорологические данные непрерывно обрабатываются на компьютере и передаются в кабину экипажа. В традиционных системах наблюдений, находящихся на воздушном судне, эти данные проходят дальнейшую обработку и автоматически вводятся в систему связи воздушного судна для передачи на землю или, в качестве альтернативы, на воздушном судне может использоваться специальный пакет для обработки данных в целях доступа к необработанным данным из систем воздушного судна и независимого расчета метеорологических переменных.

В системах АМДАР эти технические средства используются для составления и передачи метеорологических сводок в режиме реального времени. Обычно эти сообщения содержат данные о скорости и направлении ветра (в горизонтальной плоскости), температуре воздуха, барометрической высоте (высота в стандартной атмосфере, связанная со стандартной изобарической поверхностью), времени наблюдения, фазе полета и местоположении воздушного судна. Если воздушное судно оборудовано должным образом, оно может также сообщать данные о влажности или отношении смеси водяного пара и показателе турбулентности.

Для того чтобы получить данные метеорологических измерений, репрезентативные для свободного воздушного потока вблизи воздушного судна, исходные данные метеорологических наблюдений необходимо подвергнуть существенной коррекции и комплексной обработке. Полное описание всех соответствующих процессов выходит за рамки настоящего Руководства, однако в данной главе приводится изложение принципов со ссылками на дополнительную литературу.

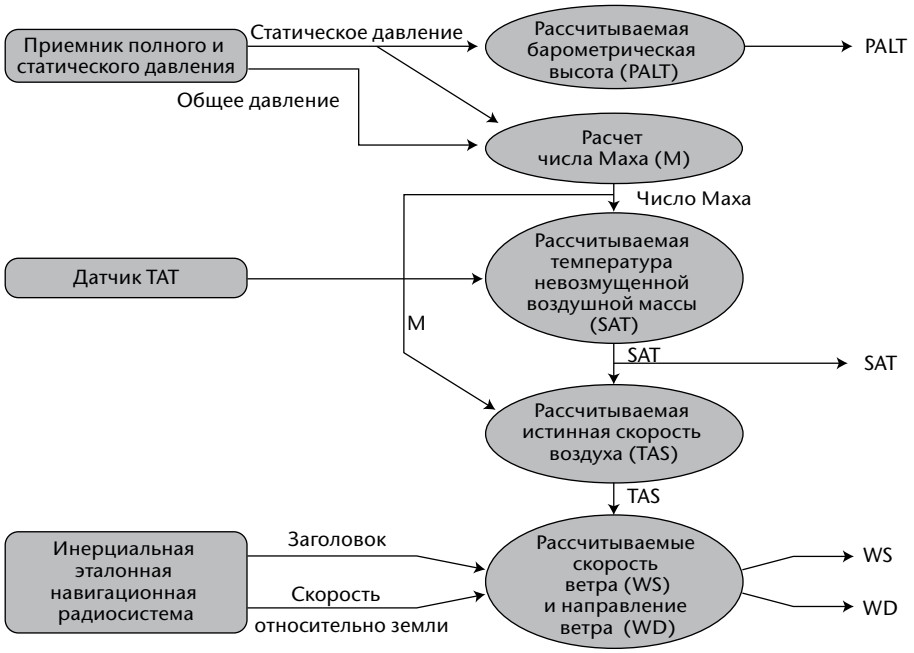


Рисунок 3.1. Обработка данных с датчика АМДАР

3.1.2 **Самолетные метеорологические датчики**

Основными датчиками, устанавливаемыми на борту современных воздушных судов, выполняющих коммерческие рейсы, являются приемник полного и статического давления и датчик полной температуры воздуха (TAT). Данные с этих датчиков, а также информация, поступающая от навигационной системы воздушного судна, обычно представляемой одной или сочетанием радионавигационных систем (Глобальная система определения местоположения, ГСОМ), оборудованием для измерения расстояния (ОИР), всенаправленным курсовым радиомаяком УКВ-диапазона (УВР), системой инструментальной посадки и, в некоторых случаях, инерциальной навигационной системой (ИНС), используются для расчета следующих метеорологических параметров:

a) барометрической высоты H_p,[1] позиции по горизонтали и текущего времени (PALT на рисунке 3.1);

b) статической температуры воздуха T_s (SAT на рисунке 3.1);

c) скорости ветра |V|;

d) направления ветра D_w.

На некоторых воздушных судах имеются дополнительные возможности для измерения параметров турбулентности или дополнительные датчики для измерения обледенения на фронтальных поверхностях и/или для измерения относительной влажности воздуха или отношения смеси водяного пара *r*.

[1] Барометрическая высота определяется как мера высоты по отношению к стандартному нулевому уровню в 1013,2 гПа. Переменный эшелон полета (FL) равнозначен барометрическому давлению на всех эшелонах. Барометрическая высота и эшелон полета могут не быть взаимозаменяемыми при указанной высоте воздушного судна, высоте воздушного судна или самолетной высоте, на которой применяются другие определения. Поскольку воздушное судно может совершать полет при уровнях давления выше 1013,2 гПа (а именно – ниже стандартной плоскости высоты), барометрическая высота (или эшелон полета) могут быть отрицательными.

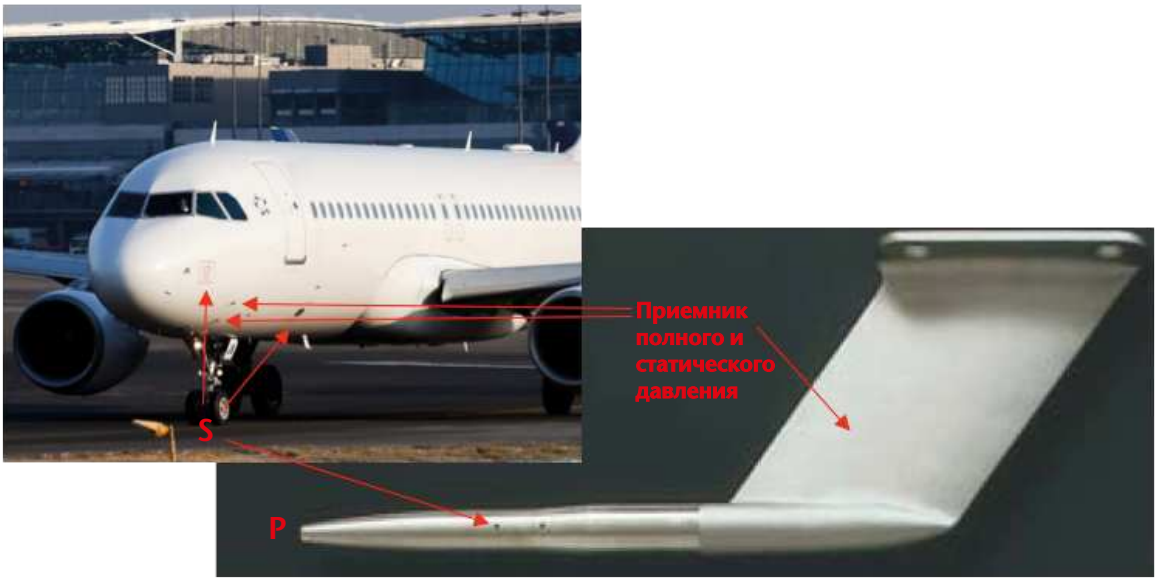


Рисунок 3.2. Типовая конфигурация для измерения статического давления и полного давления на воздушном судне. Статическое давление измеряется (см. отметку «S») либо в отверстиях по обеим сторонам фюзеляжа, либо в боковых отверстиях датчика полного-статического давления. Общее давление измеряется в направленном вперед отверстии датчиков полного давления или датчиков полного-статического давления (см. отметку «P»), установленных на фюзеляже в нескольких метрах ниже носовой части.

Для того, чтобы оценить сложность системы обработки данных, структура приведенного ниже описания представлена в виде потока процесса в типичной операционной системе. Необходимо будет отметить (рисунок 3.1), что рассчитываемые переменные тесно взаимосвязаны.

3.2 ДАВЛЕНИЕ И ЧИСЛО МАХА

3.2.1 Приемник полного и статического давления

Приемник полного и статического давления (рисунок 3.2) размещается в невозмущенном потоке воздуха вне пограничного слоя воздушного судна и измеряет общее давление (статистическое давление плюс полное или динамическое давление). Некоторые из этих датчиков могут также измерять статическое давление (а именно - давление в невозмущенном потоке воздуха, в идеальном случае давление невозмущенного окружающего воздуха), однако на большинстве авиалайнеров, обычно используемых для АМДАР, статическое давление измеряется через отверстия, расположенные в боковой части корпуса воздушного судна. Параметры давления измеряются электронными датчиками и передаются в центральный блок, обеспечивающий алгоритмы для аэродинамических поправок (корректировка «встроенной ошибки»), и на заключительном этапе поступают в ЭВМ обработки данных о параметрах атмосферы (ADC). ADC по результатам этих двух измерений рассчитывает барометрическую высоту, статическую температуру и число Маха.

3.2.2 Барометрическая высота

Данные измерения статического давления обычно не передаются в АМДАР, а преобразуются в ADC в эквивалентную высоту на основе Международной стандартной

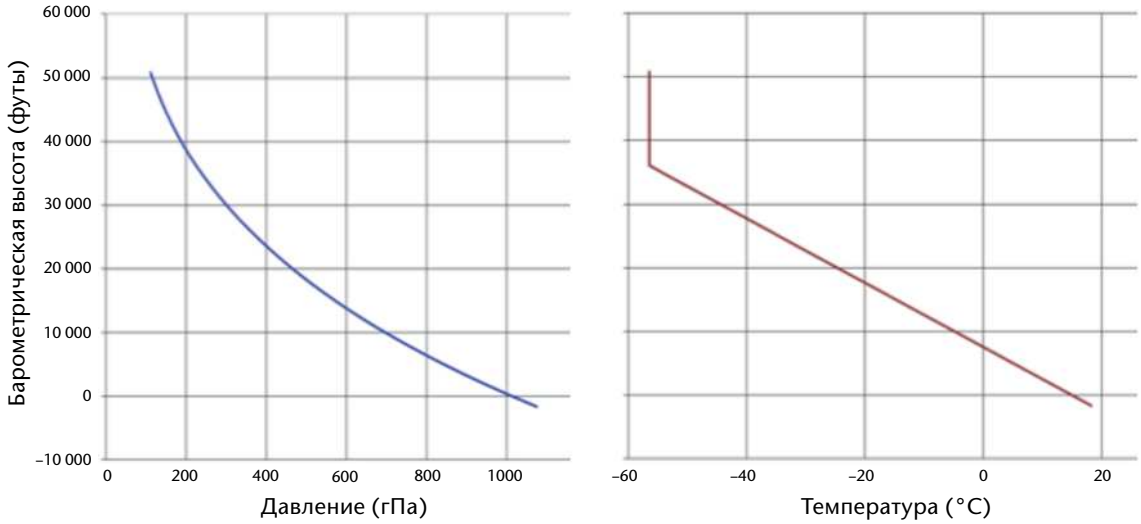


Рисунок 3.3. Международная стандартная атмосфера.

атмосферы (ISO, 2007). Стандартная атмосфера (см. рисунок 3.3) предполагает линейное уменьшение температуры с высотой на 6,5 °C на каждый километр до высоты в 11 км (36 089 футов)[2] при температуре и давлении над средним уровнем моря в 15 °C и 1 013,25 гПа соответственно. Предполагается, что в слое от 11 км (36 089 футов) до 20 км (66 000 футов) температура остается постоянной и равной –56,5 °C.

При значении барометрической высоты H_p, равном или меньше 11 км (36 089 футов), статическое давление (p_s) связано с H_p с помощью следующего выражения:

$$p_s = 1\,013.25 \cdot \left(1 - 6.8756 \cdot 10^{-6} \cdot H_p\right)^{5.2559} \quad (3.1)$$

при H_p — в единицах футов и p_s — в единицах гПа. Например, если H_p составляет 9 144 м (30 000 футов), то p_s = 300,9 гПа.

Приведенное выше выражение 3.1 может быть использовано для вычисления статического давления на основе сообщенной изобарической высоты, при условии, что в бортовом программном обеспечении значение статического давления было скорректировано только для эффектов аэродинамического происхождения (встроенная ошибка), и если отметка шкалы высотомера на воздушном судне (нулевое исходное значение) установлена по стандарту ИКАО для давления, приведенного к среднему уровню моря (1 013,25 гПа). Процедуры применения навигационных приборов предусматривают также настройку нулевой отметки шкалы высотомера и на другие исходные уровни. Например, высотомер может быть установлен по атмосферному давлению на уровне аэродрома (барометрическое давление на высоте поля аэродрома, QFE) или QNH (значение QFE уменьшено к давлению на уровне моря путем использования стандартной атмосферы), которое является эталонным давлением по шкале стандартной атмосферы, таким, которое указано на высоте аэродрома на уровне конкретной посадочной полосы. Изобарическая высота, сообщаемая бортовым программным обеспечением АМДАР, должна всегда быть привязана к стандарту ИКАО для давления, приведенного к среднему уровню моря.

Для использования в кабине пилотов «показанная» высота H_i (барометрическая высота над средним уровнем моря (СУМ)) рассчитывается по барометрической высоте (H_p)

[2] Имеется общая политика использования единиц системы СИ. Однако значения в футах также приводятся для обозначения высоты в этой главе, соблюдая общепринятую практику в авиационном сообществе. Единица длины системы СИ – метр (м). Один метр соответствует 3,280 839 895 013 1 фута. Следует учитывать возможную погрешность при округлении, в связи с чем необходимо проверять результаты.

минус начальное значение высоты, установленное на шкале высотомера по стандартной атмосфере (H_r), плюс высота исходного давления над СУМ (E_{Ref}). Общее выражение выглядит следующим образом:

$$H_i = H_p - H_r + E_{\text{Ref}} \tag{3.2}$$

$$H_r = \left[1 - \left(\frac{p_r}{1\,013.25}\right)^{0.190\,26}\right] \cdot 145\,442 \tag{3.3}$$

где H_r, H_i и E_{Ref} даются в футах, а p_r — в единицах гПа; p_r — давление, установленное на шкале высотомера, такое как:

QNH, при E_{Ref} = 0 м (0 футов) над средним уровнем моря

или

QFE, при E_{Ref} = высота поля над средним уровнем моря.

Заметим, что H_r = 0, если p_r = 1 013,25 гПа.

Например:

a) если начальная отметка шкалы высотомера установлена на значение QNH, составляющее 1000,0 гПа, и показанная высота равна 2845 м (9335 футов), H_p = 2845 м + 110 м (9335 футов + 365 футов) = 2955 м (9699 футов) и p_s = 705 гПа;

b) если шкала установлена на значение QFE, составляющее 990 гПа, ниже высота на уровне аэродрома составляет 84 м (276 футов) и природная высота равна 2761 м (9058 футов), то $H_p = H_i + H_r$ (QFE) – E_{Ref} = 2 761 м + 194 м – 84 м (9058 футов + 641 фут – 276 футов) = 2871 м (9423 фута), а значение QNH будет равно 1 000 гПа.

Однако для целей АМДАР следует выбирать такой параметр высоты, который исключительно основан на аэродинамически чистом статическом давлении без какой-либо ссылки на QNH или QFE.

Если H_p больше 11 км (36 089 футов), то статическое давление выражается формулой:

$$p_s = 226.32 \cdot e^{\frac{36\,089 - H_p}{20\,806}} \tag{3.4}$$

или

$$H_p = 36\,089 - 20\,806 \cdot \ln\left(\frac{p_s}{226.32}\right)$$

где H_p приводится в единицах футов, а p_s — в единицах гПа. Например, если H_p составляет 40 000 футов, то p_s = 187,5 гПа.

3.2.2.1 ***Неопределенность измерений***

Источники неопределенности включают следующее:

a) неопределенность калибровки;

b) краткосрочная случайная погрешность приборов;

c) дрейф калибровочных значений;

d) неопределенность воздействия или неопределенность статического источника (заложенная).

Поскольку обеспечение безопасного эшелонирования воздушных судов имеет крайне важное значение, эти неопределенности корректируются в максимально возможной степени в ADC. Неопределенность статического источника, которая является функцией места размещения приемника давления, числа Маха и веса воздушного судна, определяется эмпирически во время летного испытания. Неопределенность давления определяется по сообщаемым значениям высот.

Возможной причиной времени задержки поступления данных в системе АМДАР является радиосвязь между воздушным судном и землей. Этот процесс связи регулируется международными стандартами, такими как ARINC 620, AOSFRS (Спецификация функциональных требований в отношении бортовых программных средств АМДАР) или AAA, которая поддерживает ACMS (Система мониторинга состояния самолета) ACARS AMDAR. В более ранних вариантах этих стандартов барометрические высоты сообщались с дискретностью в сотни футов, что для крейсерского эшелона полета эквивалентно приблизительно 1,5 гПа. Это составляет примерно 0,1 % от полномасштабного измерения давления. При точности приборов, составляющей в лучшем случае порядка 1 гПа, неопределенность измерения статического давления в крейсерском эшелоне, полученная посредством преобразования барометрической высоты, составляет около 2 гПа. Для высоты на уровне моря разрешение эквивалентно примерно 3,7 гПа, результатом чего является неопределенность порядка 4 гПа. В последних вариантах бортового программного обеспечения АМДАР высота сообщается в десятках футов, и в этом случае неопределенность, обусловленная погрешностью, связанной с кодированием, является боле низкой по сравнению с оставшейся неопределенностью измерения. Воздушное судно, оборудованное АМДАР, соответствует правилам и требованиям сокращенного минимума вертикального эшелонирования, изложенными официальными учреждениями в рамках организации воздушного движения (ОВД). От воздушных судов требуется поддержание неопределенности барометрической высоты в 50 м (160 футов) даже в диапазоне высот от 9 144 м (30 000 футов) до 12 192 м (40 000 футов). Таким образом, неопределенность давления должна находиться в пределах ±1,5 гПа, а система контроля качества авиакомпании должна поддерживать точность на этом уровне.

3.2.3 **Число Маха**

Число Маха (M — отношение истинной скорости воздушного потока к скорости звука в спокойной атмосфере) является важным элементом для эксплуатации воздушных судов. В системах АМДАР оно используется для введения поправок в измеренные значения температуры воздуха и скорости воздушного потока. В сухом воздухе скорость звука пропорциональна квадратному корню из абсолютной (статической) температуры T_s. Число Маха зависит только от двух параметров, а именно:

a) давление скоростного напора q_c, измеряемое установленными на воздушном судне датчиками полного давления, и

b) статическое давление p_s, измеряемое в определенных местах в боковой части фюзеляжа воздушного судна:

$$M^2 = \frac{2}{\kappa - 1}\left[\left(\frac{q_c + p_s}{p_s}\right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}} - 1\right] \tag{3.5}$$

где $q_c + p_s$ — общее давление; и κ — соотношение удельных теплоемкостей сухого воздуха (C_p/C_v).

Дополнительную информацию см. в работах по вопросам аэродинамики воздушных судов, таких как Abbott and von Doenhoff (1959) и Dommasch et al. (1958).

3.2.3.1 *Неопределенность измерений*

Неопределенность измерений определяется почти полностью неопределенностью основополагающих измерений давления. В нормальном режиме неопределенность производного числа Маха должна быть менее 0,2 %.

3.3 ТЕМПЕРАТУРА ВОЗДУХА

3.3.1 Датчик полной температуры воздуха

Датчик полной температуры ТАТ размещается в невозмущенном воздушном потоке и используется для измерения статической температуры (невозмущенного потока воздуха). Точное измерение температуры воздуха является основой для получения других производных метеорологических элементов. Например, значение температуры используется для расчета истинной скорости воздушного потока и, таким образом, влияет на расчет компонентов скорости ветра. ADC корректирует температуру, фактически измеренную датчиком, используя при этом расчетное значение числа Маха.

Большинство воздушных судов, совершающих коммерческие рейсы, оборудовано датчиками ТАТ — термометрами контактного типа. На рисунке 3.4 показана общая схема такого датчика. Чувствительный элемент датчика представляет собой термометр сопротивления. Защитный кожух предохраняет чувствительный элемент от попадания облачных капель и осадков, однако имеются сообщения о том, что в кучевых облаках на чувствительном элементе появляются капли воды (Lawson and Cooper, 1990). Тем не менее, основной причиной отделения аэродинамических частиц является защита данного элемента против абразивных воздействий.

Важная в термодинамическом плане часть защитного кожуха предназначена для обеспечения практически полного адиабатического преобразования кинетической

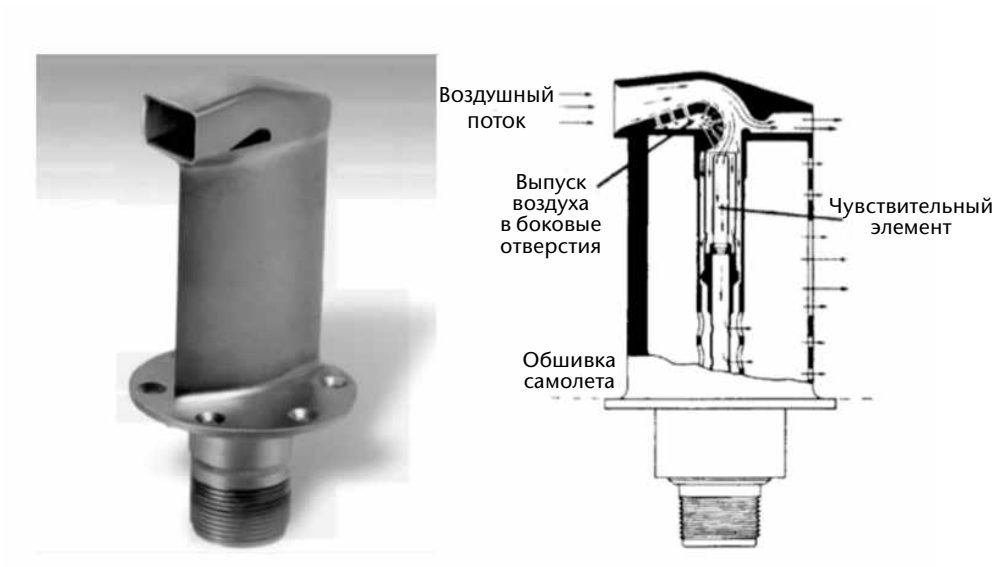


Рисунок 3.4. Типичный пример датчика температуры воздушного судна — датчика полной температуры воздуха (см. Stickney at al., 1990). Внутренняя аэродинамика проектируется таким образом, чтобы торможение потока происходило до момента соприкосновения с датчиком. Соответствующий внутренний пограничный слой сохраняется достаточно малым и, вместе с тем, в стороне от сенсорного элемента, с тем чтобы торможение воздушного потока постоянно происходило в виде чисто адиабатического процесса. Искривление потока используется для сепарации частиц.

энергии забранного воздуха во внутреннюю энергию. Скорость воздушного потока должна быть снижена до остаточного значения в датчике в несколько м $с^{-1}$. В этом месте поток воздуха, вступающий в контакт с чувствительным элементом, должен быть свободен от теплообмена с внутренними стенками. Вот почему различные виды защитных кожухов TAT оборудованы/имеют в своей конструкции отверстия в стенках вокруг входа в воздухозаборник. Эти отверстия производят всасывающее действие для ограничения внутреннего пограничного слоя. Благодаря этому, теплообмен со стенкой поддерживается на достаточно низком уровне для поддержания точности измерений. Даже если выходная кромка защитного кожуха обогревается для борьбы с обледенением, соответствующее увеличение измеряемой температуры — ниже 0,5 K при $M > 0{,}3$.

Значение температуры (T_r), измеряемое таким датчиком, близко к теоретическому значению T_t, которое было бы получено при идеальном адиабатическом сжатии невозмущенного потока воздуха в аэродинамически идеальной точке заторможенного потока. Соотношение между статической температурой воздуха T_s, которая представляет собой температуру в невозмущенном потоке воздуха, и измеренной температурой T_r, определяется выражением (при этом T как абсолютная температура):

$$\frac{T_r}{T_s} = 1 + \lambda \cdot \frac{\kappa - 1}{2} \cdot M^2 \qquad (3.6)$$

где λ — это коэффициент восстановления датчика температуры. Современные датчики TAT показывают типичные значения коэффициента восстановления датчика температуры порядка 0,98 для чисел Маха от 0,5 до 0,9. Этот коэффициент, в первую очередь, учитывает эффект частичного торможения воздушного потока и, во-вторых, необходимость измерения передаваемой потоку незначительной образующейся при трении теплоты. Значение этого коэффициента несколько меньше 1. Оно зависит от конструкции защитного кожуха, но также и от числа Маха. На крейсерской скорости при числе Маха 0,85 температура датчика превышает температуру окружающей среды более чем на 30 K.

С более подробной информацией о датчиках TAT можно ознакомиться в работе Stickney et al. (1990).

3.3.1.1 ***Погрешности измерения***

Статическая температура является функцией от измеренной датчиком температуры и числа Маха. Как показано выше, число Маха является производным от значений полного давления и статического давления, независимые измерения которых осуществляются с помощью приемника полного и статического давлений. Таким образом, погрешность измерения температуры зависит от трех источников погрешностей помимо погрешностей калибровки и других факторов (например, работы противообледенительного устройства датчика).

Погрешность измерения температуры составляет около 0,4 °K при числе Маха 0,8, снижаясь при этом до 0,3 °K при малых числах Маха. При использовании первого варианта стандарта бортового программного обеспечения ARINC 620 температура характеризовалась разрешением в 1 K. Начиная с 1994 г., было предписано ее кодировать в 0,1 K. При смачивании в облаках датчик будет охлаждаться за счет испарения; возникающие при этом дополнительные погрешности будут почти до 3,0 °K или около этого. При очень низкой воздушной скорости (например, во время взлета) скорость просасывания воздуха через датчик может оказаться недостаточной для поддержания точности измерения. Для преодоления этой проблемы на некоторых воздушных судах применяются датчики с инжекцией воздуха. Как правило, бортовое программное обеспечение следует конфигурировать таким образом, чтобы передача данных не начиналась раньше взлета. Несмотря на сложность применяемой процедуры обработки данных, оперативный опыт показывает, что погрешность измерения средней температуры на крейсерской высоте полета составляет около 1,0 K.

3.4 СКОРОСТЬ И НАПРАВЛЕНИЕ ВЕТРА

При измерении трехмерного вектора ветра используются данные самолетной навигационной системы (полная комбинация или комплект радионавигационного оборудования, инерционной платформы, магнитного компаса и системы ГСОМ) и системы измерения скорости воздушного потока (компьютер обработки данных о параметрах атмосферы, использующий систему измерения полного и статического давлений плюс датчик ТАТ). Используя эти данные можно определить с высокой степенью точности скорость (V_g) самолета — его скорость относительно земли (путевая скорость), и скорость потока воздуха по отношению к самолету (V_a, истинная воздушная скорость). Вектор ветра (V), соответственно, рассчитывается по навигационному треугольнику:

$$\vec{v} = \vec{v}_{\mathrm{g}} - \vec{v}_{\mathrm{a}} \tag{3.7}$$

Векторы $\vec{v}_g$ и $\vec{v}_a$ должны быть измерены точно, поскольку, как правило, скорости ветров в горизонтальной плоскости невелики (порядка 10 м с$^{-1}$) по сравнению с путевой скоростью воздушного судна и истинной скоростью воздушного потока (200—300 м с$^{-1}$). В ранних версиях систем АМДАР путевая скорость для обеспечения дальней навигации рассчитывалась исключительно по данным от инерциальных навигационных систем без какой-либо поддержки со стороны наземных навигационных средств или ГСОМ. Иногда это могло снизить точность вектора скорости самолета относительно земли и вектора скорости ветра приблизительно на несколько м с$^{-1}$. С появлением современных мультисенсорных навигационных систем ситуация с получением оперативных качественных данных улучшилась (Meteorological Service of Canada, 2003). В то же время для трехмерного решения вектора (уравнение 3.7) необходимо измерять не только углы тангажа, крена и рысканья самолета, но также угла атаки, набегающего на самолет воздушного потока и скольжения (рисунок 3.5). При установившемся горизонтальном полете углы тангажа и атаки невелики и их изменениями можно пренебречь. В бортовой системе коммерческих воздушных судов векторный треугольник скорости ветра рассчитывается только в плоскости X-Y земной системы координат, а углы атаки и бокового скольжения не измеряются.

Потребность во входных данных сокращается до истинной скорости воздушного потока, угла курса и путевой скорости. Угол курса и путевую скорость получают с помощью навигационной системы. Истинная скорость воздушного потока должна рассчитываться по числу Маха и T_s. Компоненты горизонтального ветра (u, v) определяются по формулам:

$$u = u_{\mathrm{g}} - \left|\vec{v}_{\mathrm{a}}\right| \sin\psi \tag{3.8}$$

$$v = v_{\mathrm{g}} - \left|\vec{v}_{\mathrm{a}}\right| \cos\psi \tag{3.9}$$

где $\left|\vec{v}_a\right|$ — величина истинной скорости воздушного потока; Ψ — курс по отношению к направлению на истинный север, позитивный угол по часовой стрелке; и u_g и v_g — компоненты путевой скорости.

3.4.1 Погрешности измерений

Истинная воздушная скорость является функцией числа Маха и T_s (SAT на рисунке 3.1):

$$\left|\vec{v}_{\mathrm{a}}\right| = 38.867 \cdot M \cdot \sqrt{T_{\mathrm{s}}} \tag{3.10}$$

$$\left|\vec{v}_{\mathrm{a}}\right| = 38.867 \cdot M \cdot \sqrt{\frac{T_{\mathrm{r}}}{1 + 0.194 \cdot M^2}} \tag{3.11}$$

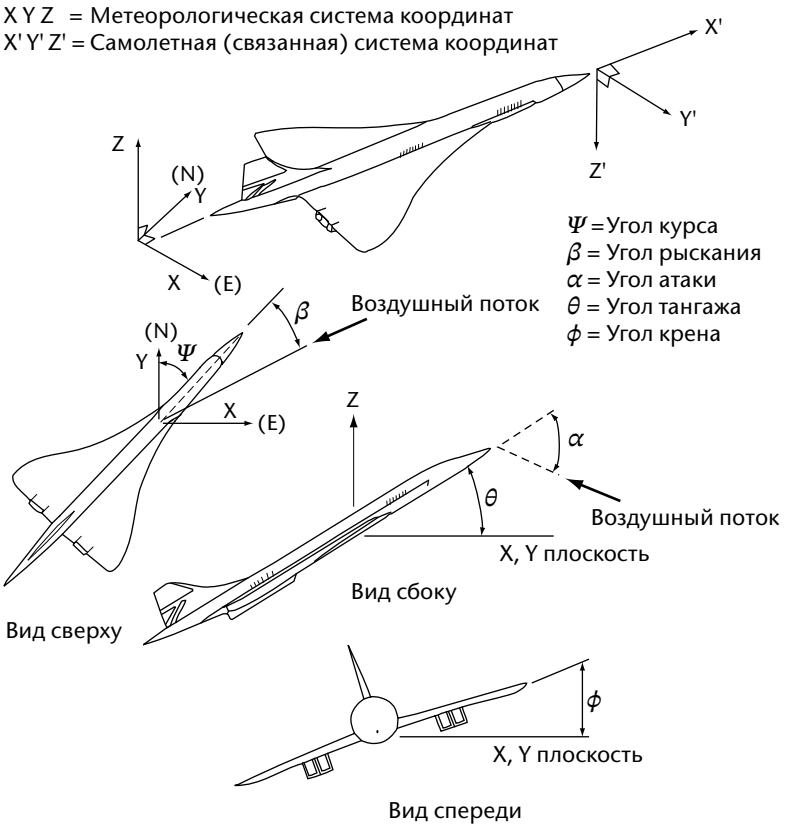


Рисунок 3.5. Углы между воздушным судном и земной системой координат, а также воздушным потоком.

Так как число Маха и T_s, определяются с погрешностями, то суммарная погрешность величины истинной воздушной скорости рассчитывается по формуле:

$$\Delta\left|\vec{v}_{\mathrm{a}}\right| = 38.867 \cdot \Delta M \cdot \sqrt{T_{\mathrm{s}}} + \frac{19.433 \cdot M \cdot \Delta T_{\mathrm{s}}}{\sqrt{T_{\mathrm{s}}}} \qquad (3.12)$$

где $\left|\vec{v}_a\right|$ выражается в единицах узла; T_s, T_r — в единицах K; ΔM — погрешность числа Маха, а ΔT_s — погрешность измерения статической температуры.

Отметим, что из уравнения 3.5 следует, что погрешность определения числа Маха вносит вклад в погрешность измерения давления. Если нет грубых ошибок в измерениях температуры, то погрешность в определении числа Маха может быть самой значительной. Например, при погрешности числа Маха, составляющей 0,2 % на крейсерском эшелоне, погрешность измерения воздушной скорости составит около 0,5 м $с^{-1}$ (1 узел). Таким образом, при нулевой погрешности навигационной системы предполагается, что погрешность определения вектора ветра составит до 0,5 м $с^{-1}$. При этом следует отметить, что грубые ошибки в измерении температуры приведут к грубым погрешностям в определении скорости ветра.

При оценках погрешности определения скорости ветра ошибки измерения истинной воздушной скорости суммируются с погрешностями инерциальной навигационной системы. Оценки погрешности определения скорости ветра проводятся при предположении о полете самолета с нулевыми углами атаки (никаких углов скольжения на крыло) и нулевом крене, а также об идеально точной установке инерциальной платформы. При значительных углах крена погрешность вектора ветра, пропорциональная истинной воздушной скорости, может быть существенно большей. Углы крена в 10°—20° означают, что фактически угол атаки приводит к угловому отклонению истинной воздушной скорости на 2 м $с^{-1}$. Таким образом, данные о ветре обычно исключаются или, по меньшей мере, маркируются в тех случаях, когда угол крена превышает пороговое значение

(обычно 3°—5°). При низких значениях скорости ветра ошибка в определении вектора скорости ветра может привести к значительной погрешности в расчете направления ветра. Таким образом, принимая во внимание наиболее реальные условия полета, суммируя все вышеперечисленные источники погрешностей и учитывая скорость и направление ветра как погрешность вектора, можно предположить, что типовая погрешность определения скорости ветра составит 2—3 м $с^{-1}$ (4—6 узлов). Такие оценки соответствуют имеющемуся оперативному опыту измерений (см., например, Nash (1994)).

3.5 ВЛАЖНОСТЬ

На научно-исследовательских самолетах и эксплуатируемых воздушных судах, совершающих коммерческие рейсы, используются различные принципы работы датчиков для измерения влажности. Диапазон технологий охватывает такие основанные на поглощении или рассеянии методы, как емкостное поглощение, охлаждаемые зеркала и оптические методы. Прибором, который наиболее широко используется для операций в рамках АМДАР, является измерительное средство, основным элементом которого является регулируемый диодный лазер (РДЛ) (May, 1998; Fleming, 2000, 2003), — система зондирования водяного пара (СЗВП-II). Первоначально технология абсорбционной спектроскопии РДЛ была разработана Лабораторией по изучению струйных течений (ЛСТ) НАСА для использования во время полетов в дальний космос, поскольку она обеспечивает высокую точность и исключительную стабильность измерений в течение многих лет. СЗВП-II разработана специально для использования в коммерческой авиации в поддержку АМДАР на основе применения специального метода относительно узкого диапазона абсорбции в инфракрасной области спектра водяного пара. Интенсивность излучения на детекторе связана с испускаемым излучением согласно закону Бера, при котором:

$$I = I_0 \cdot e^{-k\,x\,\rho_w} \tag{3.13}$$

где I — принимаемый сигнал; I_0 — передаваемый сигнал; k — массовый коэффициент ослабления; x — длина пути излучения в рабочем объеме; ρ_w — абсолютная влажность (плотность водяного пара) в зондируемом объеме. I_0, k и x — это известные характеристики системы. Измерения локального давления и температуры позволяет данной системе учитывать плотность сухого воздуха ρ_d.Сканирование поглощения осуществляется в узком диапазоне длин волн при показателе H_2O около 1,37 мкм. Величина абсолютной влажности в выборочном объеме выводится путем использования метода 2f (May and Webster, 1993). В конечном итоге программно-аппаратное обеспечение системы преобразует необработанный сигнал 2f вместе с данными одновременного измерения температуры и давления в соответствующий итоговый параметр, а именно соотношение компонентов смеси водяного пара, m:

$$m = \frac{\rho_w}{\rho_d} \tag{3.14}$$

Сенсорная система является достаточно небольшой для регулируемой установки на коммерческих воздушных судах. За исключением случаев, когда наблюдаются фазовые переходы, параметр m сохраняется в сенсорном датчике при внешнем сдвиге давления и температуры[3]. Полученное значение коэффициента смешивания подходит для предоставления информации без учета данных о значениях локального давления и температуры. Такое представление информации удобно для использования в численных атмосферных моделях, в которых используются данные об удельной влажности, s (которая численно почти неотличима от m) в качестве вводимой переменной. Это имеет простую связь с коэффициентом компонентов смешивания:

$$s = \frac{m}{1+m} \tag{3.15}$$

[3] Следует отметить, что любые изменения применительно к м при фазовых переходах могут сохраняться на неопределенный период, в зависимости от воздушного потока, воздействующего на датчик. Это явление включено в текущие обстоятельные научные исследования по проекту «High Altitude Ice Crystals» (HAIC) в отношении кристаллов льда на больших высотах, которые представляют собой опасность для авиации, осуществляемые основными заинтересованными сторонами в авиационной отрасли.

В случаях, когда воздушным судном осуществляется пролет через облачные частицы или осадки, либо в условиях фактического сверхнасыщения, коэффициент смешивания как параметр измеряемой величины СДВП-II может привести к сообщению об относительной влажности более 100 % или точке росы ($T_d T_d$) на уровне выше температурных значений статических (сухих) условий. Это явление обусловлено одним из следующих факторов:

a) частичным испарением жидких или твердых частиц воды в образце воздушного потока;

b) имеющимся сверхнасыщением, которое вызвано недостатком конденсации или ядром сублимации, как правило в слоях регионов сверхнасыщения над льдом, где формируется устойчивый конденсационный след.

3.5.1 Погрешность измерений

До 2012 г. результатом некоторых оценок климатических камер, а также летных испытаний этой системы спектрометрического измерения влажности являлись две характеристики функционирования приборного оборудования, а именно: при величинах измерений выше пределов обнаружения порядка 4 мг $м^{-3}$ относительная погрешность находится в диапазоне ±10 %. На высоте давления в 200 гПа соответствующий предел обнаружения при данном коэффициенте смешения составляет 0,02 г $кг^{-1}$ (или 30 ppmv). Сравнение этого самолетного метода измерения влажности с современными радиозондами (см., например, Petersen et al. (2011, 2016)), показывает, что данный датчик соответствует требованиям ВМО в отношении всех диапазонов наблюдений удельной влажности и относительной влажности как на этапе набора высоты, так и снижения.

3.6 ТУРБУЛЕНТНОСТЬ

Турбулентность, в особенности турбулентность ясного неба (при отсутствии облачности), представляет собой важное и потенциально опасное явление для авиации. Хотя маршруты регулярных коммерческих полетов составляются так, чтобы избежать турбулентности, воздушные суда неизбежно сталкиваются с неожиданной болтанкой; при этом отклонения от нормального горизонтального полета могут измеряться с помощью приборов, которые установлены на борту самолетов.

3.6.1 Оценка интенсивности турбулентности в результате вертикальной перегрузки

Вертикальная перегрузка (перпендикулярная горизонтальной плоскости самолета, от которой ведется отсчет) измеряется в инерциальной системе отсчета. Данные о перегрузке самолета выражаются и масштабируются в единицах ускорения свободного падения и могут быть подразделены так, как это показано в таблице. Однако интенсивность турбулентности, влияющей на полет самолета, зависит, главным образом, от воздушной скорости, массы самолета, высоты и характера самой турбулентности. В связи с этим передаваемые с борта самолета сведения о турбулентности, рассчитанные по пику перегрузки в соответствии с приблизительными соотношениями, приведенными в представленной ниже таблице, имеют ограничения по использованию, поскольку зависят от типа самолета, так как влияние отдельного порыва ветра на самолет будет различным для разных самолетов.

3.6.1.1 *Погрешности измерения*

Существуют два основных источника погрешности датчиков перегрузки самолета, а именно погрешность определения «нулевого» или эталонного значения перегрузки самолета и погрешность калибровки прибора (измерения). Для большинства самолетов

Пример кодирования масштаба турбулентности, определяемой по пику перегрузки

Категория турбулентности	*Пик перегрузки*[a]	*Код*
Отсутствует	Менее 0,15 g	0
Легкая	От 0,15 g to, до, но не включая, 0,5 g	1
Умеренная	От 0,5 g до 1,0 g	2
Сильная	Более 1,0 g	3

a Измеренные перегрузки самолета представляют собой приращение перегрузки по отношению к ускорению свободного падения (1,0 g) и могут быть как положительными, так и отрицательными.

начальной точкой отсчета перегрузки (нуля перегрузки) номинально является +1,0 g, но это значение может обычно изменяться в пределах 3 %. Эта погрешность может быть практически устранена за счет коррекции датчика, выполняемой при стоянке самолета на земле, в результате чего остаточная погрешность (в том числе погрешность измерения) будет составлять около 3 % от измерения (Sherman, 1985).

3.6.2 Расчетная эффективная скорость вертикального порыва ветра

Другой характеристикой турбулентности является расчетная эффективная скорость вертикального порыва ветра (DEVG), определяемая как мгновенная скорость вертикального порыва ветра, которая в проекции на направление среднего горизонтального ветра создает наблюдаемую перегрузку самолета. Результат воздействия порыва ветра на самолет зависит от его массы и некоторых других характеристик, но они учитываются при расчетах, поэтому эффективная скорость порыва ветра не зависит от типа самолета. Эффективная скорость вертикального порыва ветра рассчитывается по следующей формуле (Sherman, 1985):

$$U_{de} = \frac{Am\Delta n}{V_c} \tag{3.16}$$

где U_{de} — расчетная эффективная скорость порыва ветра; Δn — модуль пика приращения перегрузки воздушного судна от 1,0 g в единицах g; m — общая масса воздушного судна; V_c — индикаторная воздушная скорость в момент пика ускорения; и A — параметр, который зависит от типа самолета и, в незначительной степени, от его массы, высоты полета и числа Маха.

3.6.2.1 *Погрешности измерений*

Была проведена оценка погрешностей по каждому из параметров, определяющих величину U_{de}. При установившемся горизонтальном полете эти погрешности, как правило, составляют не более 3 % для каждого параметра, но в экстремальных условиях могут привести к суммарной погрешности в 10—12 %. Исходя из предположения о случайном распределении ошибок, обычная погрешность будет составлять 3 или 4 % от текущего значения U_{de}. Маневры воздушного судна могут привести к значительным значениям вертикальной перегрузки самолета, и наоборот — активные методы управления самолетом уменьшают перегрузку, вызванную порывами ветра, что приводит к существенному занижению значений вертикальной скорости порывов ветра.

3.6.3 Скорость диссипации турбулентной энергии

Скорость диссипации турбулентной энергии ε — это параметр, который определяет интенсивность турбуленции в газообразной среде в количественном выражении. В контексте турбулентности самолета это стандартная практика обозначения параметра $\varepsilon^{1/3}$ как скорость затухания вихря (EDR). Преимущество EDR заключается в том, что этот параметр является независимой от самолета мерой измерения интенсивности

атмосферной турбулентности. Существует несколько способов оценки EDR (при помощи акселерометра в отличие от энергии ветра), и эта скорость может оцениваться в принципе вдоль любого направления (хотя обычно используется либо направление по вертикали, либо продольное (вдоль трассы)). Существуют также разные спектральные «модели» турбулентности, которые могут быть использованы для любого из алгоритмов:

$$F_v(f) = \frac{9\pi}{55V_t}\alpha\,\varepsilon^{2/3}\,L^{5/3}\,\frac{(1+\frac{32}{3}\pi^2L^2f^2/V_t^2)}{(1+4\pi^2L^2f^2/V_t^2)^{11/6}} \tag{3.17}$$

где уравнение 3.17 — это спектральная модель фон Кармана, где f — частота (Гц); V_t — истинная воздушная скорость воздушного судна (м с$^{-1}$); α — эмпирическая постоянная (в данном случает принимается за 1,6), и L — параметр масштаба длины турбулентности.

$$F_k(f) = \frac{24\pi}{55V_t}\alpha\,\varepsilon^{2/3}\left(2\pi f/V_t\right)^{-5/3} \tag{3.18}$$

где уравнение 3.18 — это спектральная модель Колмогорова, которая представляет собой лишь ограничение высокой частоты (уравнение 3.17). В обеих моделях предпринимается попытка описания формы частотного и энергетического спектра данных о ветре. Модель фон Кармана лучше представляет более крупные масштабы, особенно вертикальной скорости, хотя она является более сложной и включает зависящий от ситуации масштаб длины L в дополнение к EDR (в квадрате). Измерения, проведенные с научно-исследовательских воздушных судов, показали значения L между 300 м и 2 000 м (985 и 6 560 футов). В большинстве применяемых сегодня алгоритмах используются среднее значение, равное 669 м (2 195 футов).

3.6.3.1 *EDR, измеряемая с помощью вертикального акселерометра*

Этот метод, описанный в работе Cornman et al. (1995), основан на параметре перегрузки вертикального ускорения, полученном с помощью инерциальной навигационной системы. Для этого метода используется следующее соотношение (Cornman et al., 1995, equation 21):

$$\varepsilon_w^{1/3} = \frac{\hat{\sigma}_{\ddot{z}}}{\left[0.7V_t^{2/3}I(f_l,f_h)\right]^{1/2}} \tag{3.19}$$

где $\hat{\sigma}_{\ddot{z}}$ — вариация отфильтрованной полосы пропускания нормальной перегрузки; и

I — интеграл отфильтрованной по полосе пропускания передаточной функции воздушного судна H; и:

$$I(f_l,f_h) = \int_{f_l}^{f_h} \left|H_{\ddot{z}w}(f)\right|^2 \hat{S}_w(f)\,df \tag{3.20}$$

где $\hat{S}_w$ — предполагаемая спектральная модель Колмогорова при ε = 1. Модель фон Кармана может быть заменена моделью Колмогорова. В текущем применении f_l (отключение полосы задерживания) и f_h (отключение полосы пропускания) устанавливаются в пределах от 0,1 Гц до 0,8 Гц соответственно. Задачей полосового фильтра является удаление нагрузок, вызванных скорее не турбулентностью, а маневрами воздушного судна и частотными режимами изгибных колебаний крыла.

Интеграл передаточной функции воздушного судна оценивается по целому ряду условий полета и указывается в справочных таблицах, что упрощает и сокращает требования, предъявляемые к бортовым вычислениям. Данный алгоритм рассчитывает текущее среднее квадратическое значение от отфильтрованного сигнала за 10-секундные интервалы времени. При частоте выборок 8 Гц это обеспечивает получение 480 оценок EDR в минуту, на основе которых медиана и 90-й процентиль (обозначаемый как «пиковый») таких оценок используются для передачи информации с борта воздушного судна. Результаты измерений EDR преобразуются в сообщаемые цифровые данные посредством использования таблиц, которые являются гораздо более подробными по сравнению с приведенными в 3.6.1. Более подробная информация по сообщению EDR

представлено в публикации AMDAR Onboard Software Functional Requirements Specification (*Спецификация функциональных требований в отношении бортовых программных средств АМДАР*) (ВМО, 2013).

3.6.3.2 ***EDR, определяемая по вертикальным сдвигам ветра***

Данный метод кратко изложен в работе Cornman et al. (2004). Основная идея заключается в непосредственном расчете вертикальных сдвигов ветра с последующей оценкой EDR на их основе. Этот метод обладает преимуществом, благодаря которому нет необходимости получения передаточной функции воздушного судна, что трудно сделать в силу ее патентного характера.

$$w = V_T \left(\sin \alpha_b \cos \theta \cos \varphi - \cos \alpha_b \sin \theta \right) - \dot{Z} \tag{3.21}$$

Вышеуказанное уравнение используется для расчета вертикальных сдвигов ветра, где α_b — боковая ось угла атаки; θ — угол тангажа; φ — угол крена, а $\dot{Z}$ — инерционная вертикальная скорость. EDR рассчитывается по уравнению:

$$\hat{\varepsilon}^{1/3} = \left[\frac{1}{k_h - k_l + 1} \sum_{k=k_l}^{k_h} \frac{S^w(k)}{\hat{S}_w(k)} \right]^{1/2} \tag{3.22}$$

где k_l и k_h — это предельные значения индекса, соответствующие предельным значениям частоты в 0,5 Гц и 3,5 Гц (соответственно) для текущих применяемых значений 8 Гц; S^w — энергетический спектр w (уравнение 3.21) после обработки временных рядов; и S^w — предполагаемая спектральная модель фон Кармана со значением $\varepsilon = 1$, измененным для учета различных артефактов в S^w, возникающих при обработке сигнала.

Как правило, данный алгоритм рассчитывает EDR ($\varepsilon^{1/3}$) с 10-секундными временными интервалами каждые 5 секунд. Это обеспечивает 12 оценок EDR в минуту, по которым фактическое и пиковое значения этих оценок используются для передачи информации с борта воздушного судна. Средние и пиковые значения EDR, наряду с метриками контроля качества, преобразуются в сообщаемые цифровые данные посредством использования кодирования (см. 5.3.13.5 в публикации ARINC, 2012). Сообщенная точность как среднего, так и пикового значения EDR, составляет 0,02, что значительно выше, чем при применении метода на основе использования акселерометра.

3.6.3.3 ***EDR, рассчитанная по истинной воздушной скорости***

Этот метод аналогичен расчету EDR по вертикальному сдвигу ветра (3.6.3.2), за тем исключением, что спектральные модели несколько иные, а вместо w используется истинная воздушная скорость. Преимущество этого метода заключается в том, что он более прост в применении и требует наличия только одного параметра. Недостатком является то, что он оценивает EDR, главным образом, в направлении вдоль траектории, что оказывает гораздо меньшее воздействие на воздушное судно по сравнению с турбулентностью в вертикальном направлении.

3.6.3.4 ***Погрешности измерений***

Так же, как и метод DEVG, большое количество источников потенциально способствуют неопределенности измерений EDR. Анализ погрешностей показывает, что при расчете DEVG можно предполагать неопределенность порядка 5—10 % в случае применения метода, основанного на использовании акселерометра, для средней и несколько большей пиковой величины. Исходя из результатов модельных расчетов, предполагается аналогичная результативность при использовании других алгоритмов EDR. Еще одно осложнение возникает в связи с необходимостью выбора интервала дискретных измерений и времени усреднения. Анализ типичных временных рядов данных вертикальной нагрузки часто показывает высокую изменчивость статистических

характеристик на коротких интервалах дискретных измерений. Вариация воздушной скорости для отдельного воздушного судна приводит к изменению интервалов между дискретными измерениями.

3.6.3.5 *Соотношение между EDR и DEVG*

Проведены подробные полевые сопоставления (Stickland, 1998) величин EDR и DEVG, полученных с помощью акселерометра. Результаты этих сравнений показали высокую степень корреляции между пиковыми значениями EDR и DEVG для одних и тех же зон турбулентности. Этот результат достаточно очевиден, поскольку значение EDR, полученное при помощи акселерометра, прямо пропорционально стандартному отклонению вертикальной перегрузки на выбранном интервале проведения измерений. Таким образом, при «нормальном» распределении экстремальное значение EDR будет тесно коррелировать с пиковым значением вертикального порыва ветра (пропорционального пиковому значению вертикальной перегрузки). Очевидно, что это соотношение не может быть применимо к единичному событию, выходящему за пределы данного распределения, а отсечение фильтра EDR на 0,8 Гц могло бы совершенно неоправданно сглаживать весьма резкие скачки, соответствующие отдельным порывам ветра. В случае вертикальных сдвигов ветра и использования методов, основанных на истинной воздушной скорости, применяется незначительная фильтрация, и она не имеет существенного отношения к этому последнему вопросу.

3.7 ОБЛЕДЕНЕНИЕ

Несколько типов датчиков могут быть детекторами нарастания льда на несущих поверхностях самолета. В настоящее время для этих целей используются два типа датчиков:

a) тонкопленочный емкостный датчик, размещенный в потоке на специальном аэродинамическом профиле;

b) механический датчик (преобразователь вибрации), выставленный в воздушный поток на несущей поверхности самолета.

3.7.1 Погрешности измерений

Выходным сигналом обоих датчиков является сигнал «наличие/отсутствие льда», и погрешность в этом случае будет определяться количеством ложных сигналов срабатывания датчика. В настоящее время нет данных о количестве ложных сигналов срабатывания этих датчиков.

3.8 СИСТЕМЫ НАБЛЮДЕНИЙ, УСТАНОВЛЕННЫЕ НА БОРТУ СМОЛЕТОВ

В настоящее время существует целый ряд широко используемых оперативных систем наблюдений, установленных на борту воздушных судов. На сегодняшний день АМДАР является основным источником данных наблюдений с самолетов, передаваемых по ВИС; в то же время, значительный вклад вносят данные наблюдений, получаемые с помощью других систем наблюдений, установленных на воздушных судах, и ожидается, что в будущем они будут предоставлять все бóльшие объемы данных.

Уже разработан или разрабатывается ряд систем, аналогичных системе АМДАР, которые позволят расширить глобальный охват и увеличить количество наблюдений в приземном пограничном слое и в нижней тропосфере. Определенный акцент делается на использование небольших региональных самолетов и воздушных судов авиации общего

назначения в целях установки на них либо стандартных систем АМДАР, либо специальных датчиков и коммуникационных систем. Эти воздушные суда совершают полеты из небольших аэропортов, которые обычно не охватываются самолетами, передающими сводки АМДАР, тех авиакомпаний, которые участвуют в национальных и региональных программах АМДАР.

3.8.1 Система передачи метеорологических данных с воздушного судна

Система наблюдений АМДАР должна эксплуатироваться в соответствии с техническими требованиями и стандартами ВМО (WMO, 2013). В настоящее время работа АМДАР основана на использовании Системы связи воздушных судов для адресации и передачи сообщений (ACARS) и почти полностью зависит от этой системы. Системы АМДАР передают данные по заданному профилю полета (набор высоты/снижение), а также во время горизонтального полета на крейсерской высоте.

Дополнительную информацию о нормативных требованиях в отношении установки и использования программы АМДАР и предоставления других данных наблюдений с борта воздушного судна см. *Наставление по Интегрированной глобальной системе наблюдений ВМО*, (ВМО, 2015).

Текущую информацию по оперативным программам АМДАР и дополнительный справочный и руководящий материал можно найти на веб-сайте АМДАР ВМО: https://public.wmo.int/en/programmes/global-observing-system/amdar-observing-system.

3.8.2 Передача тропосферных метеорологических данных с самолетов

3.8.2.1 *Обзор*

Передача тропосферных метеорологических данных с самолетов (ТАМДАР) — это разработанная, развернутая и эксплуатируемая в коммерческих целях система, которая производит метеорологические данные, в основном, с независимого от самолета измерительного и коммуникационного датчика. В отличие от системы наблюдений АМДАР ВМО, в системе ТАМДАР главное внимание уделяется оснащению самолетов, в первую очередь, региональных авиатранспортных компаний, поскольку их полеты осуществляются, как правило: (b) в более отдаленные и разнообразные места; и (a) являются менее длительными, благодаря чему получают большее количество суточных вертикальных профилей и обеспечивается возможность оставаться в пограничном слое в течение более длительных периодов времени. Хотя ТАМДАР является полностью функциональной и регулярно эксплуатируется на высоте более 12 192 м (40 000 футов), воздушные суда, на которых, как правило, устанавливается этот датчик, во многих случаях летают на крейсерском режиме на высоте ниже 7 620 м (25 000 футов).

ТАМДАР осуществляет сбор данных измерений относительной влажности (ОВ), давления, температуры, воздушных потоков, обледенения и турбулентности, наряду с данными о соответствующем местоположении, времени и геометрической высоте, сообщаемое встроенной системой ГСОМ. Эти данные передаются через спутник в режиме реального времени в наземный сетевой оперативный центр, где в процессе обработки данных осуществляется контроль качества до их распространения. Общее качество данных по влажности и температуре аналогично качеству данных радиозондов (Gao et al., 2012). Данные наблюдений за ветром рассчитываются аналогично типовому методу получения данных о воздушных потоках АМДАР, при этом используется курс, истинная воздушная скорость воздушного судна и вектор наземной трассы, который сообщается внутренним блоком ГСОМ.

Датчик ТАМДАР проводит дискретные измерения в основанном на давлении интервале во время набора и снижения высоты и в определяемом временем интервале в крейсерском режиме, который также меняется с высотой с 3 мин на более низких высотах до 7 мин на бóльших высотах. В настоящее время в режиме набора и снижения высоты датчик

сообщает данные через каждые 10 гПа, однако это может быть скорректировано дистанционно в режиме реального времени в сторону уменьшения до 1 гПа , ~10 м (~30 футов), в зависимости от скорости взлета и посадки. В течение полета в крейсерском режиме, если обнаруживается обледенение, то датчик направляет отдельное сообщение, и, таким образом, во время полета через условия обледенения будет получено гораздо больше данных наблюдений, нежели во время полетов в крейсерском режиме при безоблачном небе.

3.8.2.2 ***Относительная влажность и температура***

Для обеспечения избыточности данных при измерении ОВ ТАМДАР использует два емкостных сенсорных устройства[4]. Фундаментальным физическим параметром, который сообщается посредством технологии емкостного датчика ТАМДАР, является плотность молекул H_2O. ОВ — это производный параметр, который учитывает температуру и давление. В эти устройства был добавлен отдельный фильтр, снабженный гидрофобной мембраной и который значительно повышает надежность и точность измерения благодаря предотвращению прямого смачивания сенсорного элемента (см. Mulally and Braid, 2009).

Сообщаемая величина ОВ — это величина, представляющая собой согласованное значение на основе принципа «консенсус» между двумя устройствами, которое определяется алгоритмом в наземной системе обработки данных, описанном в работе Anderson (2006). Эта система учитывает данную величину и качество показаний каждого датчика. Как правило, если оба датчика сообщают одинаковые величины, то консенсусной величиной является просто среднее значения обеих. Если разночтения показаний датчиков превышают более 5 % и данные одного из них признаются ошибочными с использованием методов, описанных в Anderson (2006) и Gao et al. (2012), то в таком случае величина, сообщаемая сбоившим датчиком, маркируется и не используется при расчете среднего значения ОВ.

В сообщаемые датчиком данные о фактических значениях ОВ должны вноситься определенные поправки. Внесение первичных поправок обуславливается нагревом в числах Маха, а также разницей в давлении воздуха между условиями окружающей среды и условиями, измеряемыми датчиком. ОВ для частиц воздуха с заданной концентрацией водяного пара является функцией как температуры, так и давления. Существуют четыре основных фактора, которые способствуют внесению погрешности в измерение фактической ОВ, осуществляемое в ТАМДАР:

a) погрешность измерения самого датчика ОВ (ΔRH);

b) погрешность измерения температуры датчиком ТАМДАР (T_{probe}) посредством термометра с платиновым сопротивлением;

c) погрешность измерения рассчитываемой статической температуры воздуха (T_{static});

d) погрешность измерения отношения статического давления (P_{static}) к расчетному значению давления датчика ОВ (P_{probe}).

Базовый расчет, необходимый для определения статической ОВ, описывается следующим уравнением:

$$\text{RH}_{\text{static}} = \text{RH}_{\text{probe}} \left(\frac{P_{\text{static}}}{P_{\text{probe}}} \right) \cdot \left(\frac{e_{s_{\text{probe}}} \left(T_{\text{probe}} \right)}{e_{s_{\text{static}}} \left(T_{\text{static}} \right)} \right) \tag{3.23}$$

где $\text{RH}_{\text{static}}$ — это атмосферная ОВ; RH_{probe} — фактическое измерение ОВ чувствительным элементом ОВ в датчике ТАМДАР; P_{static} — статическое давление воздуха; P_{probe} — давление

[4] Текущая коммерческая версия ТАМДАР обладает двумя устройствами, а новый индустриальный прототип иеет три. На март 2018 года прототип был внедрен лишь на ТАМДАР в версии с беспилотной автоматизированной системой (БАС) и пока не сделан доступным для версии коммерческих воздушных судов.

воздуха в чувствительном элементе ОВ в датчике; T_{probe} — температура в полости чувствительного элемента датчика; T_{static} — статическая температура воздуха; $e_{s,probe}$ — давление насыщенного пара относительно воды; и $e_{s,static}$ — статическое давление насыщенного пара относительно воды. Как показано выше, коэффициент давления насыщенного пара является прямой функцией T_{probe} и T_{static}. Расчетное значение коэффициента давления (P_{static}/P_{probe}) было получено по результатам большого объема исследований в аэродинамической трубе (см. Braid et al., 2011; Smith et al., 2012).

Соотношение между T_{probe} (в основном извлеченная температура) и T_{static} выражается уравнением:

$$T_{probe} = T_{static}(1 + \lambda \cdot M^2) \tag{3.24}$$

где M — число Маха, а λ — постоянная величина, приблизительно равная 0,17. Фактической величиной измерения чувствительным элементом ОВ является истинное значение плюс погрешность чувствительного элемента, ΔRH, и таким образом:

$$RH_{probe} = RH_{true} + \Delta RH \tag{3.25}$$

При использовании метода определения ОВ замена уравнения 3.25 уравнением 3.23 свидетельствует о наличии вопроса, который необходимо рассмотреть. По мере увеличения числа Маха и уменьшения температуры происходит быстрое повышение коэффициента давления насыщения ($e_{s,probe}/e_{s,static}$) в уравнении 3.23 и, как результат, усиливается эффект неопределенности чувствительного элемента ΔRH. Наземная система обработки данных проводит оценку ошибки в определении ОВ на основе температуры и числа Маха. Эти данные используются наряду с известной точностью показаний датчика ОВ и точных показателей температуры для расчета общей погрешности определения ОВ, которое сообщается наряду с данными ОВ.

Диапазон параметров ОВ, который будет воздействовать на чувствительный элемент датчика ОВ, также уменьшается в результате нагрева, обусловленного числом Маха. На высоких скоростях параметры ОВ, определяемые внутренними характеристиками датчика, будут, как правило, меньше на 10 % в результате нагрева воздуха, в зависимости от числа Маха. Этот эффект учитывается в ТАМДАР посредством процесса калибровки. Каждый датчик ОВ характеризуется рядом нескольких параметров ОВ и температуры. Значения параметров специально отбираются при таких условиях, которые характеризуются возможностью ошибки, в частности условиями холодной и сухой погоды. Результатом этого процесса калибровки является возможность измерения ОВ, что является полезным даже на значительных высотах. Следует упомянуть о том, что значимым с практической точки зрения является один из эффектов нагревания вследствие числа Маха. Поскольку реагирование емкостного чувствительного элемента ухудшается по мере снижения температуры благодаря нагреву, обусловленному числом Маха, температура чувствительного элемента датчика ОВ сохраняется на более высоком уровне по сравнению с окружающей средой, в результате чего скорость реагирования является более быстрой, нежели в иных условиях.

3.8.2.3 ***Обнаружение обледенения системой ТАМДАР***

Датчик системы ТАМДАР обнаруживает обледенение, используя две пары светодиодов (LED) и фотодетекторов (PD), при этом каждый из них характеризуется конечной величиной аналого-цифрового преобразования (AtDC) напряжения. В тех случаях, когда датчик ТАМДАР подвергается воздействию условий обледенения, аккумуляция льда происходит на поверхности промежутков фольги в зоне, находящейся между парами LED/PD. По мере увеличения слоя нарастающего льда происходит затемнение инфракрасных лучей, в результате чего значения AtDC пар LED/PD снижаются на половину от нормального незаблокированного значения, в результате чего датчик ТАМДАР показывает позитивные параметры обледенения. Сразу, после подтверждения обнаружения появления льда посредством алгоритмов, которые проверяют согласованность данного события с текущими условиями окружающей среды

(а именно, T), происходит автоматическое включение обогревателей датчика ТАМДАР для устранения льда. Процесс обогревания продолжается до тех пор, пока показатели AtDC пар LED/PD не превысят половину порогового значения.

Все явления обледенения, фиксируемые системой ТАМДАР, отслеживаются в рамках потока данных с использованием маркеров обледенения. Эти маркеры помечают начало возникновения события обледенения; момент времени, когда были включены обогреватели; продолжительность продолжения обледенения; охлаждение датчика и указание момента времени прекращения процесса обледенения. Включение обогревателей антиобледенения воздействует на измерение температуры, что сказывается на других областях данных, таких как OB. В связи с этим значки обледенения используются для обозначения того, что области данных, на которые воздействуют обогреватели, неактуальны, пока не отключатся обогреватели и не остынет датчик.

3.8.2.4 *Обнаружение турбулентности системой ТАМДАР*

Данные о турбулентности сообщаются в виде данных о скорости диссипации турбулентной энергии, и они основываются на дискретных измерениях истинной воздушной скорости (TAS), которые вычисляются по показаниям приемника ТАМДАР для замера полного и статического давления воздушного давления, а также температуры. Сводка включает средние и пиковые значения EDR, а также момент времени пикового значения за каждый одноминутный период. Алгоритм турбулентности EDR не зависит от конфигурации и условий полета воздушного судна. Таким образом, он не зависит от типа воздушного судна, а также не зависит от нагрузки и полетных характеристик.

Для расчета EDR методология ТАМДАР использует оценку продольного сдвига ветра через параметр TAS. ТАМДАР может получить TAS через два источника: (a) ТАМДАР может рассчитать TAS по данным измерений датчиком полного и статического давлений (трубка Пито), либо (b) по базе данных ARINC 429. После проведения данной системой измерения разности между полным и статическим давлениями данные этого измерения передаются затем через фильтр до проведения расчета TAS.

Метод Мак-Креди используется для оценки EDR, основанной на предполагаемом коэффициенте наклона спектра мощности величиной –5/3 из модели Колмогорова сигнала TAS. Для фильтрации дифференциального датчика давления применяется низкочастотный заграждающий фильтр Баттерворта четвертого порядка с частотой среза по уровню 3 децибела (дБ), равной 5 Гц. Управление окнами завершается до быстрого преобразования Фурье (БПФ), с тем чтобы сделать данное изменение более спектральным (64-точечное БПФ). EDR рассчитывается каждые 3 с, используя 6-секундный блок данных TAS при частоте 10,67 Гц. Величины EDR могут усредняться, если желательной является получение более гладкого результата; обычно используется 6-секундное усреднение, однако пользователи имеют возможность конфигурировать это усреднение для удовлетворения их потребностей. Применяется также фильтр, обеспечивающий гарантию качества.

3.9 ДРУГИЕ СИСТЕМЫ И ИСТОЧНИКИ САМОЛЕТНЫХ НАБЛЮДЕНИЙ

3.9.1 Система автоматического зависимого наблюдения ИКАО

Разработка глобальных систем аэронавигации тесно связана с разработками в области коммуникационных систем. Таким образом, будущая аэронавигационная система (ФАНС) сочетается с разработкой системы автоматического зависимого наблюдения (ADS), которая, в свою очередь, связана с глобальной спутниковой системой связи воздушных судов. Глобальная система связи воздушных судов трансформируется в открытую сеть в рамках проекта по авиационной сети телесвязи (Wells et al., 1990). Эта сеть свяжет системы ОВЧ и САТКОМ в единую открытую сеть.

Для оптимальной по погодным условиям прокладки маршрутов коммерческих воздушных судов, в особенности для обеспечения безопасности полетов, сведения к минимуму расхода топлива и нагрузки, приводящей к усталости силового набора фюзеляжа, а также для обеспечения комфортных условий для пассажиров, требуется повышенная точность авиационных метеорологических прогнозов. Таким образом, в автоматические сводки о местоположении воздушного судна для обеспечения ADS могут быть включены автоматические метеорологические сводки. Данные, которые должны включаться в эти сводки, — это в основном те же данные, что и данные существующих систем АМДАР, включая данные о допустимой турбулентности и влажности воздуха.

Данные, полученные из системы ADS Contract (ADS-C) ИКАО, передаются в ГСТ ВМО. Эти данные представляются согласно соглашению, заключенному с ИКАО и изложенному в Приложении 3 ИКАО к Конвенции о международной гражданской авиации — *Метеорологическое обеспечение международной аэронавигации*, глава 5 и приложение 4. Регламентом ИКАО предусматривается, что центры организации воздушного движения должны передавать сообщения ADS-C во всемирные центры зональных прогнозов (ВЦЗП), которые затем отвечают за передачу этих данных по Глобальной системе телесвязи ВМО (см. *Правила аэронавигационного обслуживания — Организация воздушного движения*, ИКАО, Doc. 4444, 4.11.4).

3.9.2 Автоматические системы передачи полетной информации

Автоматические системы передачи полетной информации (АФИРС), как и ТАМДАР, представляют собой коммерческую разработку, систему, которая устанавливается на воздушном судне для получения и передачи данных воздушного судна на землю и использованием спутниковой коммуникации на базе группировки спутников Iridium (CATKOM).

Возможности АФИРС включают обеспечение бортового интерфейса, что позволяет связывать многочисленные системы воздушных судов. Это включает регистрацию полетных данных, активизируемую явлением, а также мониторинг состояния воздушного судна в режиме реального времени. С использованием этих систем АФИРС может собирать данные о погоде и форматировать их в «отчет после полета», используя встроенное логическое приложение.

АФИРС собирает данные измерений температуры, направления и скорости ветра, а также угол качения в дополнение к местоположению, времени и барометрической высоте воздушного судна в момент производства измерения. Поскольку данные АФИРС собираются с имеющихся бортовых датчиков, данные будут соответствовать данным, которые собираются при помощи методов АМДАР.

В отличие от АМДАР, где сообщения о погоде передаются через посредство АКАРС, сообщения АФИРС передаются в виде файлов формата разделяемых запятой величин (csv) и направляются партнерской национальной метеорологической и гидрологической службе (НМГС) при помощи протокола передачи файлов (FTP).

3.9.3 Новые и разрабатываемые системы

3.9.3.1 *Режим расширенного наблюдения — адресный*

Данные наблюдений за ветром и температурой могут также быть получены по данным наблюдений, собранным для целей управления воздушным движением (УВД) с использованием радиолокатора расширенного наблюдения (EHS) в режиме S (адресные). Этот радиолокатор запрашивает у каждого воздушного судна конкретную информацию с частотным циклом 4—20 с, в зависимости от задач УВД конкретного радиолокатора. В назначенном воздушном пространстве все воздушные суда обязаны отвечать на запрос радиолокатора EHS, работающего в режиме S. Обязательные регистры (BDS4,0, BDS5,0 и BDS6,0) содержат информацию об идентичности воздушного судна, эшелоне полета,

угле крена, магнитном курсе, воздушной скорости, числе Маха и траектории. Данные о местоположении воздушного судна можно получить либо при помощи радиолокатора УВД или из данных автоматического зависимого наблюдения в режиме радиовещания (ADS-B), которые непрерывно передаются этим воздушным судном.

Получение данных о сдвиге ветра при помощи EHS в режиме S аналогично АМДАР, за тем исключением, что истинный курс должен определяться по магнитному курсу. Помимо применения таблицы магнитных отклонений необходимо применять дополнительные корректировки, зависящие от воздушного судна. Корректировки курса могут со временем меняться в результате технического состояния воздушного судна. В настоящее время эти корректировки определяются для каждого воздушного судна путем сравнения с данными численного прогноза погоды (ЧПП). Помимо корректировки курса, также применяется корректировка воздушной скорости, основанная на долгосрочном сравнении с данными ЧПП (см. de Haan, 2013). После корректировок и контроля качества производная информация о сдвиге ветра аналогична по своему качеству данным АМДАР (de Haan, 2011, 2013). Получение данные о температуре по данным EHS в режиме S осуществляется путем комбинации числа Маха и воздушной скорости. Качество данных о производной температуре понижается сообщаемым разрешением числа Маха и воздушной скорости, и оно, безусловно, ниже качества данных о температуре АМДАР (de Haan, 2011, 2013).

Другие метеорологические параметры активно изучаются, включая информацию о геопотенциальной высоте по данным барометрической высоты и информацию о высоте ГНСС, которые могут интерпретироваться как температуре среднего слоя (Stone and Kitchen, 2015).

3.9.3.2 *Режим регулярной метеорологической сводки с борта воздушного судна*

Радиолокатор EHS в режиме S может также запрашивать необязательные регистры, которые могут содержать метеорологическую информацию. Примером является регистр BDS4,4 EHS режима S, который называется «регулярная метеорологическая сводка с борта воздушного судна (MRAR)». Этот регистр содержит непосредственную информацию о сдвиге ветра и температуре, которая весьма близка к информации о сдвиге ветра и температуре АМДАР (Stranjar, 2012). Поскольку регистр BDS4,4 не является обязательным, то лишь часть (примерно 5 %) воздушных судов отвечают на запрос и сообщают ценную метеорологическую информацию.

Оба метода, ADS и Mode S, проанализированы в рамках исследования, которое было проведено от лица ЕВМЕТНЕТ (de Haan, 2015).

3.9.3.3 *Беспилотные летательные аппараты*

За последние несколько лет стремительное развитие беспилотных летательных аппаратов (БЛА) и множества видов их использования различными организациями привело к включению БЛА в стратегическое планирование ОрВД руководящими органами, такими как исследования ОрВД в рамках концепции «Единого европейского неба», Федеральное управление гражданской авиации и ИКАО.

Параллельно с этими явлениями в области БЛА отмечалось расширение использования БЛА для целей научных исследований и разработок рядом НМГС и государственных органов. Научные исследования включают пограничные слои, происхождение штормов и мониторинг окружающей среды.

Следующим шагом в использовании БЛА в качестве платформ для сообщения о погоде на борту воздушных судов является разработка дальнейших видов научно-исследовательской деятельности и внедрение инфраструктуры передачи данных «в режиме реального времени с оперативной деятельностью НМГС с БЛА, а также предложение частому сектору создавать возможности для установки метеорологических датчиков/бортового оборудования в рамках их оперативной деятельности с БЛА.

Доступные датчики для БЛА включают температуру, направление и скорость ветра, а в некоторых случаях влажность. Эти датчики могут устанавливаться как часть оперативного бортового оборудования БЛА и предоставлять ценную информацию о пограничном слое.

СПРАВОЧНАЯ И ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ЛИТЕРАТУРА

Всемирная метеорологическая организация, 2011 (обновлено в 2017 г.): *Наставление по кодам* (ВМО-№ 306). Женева.

———, 2015 (обновлено в 2017 г.): *Наставление по Интегрированной глобальной системе наблюдений ВМО* (ВМО-№ 1160). Женева.

Abbott, I.H. and A.E. von Doenhoff, 1959: *Theory of Wing Sections*. Dover Publications, Inc., Mineola, New York, 693 pp.

AirDat, 2003: *TAMDAR – Tropospheric Airborne Meteorological Data Reporting Sensor and System Overview; AirDat Infrastructure and Global Capabilities*. Information document, AirDat LLC, Evergreen, Colorado.

Anderson, A.K., 2006: *AirDat system for ensuring TAMDAR data quality*. Tenth Symposium on Integrated Observing and Assimilation Systems for the Atmosphere, Oceans, and Land Surface (IOAS-AOLS), American Meteorological Society, Atlanta, GA.

ARINC, 2012: *620-7 Data Link Ground System Standard and Interface Specification*. Aeronautical Radio, Inc., Annapolis, Maryland.

Benjamin, S.G., B.D. Jamison, W.R. Moninger, S.R. Sahm, B.E. Schwartz and T.W. Schlatter, 2010: Relative short-range forecast impact from aircraft, profiler, radiosonde, VAD, GPS-PW, METAR, and Mesonet observations via the RUC hourly assimilation cycle. *Monthly Weather Review*, 138:1319–1343.

Braid, J., P. Van Wie and J. Rex, 2011: Using the TAMDAR sensor for in-flight ice detection and improved safety of flight. *SAE Technical Paper 2011-38-0051*, International Conference on Aircraft and Engine Icing and Ground Deicing, Society of Automotive Engineers.

Cornman, L.B., G. Meymaris and M. Limber, 2004: *An update on the FAA Aviation Weather Research Program's in situ turbulence measurement and reporting system*. Eleventh Conference on Aviation, Range and Aerospace Meteorology, Hyannis, MA.

Cornman, L.B., C.S. Morse and G. Cunning, 1995: Real-time estimation of atmospheric turbulence severity from in situ aircraft measurements. *Journal of Aircraft*, 32(1):171–177.

Dommasch, D.O., S.S. Sherby and T.F. Connolly, 1958: *Airplane Aerodynamics.* New York, Pitman, 560 pp.

Federal Aviation Administration: Unmanned Aircraft Systems. https://www.faa.gov/uas/.

Fleming, R.J., 2000: Water vapor measurements from commercial aircraft: Progress and plans. *Preprints*. Fourth Symposium on Integrated Observing Systems, Long Beach, CA, American Meteorological Society, 30–33.

———, 2003: The WVSS-II and the UCAR air sampler: Purpose, design, status (personal communication). University Corporation for Atmospheric Research, Boulder, Colorado.

Gao, F., X.Y. Zhang, N.A. Jacobs, X.-Y. Huang, X. Zhang and P.P. Childs, 2012: Estimation of TAMDAR observational error and assimilation experiments. *Weather and Forecasting*, 27:856–877.

Haan, S. de, 2011: High-resolution wind and temperature observations from aircraft tracked by Mode-S air traffic control radar. *Journal of Geophysical Research*, 116(D10111).

———, 2013: *An Improved Correction Method for High Quality Wind and Temperature Observations Derived from Mode-S EHS*. KNMI Technical Report No. TR-338, De Bilt.

Haan, S. de, J. Sondij, E. Stone, F. Besson, B. Strajnar, D. Lockett, S. Stringer, H. Vedel, J.A. Garcia-Moya Zapata and A. Hoff, 2015: *EUMETNET Aircraft Derived Data Feasibility Study Expert Team.* GIE EUMETNET.

International Civil Aviation Organization, 2007: *Procedures for Air Navigation Services – Air Traffic Management*. Fifteenth edition, Doc 4444, Montreal.

———, 2013: *Meteorological Service for International Air Navigation*. ICAO Annex 3, Eighteenth edition, Amendment 76, Montreal.

———: UAS Tool Kit. https://www.icao.int/safety/UA/UASToolkit/Pages/default.aspx.

International Organization for Standardization (ISO), 2007: *Standard Atmosphere*, ISO 2533:1975 (with two additions in 1985 and 1997, reviewed and confirmed in 2007). Geneva.

Lawson, R.P. and W.A. Cooper, 1990: Performance of some airborne thermometers in clouds. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 7:480–494.

May, R.D., 1998: Open-path, near-infrared tuneable diode laser spectrometer for atmospheric measurements of H_2O. *Journal of Geophysical Research*, 103:19161–19172.

May, R.D. and C.R. Webster, 1993: Data processing and calibration for tuneable diode laser harmonic absorption spectrometers. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 49(4):335–347.

Meteorological Service of Canada, 2003: *The Effect of Pitch and Roll Attitude on the Calculation of Wind* (G. Bruce). Aeromechanical Services Ltd., 1118-1c, Rev. 1.0.

Moninger, W.R., S.G. Benjamin, B.D. Jamison, T.W. Schlatter, T.L. Smith and E.J. Szoke, 2010: Evaluation of regional aircraft observations using TAMDAR. *Weather and Forecasting*, 25:627–645.

Mulally, D.J. and J.T. Braid, 2009: *The TAMDAR Sensor's Relative Humidity Performance on ERJ-145 Commercial Aircraft*. Thirteenth Symposium on Integrated Observing and Assimilation Systems for the Atmosphere, Oceans, and Land Surface (IOAS-AOLS), American Meteorological Society, Phoenix, AZ.

Nash, J., 1994: Upper wind observing systems used for meteorological operations. *Annales Geophysicae*, 12:691–710.

Petersen, R.A., L. Cronce, W. Feltz, E. Olson and D. Helms, 2011: *Validation Studies of WVSS-II Moisture Observations*. Fifteenth Symposium on Integrated Observing and Assimilation Systems for the Atmosphere, Oceans, and Land Surface (IOAS-AOLS), American Meteorological Society, Seattle, WA.

Petersen, R.A., L. Cronce, R. Mamrosh, R. Baker and P. Pauley, 2016: On the impact and future benefits of AMDAR observations in operational forecasting. Part II: Water vapour observations. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 97(11):2117–2133.

Rodi, A.R. and P.A. Spyer-Duran, 1972: Analysis of time response of airborne temperature sensors. *Journal of Applied Meteorology*, 11:554–556.

Sherman, D.J., 1985: *The Australian Implementation of AMDAR/ACARS and the Use of Derived Equivalent Gust Velocity as a Turbulence Indicator*. Structures Report No. 418, Department of Defence, Defence Science and Technology Organization, Aeronautical Research Laboratories, Melbourne, Victoria.

Smith, W.L., P. Minnis, C. Fleeger, D. Spangenberg, R. Palikonda and L. Nguyen, 2012: Determining the flight icing threat to aircraft with single-layer cloud parameters derived from operational satellite data. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 51:1794–1810.

Stickland, J.J., 1998: *An* Assessment *of Two Algorithms for Automatic Measurement and Reporting of Turbulence from Commercial Public Transport Aircraft*. A report to the ICAO METLINK Study Group. Observations and Engineering Branch, Bureau of Meteorology, Melbourne.

Stickney, T.M., M.W. Shedlov, D.I. Thompson, 1990: *Rosemount Total Temperature Sensors*. Technical Report 5755, Revision B, Rosemount Inc.

Stone, E.K. and M. Kitchen, 2015: Introducing an approach for extracting temperature from aircraft GNSS and pressure altitude reports in ADS-B messages. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 32(4):736–743.

Strajnar, B., 2012: Validation of Mode-S Meteorological Routine Air Report aircraft observations. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 117(D23).

Wells, V.E. et al., 1990: Migration of ACARS to the Aeronautical Telecommunication Network. *Proceedings of the Aeronautical Telecommunications Symposium on Data Link Integration*. Annapolis, Maryland.

World Meteorological Organization, 2013: *AMDAR Onboard Software Functional Requirements Specification*. Instruments and Observing Methods Report No. 114. Geneva.

———, 2017: *Guide to Aircraft-based Observations* (WMO-No. 1200). Geneva.

ГЛАВА 4. МОРСКИЕ НАБЛЮДЕНИЯ

4.1 ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

Морские наблюдения в самом широком смысле этого понятия охватывают любые метеорологические и связанные с ними наблюдения за окружающей средой на границе между атмосферой и морской поверхностью, ниже поверхности моря и в атмосфере над поверхностью моря. Наблюдения могут проводиться с использованием стационарных или подвижных платформ, *in situ* или дистанционно, с использованием наземных и спутниковых методов. Измерения *in situ* в основном представляют собой наблюдения в одном пункте, который предполагается репрезентативным для окружающего морского района, как это делается в синоптической метеорологии. Методы дистанционного зондирования обеспечивают охват большого района или объемное представление, что особенно подходит для наблюдений за морским льдом.

В настоящей главе рассматриваются наблюдения на границе между воздушной средой и морской поверхностью, проводимые *in situ*, которые включают обычные приземные параметры, которые также измеряются над поверхностью суши и в этом контексте рассматриваются в томе I настоящего Руководства. В этой главе рассматриваются и другие виды наблюдений, имеющие важное значение для физики моря и физической океанографии, включая температуру поверхности моря (ТПМ), океанические волнения, морской лед, айсберги и обледенение, а также соленость. Аэрологические измерения проводятся методами, которые по сути являются одинаковыми для измерений над поверхностью моря и над поверхностью суши.

Подробные официальные требования к наблюдениям с морских станций приводятся в *Наставлении по Интегрированной глобальной системе наблюдений ВМО* (ВМО-№ 1160). Рекомендации в отношении требований и процедур содержатся в *Руководстве по морскому метеорологическому обслуживанию* (ВМО-№ 471). Морские измерения *in situ* или наблюдения проводятся с самых разных платформ. К ним относятся суда, нанятые Членами ВМО для участия в схеме судов, добровольно проводящих наблюдения (СДН); плавучие маяки; заякоренные буи; дрейфующие буи; вышки; нефтяные и газовые платформы и буровые установки; островные автоматические метеорологические станции (АМС) и установленные на судах системы АМС. Таким образом, суда, задействованные в схеме СДН, используя как автоматизированные, так и неавтоматизированные методы наблюдения, сообщают весь спектр данных наблюдений, необходимых для синоптической метеорологии. В отличие от этого заякоренные буи предоставляют лишь данные автоматизированных наблюдений, однако по широкому спектру переменных, который может включать: давление атмосферного воздуха над поверхностью, температура и влажность воздуха, скорость и направление ветра, высота и период волн, а также ТПМ. Большинство дрейфующих буев сообщают данные трех параметров, а именно местоположение, атмосферное давление на поверхности моря и ТПМ. Меньшая часть измеряет соленость поверхности моря, направленные волновой спектр, подповерхностные температуры в смешанной толще, а также скорость и направление ветра.

Данные этих наблюдений чаще всего компилируются и передаются на берег в согласованном на национальном и международном уровне формате передачи данных с судна на берег, а затем распространяются на международном уровне в соответствующем коде ВМО (например, FM 94 BUFR). Коды ВМО представлены в *Наставлении по кодам* (ВМО-№ 306), том I.1 и том I.2; общая информация содержится в томе I.2, часть B, а образцы кодов для конкретных видов морских наблюдений прописаны

в томе I.2, часть C[1]. Дополнительную информацию можно найти в трудах совещания 2009 г., посвященного системе океанических наблюдений (Hall et al., 2010), включая информацию о СДН (Kent et al., 2010), исследовательских судах (Smith et al., 2010), океанографических наблюдениях с судов (Goni et al., 2010), ныряющих буях (Freeland et al., 2010), буях (Meldrum et al., 2010; McPhaden et al., 2010; Send et al., 2010; Dohan et al., 2010; Keeley et al., 2010), а также волнении и уровне моря (Swail et al., 2010*a*; Swail et al., 2010*b*; Merrifield et al., 2010).

По рекомендации Совместной технической комиссии ВМО/Межправительственной океанографической комиссии (МОК) (СКОММ) была создана сеть региональных центров морских приборов (РЦМП) ВМО/МОК для содействия стандартизации данных наблюдений, обработанной продукции наблюдений, а также для повышения уровня стандартов для приборов и методов наблюдений. Эти РЦМП обеспечивают возможности для: (a) калибровки и технического обслуживания морских приборов и мониторинга работы приборов; и (b) оказания помощи во взаимных сравнениях приборов, а также для надлежащей подготовки кадров в дополнение к тому, что уже предоставляется производителями. Их круг обязанностей и местоположения приводятся в приложении 4.A.

Совместный Международный форум ВМО/МОК пользователей данных спутниковой связи, известный как Форум Сатком[2], представляет собой международный орган, предоставляющий четкую информацию о спутниковой связи оперативным и научным пользователям и поддерживающий связи с индустрией, с тем чтобы продвигать надлежащие новые технические характеристики, соответствующие структуры ценообразования и требования к удаленной передаче данных для автоматических систем наблюдений за окружающей средой, которые координируются через посредство ВМО и МОК и организаций-партнеров.

4.2 НАБЛЮДЕНИЯ С СУДОВ

В этом разделе содержатся подробные руководящие указания и рекомендации по проведению измерений и наблюдений на судах. Еще одним источником является публикация ВМО *Compendium of Lecture Notes in Marine Meteorology for Class III and Class IV Personnel* (WMO-№ 434). В приложении III.4 *Руководства по Глобальной системе наблюдений* (ВМО-№ 488) приводятся подробности о наблюдениях за морской поверхностью, которые должны осуществляться в рамках схемы СДН ВМО. Сведения об исследованиях качества наблюдений с судов содержатся в публикациях *The Accuracy of Ship's Meteorological Observations: Results of the VSOP-NA* (WMO/TD-No. 455), WMO (1999), Kent et al. (1993; 2003), Taylor et al. (2003), Kent и Berry (2005), Ingleby (2010) и Kennedy et al. (2012). В публикации Bradley и Fairall (2006) анализируется эффективная практика наблюдений исследовательского сообщества, тогда как информация о датчиках, которые используются в морской среде, содержится в публикации Weller et al. (2008). Во всех случаях безопасность членов экипажа, производящих наблюдения, является приоритетной в сравнении с производством, регистрацией и распространением данных наблюдений в целом или частично.

4.2.1 Функционирование схемы судов добровольного наблюдения ВМО

Схема СДН реализуется национальными метеорологическими и гидрологическими службами (НМГС) под руководством Группы СКОММ по наблюдениям с судов (ГНС) и, в частности, экспертов СДН ГНС (ГСДН). Полная информация о схеме СДН содержится в

[1] В *Наставлении по кодам,* том I.1, в настоящее время также содержится описание традиционных буквенно-цифровых кодов (ТБК), которые использовались на протяжении многих лет для распространения данных по Глобальной сети телесвязи (ГСТ), главным образом, в контексте СДН, что касается FM 13 SHIP. Однако ВМО находится в процессе полного прекращения использования ТБК для передачи данных по ГСТ. В этой связи *Наставление по кодам* в будущем поменяет структуру таким образом, чтобы совсем не использовать первый том.

[2] https://wiswiki.wmo.int/Satcom.

Руководстве по морскому метеорологическому обслуживанию (ВМО-№ 471). Руководители программы СДН работают совместно с портовыми метеорологами (ПМ) и техникам, которые обычно выступают в роли связующего звена между оператором СДН и судном. Важным первым шагом в привлечении судов, добровольно проводящих наблюдения, является получение разрешения судовладельцев и капитана судна. Когда разрешение получено и судно определено, портовый метеоролог должен сделать следующее:

a) смонтировать прошедшие калибровку приборы, обеспечив при этом наиболее оптимальную установку;

b) внедрить необходимые формуляры или установить программное обеспечение для электронного судового журнала;

c) провести обучение наблюдателей, связанное с уходом за приборами и их эксплуатацией;

d) провести учебную подготовку наблюдателей по всем аспектам практики наблюдений;

e) провести демонстрацию использования программного обеспечения для электронного судового журнала и компиляции данных наблюдений;

f) зарегистрировать необходимые метаданные судна в соответствии с требованиями для ВМО (см. *Наставление по Интегрированной глобальной системе наблюдений ВМО* (ВМО-№ 1160);

g) провести демонстрацию методов передачи данных наблюдений для судов, которые не оборудованы АМС (обычные суда);

h) объяснить НМГС суть морской прогностической продукции.

После того, как судно привлечено к участию, портовый метеоролог должен в идеальном варианте постараться посещать его, по меньшей мере, один раз в три месяца (в зависимости от передвижений судна и ресурсов персонала; если же это практически невозможно, то можно рассмотреть вопрос о менее частых посещениях) с тем, чтобы проверять точность приборов, обновлять программное обеспечение для электронного судового журнала и пополнять поставляемые формуляры, документы и т. д. Для автоматических метеорологических станций и цифровых датчиков может быть установлен более длительный период проверки сроком в один год. Портовому метеорологу следует воспользоваться представившейся возможностью для повышения интереса к метеорологии и объяснения взаимной заинтересованности моряков и метеорологов в получении точных данных метеорологических наблюдений.

В некоторых случаях компания, эксплуатирующая судно или платформу, проводит наблюдения/измерения для своего собственного пользования и предоставляет их через Глобальную систему связи ВМО (ГСТ); портовый метеоролог в этом практически не участвует. Монтаж и техническое обслуживание оборудования для передачи метеорологической и океанографической информации, а также обучение работе с ним, может осуществляться в соответствии с контрактом. В том случае, если судно/станция не были привлечены портовым метеорологом, следует приложить усилия для обеспечения того, чтобы соответствующие метаданные были доступны через соответствующие каналы ВМО.

4.2.2. Наблюдения с судов, добровольно проводящих наблюдения

4.2.2.1 *Наблюдаемые элементы*

Суда, участвующие в программе СДН[3] и выполняющие метеорологические наблюдения, должны в идеале осуществлять наблюдения, в периоды, предусмотренные в пункте 4.2.2.4, за следующими элементами:

a) местоположение судна (по навигационной системе судна);

b) курс и скорость судна (по навигационной системе судна);

c) скорость и направление ветра;

d) атмосферное давление;

e) барическая тенденция и ее характеристики;

f) температура воздуха;

g) влажность;

h) ТПМ;

i) погода в срок наблюдения и прошедшая погода, и метеорологические явления;

j) облака (их количество, тип и высота нижней границы облаков);

k) осадки;

l) видимость;

m) ветровое волнение в океане и зыбь, включая высоту, период и направление волн;

n) морской лед и/или обледенение судна, в случае необходимости;

o) особые явления.

Наблюдения, приведенные выше, осуществляются путем измерения, наблюдения или визуальной оценки на основе возможностей измерительного оборудования на борту судна.

Некоторые специально оборудованные суда, например исследовательские суда, могут выполнять инструментальные измерения и передавать данные об осадках, радиации, видимости, параметрах облачности, параметрах волнения и других соответствующих параметрах.

Как правило, инструментальные наблюдения, требующие освещения ночью, должны в идеальном случае выполняться после неинструментальных наблюдений, с тем чтобы не ухудшать адаптацию глаз наблюдателя к темноте.

Когда время, условия или иные факторы ограничивают возможность производить все виды наблюдений, наивысший приоритет для метеорологических наблюдений представляют собой пункты с a) по f).

[3] http://sot.jcommops.org/vos/.

4.2.2.2 ***Необходимое оборудование***

Для использования на судах пригодны следующие приборы:

a) прецизионный, циферблатный или электронный цифровой барометр-анероид (том I, глава 3);

b) барограф, предпочтительно с открытой шкалой (желательно, но не обязательно), или цифровой барометр, который обеспечивает прослеживание барометрической тенденции (см. том I, глава 3);

c) жидкостный стеклянный[4] или электрический термометр сопротивления (см. том I, глава 2);

d) гигрометр или психрометр (см. том I, глава 4);

e) термометр для измерения температуры морской воды и подходящий сосуд для взятия пробы морской воды или постоянно погруженный датчик (например, термометр в заборном отсеке двигателя) или датчик в корпусе судна с дистанционным указателем.

Поощряется использование анемометров с подходящей установкой как альтернатива визуальной оценке скорости ветра (например, с использованием шкалы силы ветра Бофорта), при том условии, что такие приборы регулярно проверяются для обеспечения их постоянного нахождения в пределах допустимых значений, определяемых в результате калибровки. В дополнение к этому, при использовании анемометров данные наблюдений скорости относительно грунта, курс относительно грунта, а также направления движения судна необходимы для точного расчета фактических (земная система координат) параметров ветра (см. 4.2.2.6.2). Дождемеры редко предусматриваются для использования на СДН.

Приборы, используемые на судах, должны соответствовать требованиям, изложенным или рекомендуемым в других главах настоящего Руководства, кроме модификаций, описанных в нижеследующих разделах этой главы. Поставляемые на суда приборы должны проходить регулярные испытания и проверки, организуемые соответствующими НМГС (или от их имени).

4.2.2.3 ***Автоматизация судовых наблюдений***

Автоматические метеорологические станции или полуавтоматизированные системы все более широко используются на судах, осуществляющих наблюдения, как для проведения наблюдений, так и для передачи данных. Применяются следующие два основных режима работы:

a) данные наблюдения, которое производится автоматически с использованием методов АМС, как это описано в данном томе, глава 1. Данные о местоположении, курсе и скорости судна получают из его навигационной системы или рассчитываются независимым образом с использованием спутниковой навигационной системы, как правило Глобальной системы определения местоположения (ГСОМ). Передача данных таких наблюдений может осуществляться либо в чисто автоматическом режиме, либо вручную, в зависимости от имеющихся средств связи;

c) наблюдения, составляющие морскую сводку, — это комбинация автоматизированных и ручных наблюдений, а именно: к данным автоматизированных наблюдений добавляются данные визуальных наблюдений, введенных наблюдателем

[4] Ртутные стеклянные термометры не должны более использоваться, поскольку Минаматская конвенция Программы Организации Объединенных Наций по окружающей среде (ЮНЕП) по ртути) вступила в силу на глобальном уровне в августе 2017 г. и налагает полномасштабный запрет на производство, импорт и экспорт приборов на основе ртути (см. том I, глава 1, 1.4.2).

перед началом передачи данных (например, добавление данных о видимости; метеорологических кодах; количествах, типах и высотах нижней границы облаков; высотах, периодах и направлениях волн; параметрах льда, а также скорости и направления ветра при проведении измерений без использования анемометра).

4.2.2.4 *Сроки наблюдений*

В тех случаях, когда наблюдения за элементами, иными нежели атмосферное давление, осуществляются вручную, они должны выполняться в пределах 10 мин до стандартного времени синоптических наблюдений. Атмосферное давление должно измеряться в точное время или как можно ближе к стандартному времени.

Наблюдения за поверхностью на борту судов выполняются, как правило, следующим образом:

a) синоптические наблюдения с укомплектованных персоналом судов принимаются в любое время, однако обычно — в основные стандартные сроки: 0000, 0600, 1200 и 1800 ВСВ и/или в один или несколько промежуточных стандартных сроков: 0300, 0900, 1500 и 2100 ВСВ;

b) почасовые или чаще производимые наблюдения следует проводить, когда используется автоматизированная система (усиливаются как можно чаще при помощи дополнительных визуальных элементов);

c) наблюдения следует проводить чаще в случае угрозы или преобладания штормовых или более суровых условий;

d) в тех случаях, когда наблюдаются внезапные и опасные метеорологические явления, наблюдения следует проводить немедленно с целью передачи данных, невзирая на стандартные сроки наблюдений (например, в пределах 300 морских миль названной тропической системы);

e) морские наблюдения являются столь же ценными в прибрежных зонах, что и в открытом море, и наблюдения следует продолжать во время всего плавания.

4.2.2.5 *Передача данных судовых наблюдений*

Широко распространенным является сейчас использование спутниковых систем связи для распространения данных судовых наблюдений. Подробности приводятся в приложении III.4 *Руководства по Глобальной системе наблюдений* (ВМО-№ 488). Наиболее часто используются следующих метода для обычных СДН:

a) коммерческие спутниковые системы, действующие через систему ИНМАРСАТ-С, которая находится на большинстве океанских судов, согласно Международной конвенции по охране человеческой жизни на море (СОЛАС) и требованиям Глобальной морской системы связи при бедствии и для обеспечения безопасности (ГМССБ). Данные метеорологических наблюдений, как правило, направляются на соответствующую сухопутную земную станцию (СЗС) в сообщении с использованием специального кода доступа (СКД) 41, что дает возможность НМГС покрывать расходы, связанные со сводкой. Перечень приемлемых СЗС для сообщений СКД доступен на веб-сайте ВМО по адресу https://community.wmo.int/list-inmarsat-land-earth-stations-accepting-special-access-codes. ИНМАРСАТ-С обеспечивает почти глобальный охват, кроме очень высоких широт, которые остаются пока неохваченными. Между тем, в настоящее время создаются другие специальные СКД для того, чтобы можно было отправлять сообщения с судна на берег в сжатой форме, что позволило бы НМГС

уменьшить расходы на свои национальные группы судов, проводящие наблюдения. Для отправки метеорологических данных некоторых систем АМС в сжатой форме используется также система сообщения данных ИНМАРСАТ-С;

b) электронные сообщения с судна, вне зависимости от системы связи, предоставляют возможность бесплатной для НМГС передачи, поскольку расходы покрывают суда.

Для автоматических метеорологических станций:

коммерческие спутниковые системы, такие как Iridium все более широко используются для систем АМС на борту судна. Система Iridium Short Burst Data, использующая сообщения в двоичном формате, может значительно снизить расходы на передачу данных. Преимущество Iridium заключается в том, что она обеспечивает глобальный спутниковый охват, а также может повысить своевременность данных (например, см. Blouch and Billon, 2017);

b) служба передачи данных ИНМАРСАТ-С также использовалась для отправки сжатых файлов с метеорологическими данными с определенных систем АМС на неавтоматические вручную направляющие сообщения суда, осуществляющие наблюдения, https://community.wmo.int/list-inmarsat-land-earth-stations-accepting-special-access-codes.

c) система Аргос: эта система спроектирована, главным образом, для привязки и передачи данных и ограничена количеством и орбитальными характеристиками полярно-орбитальных спутников, несущих полезную нагрузку Аргос. Система Аргос использовалась как для передачи, так и для обработки данных судовых наблюдений в ГСТ (*Guide to Data Collection and Location Services using Service Argos*), однако при использовании этой системы могут быть задержки в несколько часов в зависимости от местоположения станции наблюдения и наземной станции приема. Она, как правило, используется для небольших дрейфующих буев, хотя все чаще ее заменяют системой Iridium. Некоторые автономные судовые системы АМС также используют Аргос для передачи данных;

d) технологии на базе 3G/4G LTE также могут использоваться для передачи данных с СДН, когда они находятся вблизи берега, на центральный приемник в порту или непосредственно на сервер-приемник синоптических данных. Эта технология создает возможности для передачи огромных объемов данных, поскольку диапазон широк сравнительно выше, а расходы на передачу – ниже;

e) Международная система сбора данных через метеорологические геостационарные спутники (ГОЕС, МЕТЕОСАТ, МТСАТ). Эта система, финансируемая главным образом НМГС, обеспечивает полностью автоматическую передачу данных один раз в час в заранее определенные промежутки времени. Передача данных осуществляется в одну сторону, и количество ошибок может быть значительным. Она в основном используется в сочетании с заякоренными буями, а также с некоторыми системами АМС, установленными на судах.

4.2.2.6 ***Ветер***

Наблюдения за скоростью и направлением ветра могут выполняться либо посредством визуальных оценок, либо с помощью анемометров. Измерения ветра следует проводить только в случае использования прибора в хорошем состоянии и недавно откалиброванного, который правильно размещен вдали от воздействия надстройки, мачты и рангоута. Передаваемые данные о скорости ветра должны записываться либо в узлах, либо в м $с^{-1}$, при этом для некоторых целей сводки в узлах по-прежнему могут использоваться.

4.2.2.6.1 **Визуальные наблюдения**

Визуальные наблюдения основаны на оценке состояния внешнего вида поверхности моря. Скорость ветра получают по шкале Бофорта (см. таблицу ниже). Баллы Бофорта, полученные оценкой, переводят в метры в секунду или в узлы с использованием соответствующей колонки таблицы Бофорта с эквивалентной скоростью ветра, так что скорость ветра передается в виде конкретного значения в метрах в секунду или узлах в соответствии с наилучшей оценкой наблюдателя, взятого из значений эквивалентного диапазона. В национальных инструкциях могут содержаться руководящие указания в отношении того, какой метод является предпочтительным. Направление ветра определяют, наблюдая за ориентацией гребней ветровых волн (т. е. волн, возникающих в результате воздействия ветра, а не зыби) или направлением полос пены, которая движется по направлению ветра. Характеристики величин шкалы Бофорта относятся к условиям в открытом море. Практика показывает, что оценки значений направления ветра, получаемые визуальными методами, имеют хорошее качество.

Высота волны не всегда является надежным критерием, поскольку зависит не только от скорости ветра, но также и от области разгона и продолжительности воздействия ветра, глубины мелководья и наличия бегущей по морю зыби. Поэтому шкала Бофорта учитывает взаимосвязь между состоянием моря и скоростью ветра. Однако при оценке скоростей ветра должны приниматься во внимание и другие факторы, влияющие на эту взаимосвязь. Такими факторами являются запаздывание изменения состояния поверхности моря по сравнению с усилением ветра, сглаживание или ослабление воздействия ветра на морскую поверхность при сильном дожде и влияние сильных поверхностных течений (например, приливных) на видимое состояние поверхности моря. Критерии, принимаемые для открытого моря, становятся менее надежными на мелководье или вблизи берега из-за приливных течений и ограничений, вызываемых сушей. В таких районах, или когда поверхность моря становится плохо видимой (например ночью), сила относительного ветра по шкале Бофорта может оцениваться по звуковым явлениям, вызываемым ветром, по судовым предметам, таким, как флаги, и по дыму из трубы. В последнем случае также может оцениваться направление относительного ветра, например, при наблюдении за дымом из трубы. По этим оценкам может быть рассчитана скорость и направление истинного ветра (United Kingdom Meteorological Office, 1995).

4.2.2.6.2 **Инструментальные измерения**

Если приборы для измерения ветра устанавливаются на судах, то данное оборудование должно обеспечивать измерение как скорости, так и направления ветра, а также быть способным сводить к минимуму влияние качки (правильно сконструированные чашечные анемометры и флюгеры с демпферами способны гасить воздействия килевой и бортовой качки до такой степени, что они становятся незначительными). Морская среда является агрессивной, и поэтому чашечные или пропеллерные анемометры требуют регулярного технического обслуживания и калибровки с тем, чтобы обеспечивать получение надежных данных о ветре. Ультразвуковые анемометры не имеют никаких движущихся частей, требуют меньшего технического обслуживания, и поэтому они все чаще используются на судах.

Шкала Бофорта, применяемая в оперативной деятельности для сводок ВМО с оценками расчетного ветра на высоте 10 м над уровнем моря

Балл по шкале Бофорта (сила)	*Описательный термин*	*Средняя эквивалентная скорость ветра*		*Эквивалентная скорость ветра*		*Спецификации для наблюдений*	*Вероятная высота волн*	*Вероятная максимальная высота волн*
		узлы	*м·с$^{-1}$*	*узлы*	*м·с$^{-1}$*	*С борта судна (в открытом море)*	*м*	*м*
0	Штиль	0	0	< 1	0—0,2	Море как зеркало		
1	Тихий ветер	2	0,8	1—3	0,3—1,5	Образуется рябь, напоминающая чешую, но без пенистых гребней	0,1	0,1
2	Легкий ветер	5	2,4	4—6	1,6—3,3	Небольшие слабые волны, еще короткие, но более выраженные; гребни гладкие и без разрыва	0,2	0,3
3	Слабый ветер	9	4,3	7—10	3,4—5,4	Крупные слабые волны; гребни начинают разрываться; гладкая пена; возможно, разбросанные белые барашки	0,6	1,0
4	Умеренный ветер	13	6,7	11—16	5,5—7,9	Небольшие волны, становящиеся более длинными; довольно частые белые барашки	1,0	1,5
5	Свежий ветер	19	9,3	17—21	8,0—10,7	Умеренные волны, принимающие более выраженную продолговатую форму; образуется много белых барашков (иногда появляются некоторые брызги)	2,0	2,5
6	Сильный ветер	24	12,3	22—27	10,8—13,8	Начинают образовываться крупные волны; повсюду более распространены гребни с белой пеной (вероятно, некоторые брызги)	3,0	4,0
7	Крепкий ветер	30	15,5	28—33	13,9—17,1	Море вздымается, и белая пена от разрывающихся волн начинает вытягиваться в полосы вдоль направления ветра	4,0	5,5
8	Очень крепкий ветер	37	18,9	34—40	17,2—20,7	Умеренно высокие волны большей длины; кромки гребней начинают разрываться на брызги; пена вытягивается в четко выраженные полосы вдоль направления ветра	5,5	7,5

Балл по шкале Бофорта (сила)	*Описательный термин*	*Средняя эквивалентная скорость ветра*		*Эквивалентная скорость ветра*		*Спецификации для наблюдений*	*Вероятная высота волн*	*Вероятная максимальная высота волн*
		узлы	*м·с$^{-1}$*	*узлы*	*м·с$^{-1}$*	*С борта судна (в открытом море)*	*м*	*м*
9	Шторм	44	22,6	41—47	20,8—24,4	Высокие волны; плотные полосы пены вдоль направления ветра; гребни волн начинают опрокидываться, падать и переворачиваться; брызги могут влиять на видимость	7,0	10,0
10	Сильный шторм	52	26,4	48—55	24,5—28,4	Очень высокие волны с длинными свешивающимися гребнями; появляющаяся в результате пена (большими пятнами) вытягивается в полные белые полосы вдоль направления ветра; в целом поверхность моря принимает белый вид; «падение» моря становится тяжелым и напоминает удары; видимость ухудшается	9,0	12,5
11	Жестокий шторм	60	30,5	56—63	28,5—32,6	Исключительно высокие волны (небольшие и средние суда могут иногда теряться из виду за волнами); море полностью покрыто длинными белыми клочьями пены, располагающимися вдоль направления ветра; повсюду кромки гребней волн выдуваются в пену; видимость ухудшается	11,5	16,0
12	Ураган	64 и более	32,7 и более	64 и более	32,7 и более	Воздух наполнен пеной и брызгами; море полностью белое от брызг; видимость очень серьезно ухудшается	14 и более	—

Следует учитывать, что высота волн дает лишь приближенное указание на то, что можно ожидать в открытом море. Эти высоты волн никогда не следует использовать для записи погоды в вахтенный журнал или для сообщения о состоянии моря. В замкнутых водах или вблизи суши при ветре с берега высота волн будет меньше, а волны круче.

Источник: OMI-CMI (1947)

Трудно обеспечить правильную установку судовых приборов для измерения параметров ветра (Taylor et al., 2003; Yelland et al., 2001; Moat et al., 2005; Moat et al., 2006). Местные воздействия, вызываемые надстройкой, мачтой и рангоутом, должны быть сведены к минимуму, насколько это возможно, посредством выдвижения прибора вперед и на максимальную высоту, насколько это практически возможно. Если прибор крепится на рее, то предпочтительно применять автономные датчики для измерения скорости и направления ветра, поскольку таким образом достигается более равномерное распределение их веса на рее, и приборы могут быть установлены дальше от борта. Независимо от того, крепится ли прибор на рее или на кронштейне, установленном на фок-мачте, каждый приборный блок должен монтироваться на расстоянии от мачты, составляющем не менее 10 размеров ее диаметра. Если это практически невозможно, то хорошим способом является крепление двух приборов по одному с каждой стороны фок-мачты, с тем чтобы всегда использовать тот прибор, установка которого является более открытой. Верхушка фок-мачты, если таковая имеется, обычно считается самым лучшим местом для размещения анемометра. Ультразвуковые датчики ветра отличаются эффективностью и обеспечивают хорошую точность при их размещении на вершине основной мачты.

Иногда в море применяются различные виды переносных анемометров (часто для содействия швартовке судна). Их главный недостаток состоит в том, что им трудно найти репрезентативное место для их установки, и поэтому проводимые с их помощью измерения дают большой разброс (Kent et al., 1993). Только наблюдатель, который понимает природу воздушного потока над судном при различных условиях, будет способен выбрать наилучшее место для проведения таких наблюдений и таким образом достичь удовлетворительных результатов. Этот метод может быть полезен, если визуальные оценки силы ветра затруднены или невозможны, например при слабых ветрах ночью.

Если наблюдения выполняются на движущемся судне, необходимо проводить различие между относительным и истинным ветром; для всех метеорологических задач должны сообщаться параметры истинного ветра. Относительная скорость ветра должна сообщаться, по возможности. Процедура вычисления скорости и направления истинного ветра по относительной скорости ветра, относительному направлению ветра, скорости, направлению движения и курсу судна описана подробно в работе Smith et al. (2003). Следует отметить, что направление движения судна и курс судна могут значительно различаться, особенно при малых скоростях судна и большом дрейфе. При вычислении параметров истинного ветра по результатам наблюдений за относительным ветром и с учетом скорости и направления движения судна можно использовать простую векторную диаграмму или таблицу (Bowditch, 2002). Эти дополнительные данные желательно получать при помощи магнитного компаса и из информации о скорости судна. Их также можно получить на основе данных о направлении движения судна, полученных из приемника ГСОМ, однако в таком случае не учитывается дрейф. В прошлом векторное преобразование часто являлось источником ошибок в сообщаемых данных о ветрах. Однако все более широкое использование программного обеспечения электронного судового журнала, которое рассчитывает истинный ветер, уменьшает этот источник ошибок. Для АМС всю необходимую информацию можно получить напрямую из данных анемометра и навигационной системы судна.

Передаваемые скорость и направление ветра представляют собой усредненные скорость и направление за десятиминутный период, непосредственно предшествовавший сроку наблюдения. Однако, когда в течение десятиминутного периода наблюдались резкие изменения характеристик ветра, только данные, полученные после резкого изменения, должны быть использованы для сообщения средних значений и, следовательно, период усреднения в этих случаях должен быть соответственно уменьшен.

Регистрация судовых метаданных для ВМО (см. *Наставление по Интегрированной глобальной системе наблюдений ВМО* (ВМО-№ 1160) представляет особую важность для наблюдений за ветром (Yelland et al., 2001). Метаданные должны предоставляться с указанием используемого приборного обеспечения и того, как оно установлено на борту судна (где именно на судне и на какой высоте), а также для сообщения

подробных сведений о типе судна (Kent et al., 2007). Метаданные используются, в частности, для правильного толкования данных и повышения согласованности данных (например поправка на смещение), а также обеспечивают прослеживаемость соответствия стандартам.

4.2.2.7 *Атмосферное давление, тенденция давления и характеристика тенденции давления*

4.2.2.7.1 Методы наблюдений

Давление может измеряться либо при помощи прецизионного барометра-анероида, циферблатного барометра-анероида, либо электронного цифрового барометра. Показания барометра снимаются как можно ближе ко времени наблюдения. При неавтоматических наблюдениях показания барометра снимаются последними и вносятся в данные наблюдения непосредственно перед завершением составления сообщения. Автоматические системы должны иметь период усреднения, равный одной минуте (том I, глава 1, приложение 1.A). Большинство судов должны сообщать давление до одного десятичного звена.

При проведении визуальных наблюдений характеристику и значение тенденции давления за последние 3 ч обычно получают по морскому барографу, предпочтительно имеющим шкалу с крупными делениями с ценой 1 гПа. Однако все более часто используются цифровые барометры с жидкокристаллическим дисплеем тенденции давления.

В случае АМС характеристика и значение барической тенденции за последние 3 ч рассчитываются автоматически.

4.2.2.7.2 Приборы

Все барометры должны соответствовать общим требованиям, изложенным в томе I, глава 3, и должны поставляться с паспортом, содержащим поправки (если таковые имеются), которые должны применяться к показаниям каждого отдельного прибора. Барометры должны иметь шкалу, которая дает возможность отсчитывать показания с точностью до 0,1 гПа. Требования к погрешности оперативных измерений и эксплуатационным характеристикам прибора изложены в томе I, глава 1, приложение 1.A. Требуемая погрешность измерений менее 0,1 гПа (после приведения к уровню моря: < 0,2 гПа). Достижимая погрешность измерения никогда не должна быть больше 0,3 гПа. Морские барографы должны иметь встроенное демпферное устройство, например масляную ванную, в которой находится анероидная коробочка или успокоитель, соединенный с рычажным механизмом, для предохранения от больших скачков на ленте в результате быстрых колебаний давления, вызываемых порывистым ветром и движением судна. Как барометр, так и барограф, должны также сообщаться с атмосферой посредством датчика статического давления, с тем чтобы показания можно было снимать более точно и на них не сказывались воздействия закрытых мостиков или условий внутри помещения. Если это невозможно, необходимо дать инструкции для обеспечения того, чтобы двери на крыле мостика открывались перед проведением наблюдения. Это особенно важно на судах с герметизированными жилыми модулями или на судах, которые перевозят опасные грузы и на которых рулевая рубка может быть герметически закрыта.

Как правило, многие НМГС устанавливают свои барометры на давление «на уровне станции», и поэтому данные наблюдений необходимо корректировать с учетом высоты барометра, с тем чтобы получить выходные данные о давлении на уровне моря. Эта поправка к высоте может рассчитываться автоматически программным обеспечением электронного судового журналаили при помощи АМС.

4.2.2.7.3 **Установка и эксплуатация**

Барометры-анероиды и барографы должны устанавливаться на амортизирующем материале в таком положении, чтобы они как можно меньше зависели от сотрясения, вибрации или движения судна. Наилучшие результаты обычно получаются при размещении приборов как можно ближе к центру надводной части судна. Барографы следует устанавливать так, чтобы пишущий рычаг прибора был ориентирован под правильным углом к диаметральной плоскости судна для уменьшения риска соскальзывания рычага с ленты.

4.2.2.7.4 **Поправки**

Следует предусмотреть внесение следующих поправок:

a) ошибка (смещение) прибора;

b) приведение к уровню моря;

c) поправка на температуру (если это применимо и имеются соответствующие таблицы).

Барометры должны быть соответствующим образом компенсированы на температуру; в противном случае приборы следует снабдить таблицей температурных поправок и средствами для измерения температуры. Таблица для приведения давления к уровню моря должна предоставляться, когда барометры устанавливаются на высоту станции, хотя это не является обязательным для судов, использующих электронные судовые журналы или АМС, которые способны автоматически вносить поправку на высоту (Bowditch, 2002, таблицы 29—34).

4.2.2.7.5 **Источники ошибок**

Вопрос об ошибках обсуждается в томе I, глава 3, однако значительные ошибки, в особенности на судах, могут быть вызваны воздействием ветра на давление в том помещении, в котором находится барометр. По мере возможности они должны быть сведены к минимуму путем помещения прибора в кожух, соединенный с датчиком статического давления, или путем соединения устройства непосредственно с этим датчиком статического давления.

На неавтоматизированных барометрах самые частые (субъективные) погрешности объясняются отсутствием приведения к уровню моря, неправильной оценкой высоты барометра или неумышленной двойной поправкой (поправка, внесенная применительно к барометру, который уже показывает давление на уровне моря).

4.2.2.7.6 **Проверка по эталонным приборам**

Барометры-анероиды и барографы следует проверять там, где это возможно, приблизительно с трехмесячными интервалами, по эталонному барометру ПМБ или переносному эталонному барометру. Однако это не всегда может быть возможно, поскольку перемещения судна могут характеризоваться высокой динамикой. Отчет о всех сравнениях должен вноситься портовым метеорологом в журнал, а к данному барометру должна прикрепляться этикетка, в которой указывается дата проверки барометра и та поправка, которая должна вноситься. Стандартные барометры должны регулярно проходить калибровку.

Цифровые барометры характеризуются гораздо лучшей стабильностью, а у некоторых моделей промежутки времени между калибровками могут составлять целых два года.

4.2.2.8 *Температура и влажность воздуха*

Ранее наблюдения за температурой (том I, глава 2) и влажностью воздуха (том I, глава 4) рассматривались вместе, поскольку они часто измерялись психрометрическими методами при помощи сухого или смоченного термометра. Однако с более широким использованием АМС все чаще эти параметры измеряют раздельно, используя термометр и отдельный гигрометр. Независимо от того, какой метод используется, приборы должны иметь эффективную вентиляцию надлежащей продолжительности (для возможности адаптации) и быть правильно установлены в потоке воздуха, идущего непосредственно с моря, который не был в контакте с судном и не проходил над ним, и должны быть соответствующим образом защищены от радиации, осадков и брызг.

В случае визуальных наблюдений, если используется жалюзийная будка, то их должно быть две, при этом с каждой стороны судна закрепляется по одной такой будке, с тем чтобы наблюдение можно было также проводить с наветренной стороны. При такой установке термометры в гигрометре могут быть полностью открыты для воздушного потока и не подвергаются воздействию искусственных источников тепла и водяного пара. В качестве альтернативы можно также использовать одну переносную жалюзийную будку, которая вывешивается на любой стороне, которая является подветренной, с тем чтобы обеспечить такую же установку. Батистовый фитиль, вставленный в смоченный термометр в жалюзийной будке, следует менять не реже одного раза в неделю, и более часто в штормовую погоду.

Было признано допустимым применение пращевых или аспирационных психрометров, установленных с наветренной стороны мостика. Если применяются неавтоматические психрометры, то показания термометров должны сниматься как можно скорее после прекращения действия вентиляции. Ручным гигрометрам необходимо несколько минут для адаптации к открытой окружающей среде, если они хранились в помещении перед их использованием. Акклиматизация достигается, когда стабилизируется считывание с прибора за периоды до одной минуты.

При общем обслуживании психрометров следует выполнять рекомендации, содержащиеся в томе I, глава 4. Для влажного термометра следует использовать дистиллированную воду. Если это невозможно, то, как правило, больше подходит конденсат по сравнению с обычной пресной водой. Никогда нельзя использовать воду, загрязненную примесями морской воды, поскольку любые примеси соленой воды существенным образом повлияют на температуру по смоченному термометру.

В случае АМС или дистанционного цифрового дисплея более не требуется ручного снятия показаний приборов, находящихся внутри будки; единый экран может быть установлен и выставлен достаточно далеко от конструкции корабля, с тем чтобы обеспечивать хорошую экспозицию. Это означает, однако, что заполнение сосуда смоченного термометра становится затруднительным и вследствие этого для АМС, как правило, используют электронные датчики температуры и относительной влажности. Эти приборы требуют по крайней мере ежегодной калибровки на регулярной основе[1]. АМС должны передавать как температуру, так и влажность в виде значений, усреднённых за одну минуту.

Влажность может передаваться несколькими переменными, например, температурой точки росы, температурой смоченного термометра в сочетании с сухим или относительной влажностью (том I, глава 4) и должна записываться как измеренный параметр. Любое преобразование между параметрами влажности добавляет погрешность и испытывает воздействие любых погрешностей в других используемых параметрах, а также усечения до подходящих форматов передачи. В психометрических измерениях температура сухого и смоченного термометра записываются с разрешением 0,1 °C. Точку росы следует рассчитывать на основе стандартных таблиц, действующих на национальном уровне, или используя стандартные формулы ВМО (том I, глава 4, приложения 4.A и 4.B) и психрометрический коэффициент, соответствующий используемому прибору.

[1] Фильтры на датчиках влажности должны заменяться каждые три месяца. Полномасштабный датчик, вероятно, потребует очистки и рекалибровки в лаборатории как минимум один раз в год.

Температуру точки росы следует передавать с разрешением 0,1 °C. Перевод данных измерений температуры смоченного термометра или точки росы в относительную влажность (ОВ), которая записывается как целые проценты, вносит значительную погрешность и этого следует избегать. При непосредственном измерении ОВ (например, с использованием АМС), ОВ должна передаваться с разрешением 1 %.

4.2.2.9 *Температура поверхности моря*

Обычно измеряют температуру морской воды вблизи или непосредственно под поверхностью моря. Реже измеряют радиометрическую температуру поверхностной пленки океана.

ТПМ следует измерять очень тщательно. Это связано с тем, что она также используется для получения разности с температурой воздуха, которая служит мерой стратификации температуры, влажности и других характеристик приводных воздушных масс. Температура морской воды должна отсчитываться с точностью до 0,1 °C.

Для измерений ТПМ невозможно использовать стандартный прибор из-за большого разнообразия размеров и скоростей судов, а также соображений стоимости, удобства эксплуатации и технического обслуживания.

За ТПМ можно вести наблюдения посредством:

a) отбора пробы воды с поверхности моря специально предназначенным для этой цели ведром;

b) измерения температуры воды в заборниках;

c) измерения температуры воды электрическим термометром, опускаемым прямо в морскую среду либо укрепленным в корпусе судна (т.е. используя установленный внутри корпуса контактный датчик);

d) использования инфракрасного радиометра, установленного на судне в направлении поверхности моря;

e) использования батитермографа одноразового действия[2].

В течение многих лет, в основном, используются методы (a) и (b). При исследовании расхождений в температуре, полученной этими двумя методами, было выявлено (*Comparative Sea-surface Temperature Measurements* (WMO-No. 336), что температура воды в заборнике в среднем на 0,3 °C выше температуры, измеренной в пробах, полученных с помощью ведра. Последние исследования свидетельствуют о том, что такое отклонение в сторону завышения температуры уменьшается со временем (Kent and Taylor, 2006). В этой работе говорится, что особенности того, как определяют температуру в заборнике, оказывают значительное влияние на качество наблюдений. В последние годы в связи с увеличением скорости и высоты судов более широко стал использоваться метод (c), который дает наиболее согласованные результаты (*The Accuracy of Ship's Meteorological Observations: Results of the VSOP-NA* (WMO/TD-No. 455); Kent et al., 1993), однако местоположения датчика на корпусе критически важно. Он не должен монтироваться там, где имеются источники существенно высоких температур, таких как машинное отделение. Что касается радиометров, то они редко применяются на СДН, но могут использоваться на некоторых научно-исследовательских судах или морских платформах. Из всех этих методов измерение температуры в приемном патрубке заборника является наименее желательным в связи с необходимостью особых предосторожностей для получения хороших результатов.

[2] В настоящее время не поддерживается ВМО (1955–).

4.2.2.9.1 **Измерения с помощью морского ведра**

Морское ведро опускается за борт судна для взятия пробы морской воды и поднимается обратно на палубу, затем в ведро опускают термометр и измеряют температуру воды. Проба воды должна отбираться с подветренного борта в носовой части судна и на достаточно большом расстоянии от сливных труб судна. Отсчет по термометру надо производить сразу, как только термометр примет температуру воды, обеспечивая при этом, чтобы на него не падал прямой солнечный свет. Когда ведро не используется, его следует подвешивать в тени для просушки.

Морское ведро должно иметь такую конструкцию, чтобы оно легко наполнялось водой в момент взятия пробы и чтобы обмен теплом вследствие радиации и испарения был минимальным. Соответствующий термометр должен быть малоинерционным и иметь удобную шкалу для отсчета и желательно постоянно закреплен в ведре. Если для отсчетов термометр должен выниматься из ведра, то необходимо, чтобы он имел небольшую теплоемкость и был вставлен в оправу со стаканчиком достаточного объема, чтобы температура воды в нем при вытаскивании термометра из ведра сильно не изменялась в процессе отсчета показаний. Конструкция ведра должна соответствовать цели организации, нанимающей судно для наблюдений.

Предполагается, что данные измерений при помощи хорошо сконструированных ведер четко согласуются между собой при широком диапазоне условий. Однако они менее удобны в работе, чем приборы, прикрепленные к корпусу судна, и их использование иногда ограничивается погодными условиями или размером и скоростью судна.

4.2.2.9.2 **Термометры в заборнике и в цистерне**

Термометр, встраиваемый в водозаборную трубу при постройке судна, обычно не подходит для измерений ТПМ с требуемой точностью. Следовательно, организация, нанимающая судно, должна, с разрешения соответствующей судовой компании, устанавливать термометр, пригодный для этой цели. Термометр устанавливать в специальной трубе, обеспечивающей адекватную теплопроводность между резервуаром термометра и окружающей морской водой, и близко к водозаборнику, хотя это может быть не всегда практически осуществимо.

В случае установки термометра прямого считывания в тесном месте наблюдатель должен быть предупрежден о возможных ошибках при отсчете температуры из-за параллакса. Дистанционная система отсчета с дисплеем, установленным где-нибудь в другом месте (например, в машинном отделении или в рубке), позволяет решить эту проблему. Наблюдатель должен также знать, что на судах с большой осадкой или при наличии в поверхностном слое воды существенного температурного градиента температура, измеренная в водозаборном устройстве температура, обычно значительно отличается от температуры поверхностного слоя моря и будет меняться в зависимости от загрузки судна или его балласта. И наконец, температура в водозаборнике, безусловно, не должна регистрироваться в тех случаях, когда судно не движется, потому что в это время нет циркуляции охлаждающей воды. Следует отметить, что установка модернизированного водозаборника или установка в корпусе контактного датчика ТПМ может часто занимать много времени и отличаться сложностью, что нередко вынуждает портовых метеорологов или техников работать в трудных условиях (внутренние отсеки судов, ограниченный доступ и тому подобное).

Кингстонная коробка в днище судна является той полостью, где могут располагаться приемные патрубки и где можно производить измерения температуры забортной воды. Это хорошее место для установки датчика дистанционного термометра. К таким устройствам применимы те же ограничения, о которых упоминалось выше.

Хотя большинство находящихся в водозаборнике термометров будут давать только мгновенные отсчеты показаний температуры, некоторые суда могут быть оборудованы датчиками температуры, которые могут проводить выборочные измерения с

заданной частотой и усреднять их за определенный период времени. В таком случае для обеспечения более репрезентативных измерений ТПМ может быть использован модульный алгоритм фильтрации, с тем чтобы исключить экстремальные отсчеты по расчетному усредненному значению.

4.2.2.9.3 **Термометры, укрепляемые на корпусе**

Термометры, укрепляемые на корпусе, очень удобны в обращении и дают точные средние значения ТПМ. Это непременно дистанционные приборы с датчиками, которые либо выведены «через корпус» наружу и имеют непосредственный контакт с водой, либо закреплены внутри судна на корпусе («магнитный тип»), за исключением случая двойного корпуса. Оба типа приборов показывают хорошо согласующиеся результаты, но датчик, выведенный «через корпус», имеет несколько более высокую чувствительность. Когда датчик расположен внутри, магнитные зонды предпочтительнее, нежели приклеенные датчики, для большей простоты в установке и техническом обслуживании, однако лишь для стальных корпусов.

Датчики должны устанавливаться впереди всех сливных отверстий на глубине от 1 до 2 м ниже ватерлинии. Когда имеют место значительные изменения осадки судна, может понадобиться установка нескольких датчиков. Это может создать большие трудности при установке приборов и монтаже электропроводки, поэтому такие работы лучше всего выполнять при постройке судна. При последующей установке магнитных датчиков нет необходимости ставить судно в сухой док.

4.2.2.9.4 **Буксируемые термометры**

Разработано несколько методов буксировки датчика дистанционного термометра в море в месте, где отбираются пробы воды ведром. Существующие различия касаются способов подводки кабеля на борт судна и приспособлений для установки датчика в море. Эти приспособления дают показания, которые хорошо согласуются с измерениями, проводимыми с помощью точного морского ведра, и могут легко применяться. Однако, в связи с ограниченностью опыта наблюдений в настоящее время нет достаточного количества данных о возможном их обрастании водорослями и т.п. Таким образом, как и при работе с ведром, необходимо будет опускать и поднимать прибор в каждом случае. Буксируемые термисторы редко используются на СДН, однако более широко применяются для исследовательских целей (Fairall et al., 1997; Bradley and Fairall, 2006; Weller et al., 2008).

4.2.2.9.5 **Радиометры**

Любое вещество в зависимости от его температуры излучает тепловую энергию в виде инфракрасного излучения. Количество энергии и длина волны излучения зависят от температуры вещества и его излучательной способности. Таким образом, радиометры, которые реагируют на инфракрасное излучение, могут применяться для измерения температуры вещества. При направлении на поверхность моря радиометр измеряет температуру только самого верхнего слоя воды толщиной примерно 1 мм, так как излучательная способность воды близка к единице. Этот самый верхний слой часто называют поверхностной пленкой океана. В верхнем слое океана толщиной несколько сантиметров могут наблюдаться большие градиенты температуры, при самой низкой температуре вверху, особенно при относительно спокойных условиях.

Радиометры могут быть ручными (направляемыми вперед и вниз), устанавливаться на стреле или кронштейне, вынесенными над водой. Радиометрические измерения дают температуру испаряющей поверхностной пленки океана и применяются лишь на немногих судах (Barton et al., 2004; Donlon et al., 2008).

4.2.2.10 ***Облачность и погода***

4.2.2.10.1 **Количество облаков и тип облаков**

Визуальные наблюдения за облачностью следует выполнять с использованием тех же правил, что применяются к наземной станции (см. том I, глава 15, а также *International Cloud Atlas* (WMO-No. 407)). Подробные инструкции по проведению этих наблюдений должны предоставляться портовым метеорологом. Иллюстрированные руководства и информация по кодам имеются в многочисленных источниках, таких как *International Cloud Atlas* (WMO-No. 407) и публикации НМГС. Почти любое программное обеспечение электронного судового журнала содержит обширные изображения облаков с целью облегчения идентификации типа облачности. Помимо этого, образец кода для передачи данных наблюдений SHIP (часть C *Наставления по кодам* (ВМО-№ 306) содержит подробную информацию о том, как составлять и кодировать сводки СДН по облачности.

Оценка общего количества облаков заключается в оценке того, какая площадь небесного свода покрыта облаками, и ее следует передавать в процентах (%); однако октанты могут по-прежнему использоваться для соответствия национальным требованиям. В коде FM 94 BUFR (*Наставление по кодам* (ВМО-№ 306)) общая площадь облачности дается в процентах (113 обозначается затянутое туманом небо и/или другие метеорологические явления). Оценка небольшого количества облаков проводится аналогично и сообщается в октантах как при передаче с судна на берег, так и в случае прямой передачи в коде FM 94 BUFR. Если облаков нет, то передается средняя облачность. Тип облачности: низкая, средняя или высокая — определяется согласно *Международному атласу облаков*, (*International Cloud Atlas* (WMO-No. 407)), или путем идентификации соответствующего типа облачности по фотографиям, представленным в программном обеспечении электронного судового журнала.

4.2.2.10.2 Высота нижней границы облаков

На СДН, как правило, проводится оценка высоты нижней границы облаков. Для повышения квалификации в этой области следует поощрять наблюдателей к использованию любой возможности проверить свои оценки по известным высотам, например, когда можно наблюдать, как облако проходит над гористым побережьем, хотя в подобных обстоятельствах основание облака может быть ниже у горы, нежели в открытом море.

Некоторые специализированные суда могут иметь установленные приборы для измерения нижней границы облаков. Метод определения высоты основания облака с помощью прожектора мало пригоден на судне из-за короткой базовой линии. Предпочтение следует отдавать прибору, который не требует базовой линии, такому как лазерный облакомер (см. том I, глава 15). Его необходимо устанавливать таким образом, чтобы вахтенный штурман мог его использовать и считывать его показания с навигационного мостика.

4.2.2.10.3 Текущая и прошедшая погода

Сводки о текущей и прошедшей погоде предназначены, главным образом, для количественного описания метеорологических явлений. Большинство сводок о текущей и прошедшей погоде основаны на визуальных и звуковых наблюдениях и используют те же правила, что и правила, применимые к наземным станциям (см. том I, глава 14). Существует 100 категорий текущей погоды в срок наблюдения для неавтоматизированных наблюдений СДН (первые 100 кодов в кодовой таблице 0 20 003 FM 94 BUFR). Прошедшая погода передается 10 категориями (первые десять кодов в кодовых таблицах 0 20 004 и 0 20 005 FM 94 BUFR). Необходимо передавать две категории прошедшей погоды, которые выбираются для обеспечения более полного описания условий за прошедший период. *Наставление по кодам* (ВМО-№ 306) содержит конкретную информацию о

том, как составлять и кодировать метеорологические сводки СДН. Для наблюдателей, использующих программное обеспечение электронного судового журнала, более подробные рекомендации очевидно можно получить из этого программного обеспечения.

4.2.2.11 ***Видимость***

В море при отсутствии пригодных объектов невозможно оценивать видимость с такой же точностью, как на наземных станциях. На большом судне оценку видимости, когда она очень низкая, можно получить, используя находящиеся на борту объекты (например фок-мачту), однако, следует осознавать, что эти оценки могут содержать ошибку, поскольку судно может вызывать изменения в воздушной среде. Для бóльших дистанций полезным ориентиром является появление земли при плавании вблизи побережья и если местоположение береговых знаков зафиксировано, то расстояние до них в моменты их появления или исчезновения может быть измерено по карте. Подобным образом можно оценивать видимость в открытом море, когда в поле зрения находятся другие суда и расстояние до них известно, например по радиолокатору. При отсутствии других объектов в качестве основы для оценки может послужить появление горизонта при наблюдениях с различной высоты. Хотя в такие методы могут вкрадываться ошибки из-за аномальной рефракции, они являются все же единственно доступными в определенных обстоятельствах. Ночью полезным для определения видимости является появление навигационных огней.

Когда видимость неодинакова во всех направлениях, ее следует оценивать или измерять в направлении наименьшей видимости, а в бортовом журнале следует делать соответствующую запись (исключая уменьшение видимости из-за выбросов из выхлопной трубы судна).

Информация об измерителях видимости приводится в томе I, глава 9. Для использования на судах пригодны только те типы измерителей видимости, которые могут быть использованы при достаточно короткой базисной линии или коротком оптическом расстоянии. Таковыми являются измерители дальности видимости прямого рассеяния. К сожалению, тепловое воздействие самого судна и его выхлопных газов может привести к тому, что измерения будут непрезентативными.

4.2.2.12 ***Осадки***

СДН обычно не передают информацию об осадках в кодированных сводках о типе погоды (см. 4.2.2.10). Вместе с тем, измерения осадков могут передаваться со стационарных станций или судов, оборудованных осадкомерами. Измерение осадков в море рассматривается в публикациях *Precipitation Measurements at Sea* (WMO-No. 124) и ВМО (WMO, 1981), а также в контексте наблюдений с научно-исследовательских судов в работах Bradley and Fairall (2006) и Weller et al. (2008), где также описаны наиболее новые системы, такие как оптические дождемеры, которые, как правило, не используются для обычных наблюдений. В качестве пособия для судовых наблюдателей в приложении 4.B дается описание осадков в море, которое может быть использовано для подготовки сводок о текущей погоде.

Полное измерение включает определение как количества, так и продолжительности осадков. Количество осадков должно измеряться при помощи осадкомера, приспособленного для использования на борту судна.

Получение надежных данных измерений осадков на борту судна является трудной задачей из-за аэродинамического воздействия надстройки судна, влияния бортовой и килевой качки, попадания брызг в осадкомер и изменений местоположения судна. Оборудование, используемое на судах для измерения осадков, должно быть сконструировано и установлено таким образом, чтобы избежать или свести к минимуму, насколько это возможно, влияние первых трех названных факторов. Для бортового осадкомера

наиболее эффективным представляется помещение прибора максимально спереди и как можно выше. Однако в конкретных случаях другие положения могут использоваться для облегчения обслуживания (Bradley and Fairall, 2006).

Измерения осадков с судов «в точке» (плавучие маяки или научно-исследовательские суда в близком к неподвижному положении) являются особенно ценными, потому что исключается влияние движения судна, и данные могут, таким образом, включаться в климатологические анализы без корректировки. Однако должны, тем не менее, учитываться любые проблемы, связанные с движением платформы и загрязнением солью.

Осадкомер на кардановом подвесе

Наиболее распространенным прибором, используемым для измерения осадков на борту судов, является осадкомер, укрепленный на кардановом подвесе. Это устройство не является весьма эффективным, особенно в плохую погоду, поскольку оно не может удерживать осадкомер все время в горизонтальном положении. Эффективное устройство в виде карданового подвеса является очень сложным и дорогостоящим и используется только на специальных судах. Как правило, при использовании осадкомера более лучшим вариантом представляется применение стационарной установки прибора с дистанционной измерительной приставкой.

Конический морской осадкомер

Конический морской осадкомер обычно закрепляется высоко на мачте. Вода отводится по пластмассовой трубке в удаленный приемный сосуд, находящийся на палубе или рулевой рубке. Такое устройство может быть полезным для измерения осадков, если при его установке соблюдены меры предосторожности. Приемное отверстие осадкомера должно быть зафиксировано на плоскости, параллельной палубе судна.

Плювиограф

Для морских условий разработаны несколько типов плювиографов. В одном из них приемный сосуд закрепляется на открытом месте, а регистрирующее устройство устанавливается внутри помещения. Дождевая вода по трубке поступает из приемного сосуда в камеру, находящуюся рядом с регистрирующим устройством. Перо, связанное с поплавком в камере, записывает изменения уровня воды в камере на ленте вращающегося барабана. Слив осадков из камеры происходит автоматически через сифон, как только их общее количество достигает 20 мм.

В электроконтактном плювиографе связь между приемным сосудом и записывающим устройством осуществляется электрическим способом. Дождевая вода, попавшая в приемник, некоторое время хранится в камере. По достижении отметки, соответствующей 0,5 мм осадков, вода, касаясь стрелки, замыкает электрическую цепь. Затем электродвигатель закрывает входной клапан и одновременно открывает выпускной клапан. После слива воды клапаны возвращаются в исходное положение, а на регистрирующее устройство посылается единичный импульс. Ошибки возникают в том случае, когда движение судна или буя вызывает колебания уровня воды большие, чем если бы он поднимался постепенно. Этот недостаток можно ликвидировать, используя перистальтический насос. Такое приспособление всякий раз, когда происходит электрический контакт, сливает определенное количество воды (а не всю накопленную воду), и таким образом прибор становится менее чувствительным к колебаниям уровня воды; при этом нет необходимости в клапанах.

Третьим типом плювиографа является специально сконструированный судовой осадкомер, в котором используется горизонтальный и вертикальный, действующий во всех направлениях, приемный сосуд, с тем чтобы можно было проводить измерения осадков при высоких скоростях ветра (Hasse et al., 1998). Благодаря измерению количества воды, которая собирается вертикальной поверхностью приемного сосуда, можно вносить поправку на воздействие ветра, используя для этого параметры скорости ветра, измеренные одновременно в месте размещения прибора. Интенсивность и

количество осадков измеряются и рассчитываются отдельно для верхнего и бокового приемных сосудов, и скорректированные значения осадков получают посредством средневзвешенного значения, зависящего от скорости ветра.

Оптический измеритель дождевых капель

Ввиду неотъемлемых проблем с занижением, вызываемых ветром и турбулентностью, с обычными измерителями на борту судов и их неспособности измерять осадки в виде снега, существенные усилия были приложены, с тем чтобы разработать оптические измерители распределения дождевых капель (дисдрометры). Всесторонний обзор существующих приборов и принципов измерений представлен в работе Михалидиса (Michaelides 2008). Одним из наибольших преимуществ оптического дисдрометра перед обычными измерителями является их способность измерять объем осадков через распределение частиц по размерам, что, с случае осадков, обычно называется распределением капель по размерам. Оптический дисдрометр для работы на борту судов предпочтительно должен иметь цилиндрическое измерение объема с равномерной подсветкой (в связи с чем используется инфракрасный световой диод). Гидрометеоры, которые проходят через эту толщу, вызывают угасание света, пропорциональное их поперечному сечению. Обычно гидрометеоры расчитывают и сортируют по размеру на этапе интеграции, тем самым позволяя определять выпадение осадков в виде дождя, снега и смешанных осадков, интенсивность и накопление (Klepp, 2015).

Радиолокатор определения осадков

Наблюдения за осадками при помощи радиолокаторов требуют применения узкого пучка радиолучей и поверочных осадкомеров, а также наличия специального оборудования для контроля режима работы локатора и выполнения корректирующих операций. Радиолокаторы, установленные на борту судов для других целей, не имеют этих особенностей и обычно не используются для определения количества осадков.

4.2.2.13 ***Океанские волны***

Основными темами настоящего раздела являются определения и описания поведения волн, а также визуальных методов наблюдения за ними. Автоматизированные методы кратко упомянуты в 4.3, посвященном заякоренным буям, хотя они применяются также для других типов платформ.

4.2.2.13.1 **Определения и описания волнения**

Разгон ветра. Протяженность обширной водной поверхности, над которой дует ветер, имеющий почти постоянное направление и скорость.

Ветровое волнение или ветровые волны. Система волн, наблюдаемых в точке, находящейся в пределах поля ветра, который вызывает волны.

Зыбь. Любая система водных волн, которая вышла за пределы района ее образования (либо наблюдаемая после исчезновения вызвавшего волны поля ветра).

Длина волны. Горизонтальное расстояние между последовательными гребнями или подошвами волны. Оно равно периоду волны, умноженному на ее скорость.

Высота волны. Вертикальное расстояние между подошвой и гребнем волны.

Период волны. Время между прохождением двух последовательных гребней волн через фиксированную точку. Оно равно длине волны, деленной на ее скорость.

Скорость волны. Расстояние, которое проходит волна за единицу времени. Оно равно длине волны, деленной на ее период.

Наблюдение должно включать измерение или оценку следующих характеристик движения волны на поверхности моря для каждой различимой системы волн, т.е. ветрового волнения и зыби (основных и вторичных волн):

a) направление (откуда движутся волны) по шкале 01—36 (как для направления ветра) (см. том I, глава 5);

b) период в секундах;

c) высота.

В качестве руководства должны использоваться следующие методы наблюдения за характеристиками отдельных волновых систем.

Ветровые океанские волны образуются в больших системах, определяемых полем ветра, вызвавшим волнение, и относительным положением точки, в которой производятся наблюдения. Учитывая различие в определениях ветрового волнения и зыби, наблюдатель должен распознавать узнаваемые системы волн, наблюдая за направлением их перемещения, формой и периодом волн.

На рисунке 4.1 показан график, представляющий собой типичную кривую, полученную с помощью волнографа. Кривая показывает высоту поверхности моря, отсчитываемую от фиксированной точки в функции времени, т.е. отражает вертикальные колебания плавающего на поверхности моря тела, как это видит наблюдатель. На графике дана обычная картина волнения на поверхности моря, возмущенной ветром, в результате чего образуется ветровое волнение.

Волны неизменно перемещаются нерегулярными группами с акватории слабо развитого волнения, при этом расстояние между ними составляет от двух или более длин волн. При ветровом волнении нерегулярность больше, чем при зыби. Кроме того, можно наблюдать, хотя это невозможно отразить на волнограмме, что группы, состоящие из двух или более хорошо выраженных волн, при ветровом волнении перемещаются в направлениях, отличающихся друг от друга на 20° или 30°. В результате интерференции пересекающихся волн гребни ветровых волн довольно короткие. Зыбь характеризуется большей регулярностью. Она перемещается в виде достаточно правильных последовательностей в четко выраженном направлении и, как правило, имеет длинные и гладкие гребни. Типичную невозмущенную зыбь можно наблюдать в тех акваториях, где в течение периода времени от нескольких часов до одного дня и более был слабый ветер или полное безветрие. В большинстве районов моря ветровые волны и зыбь смешиваются.

4.2.2.13.2 **Визуальные наблюдения с судов**

Наблюдатель, который пытается наблюдать за характеристиками каждой из распознаваемых волновых систем (ветровых волн и зыби) отдельно, должен иметь в виду тот факт, что более высокие компоненты ветровых волн со сравнительно длинными гребнями и большими периодами похожи на зыбь. Может показаться возможным расчленить скопление волн разной высоты, периода и направлений (образующих вместе систему ветрового волнения) на две разные волновые системы и считать меньшие волны ветровыми, а большие зыбью, однако это может оказаться неправильным.

Различать ветровые волны и зыбь следует, основываясь на одном из нижеследующих критериев:

Направление волн: если среднее направление всех волн с более или менее аналогичными характеристиками (в частности, высотой и длиной) отличается на 30° или более от среднего направления волн, отличных по внешнему виду (в частности, по высоте и/или длине), тогда следует считать, что эти две группы волн принадлежат к разным системам волн.

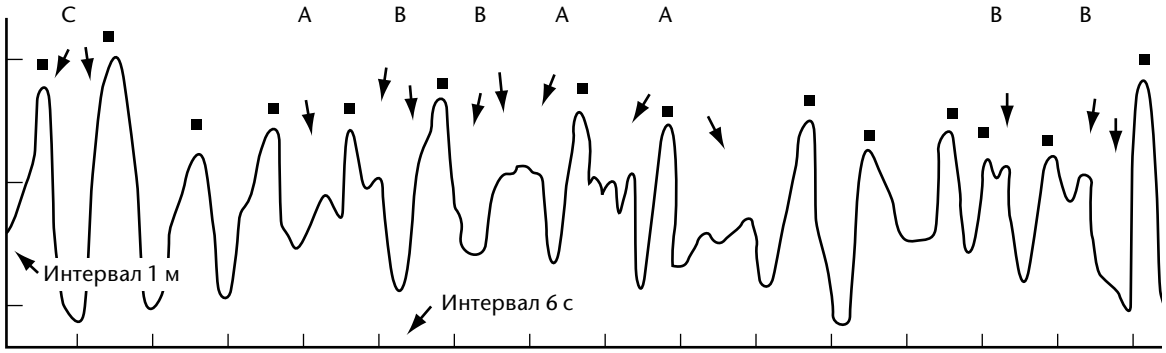


Рисунок 4.1. Типичные волны ветрового волнения и зыби, полученные с помощью волнографа.

Форма и период: когда типичные волны зыби, характеризующиеся регулярной формой и длинными гребнями, появляются под углом приблизительно до 20° от направления ветра, их следует рассматривать как отдельную волновую систему, если их период по крайней мере на 4 с больше, чем период волн большего размера наблюдающегося ветрового волнения.

В целях измерения среднего периода и высоты системы волнения следует рассматривать только характерные волны; это более высокие волны в центре каждой группы хорошо выраженных волн (рисунок 4.1). Низкие и слабо выраженные волны (A) в зоне между группами должны исключаться из волнограммы.

Фактически, требуется средний период и средняя высота приблизительно 15—20 хорошо выраженных волн из центров групп. Разумеется, эти волны не могут быть последовательными. Менее значительные волнообразные возмущения (B), которые, как ясно видно, образуются под воздействием ветра на вершинах волн большого размера, также должны исключаться из волнограммы.

Время от времени встречаются волны, которые буквально возвышаются над обычными волнами (C). Такие волны могут возникать поодиночке или группами из двух или трех волн. Наблюдателю не следует сосредоточиваться только на этих максимальных волнах; для того чтобы определить средний период и среднюю высоту порядка 15—20 волн, ему необходимо учитывать хорошо выраженные волны средней высоты. Следовательно, сообщаемая высота волны будет меньше, чем максимальная высота наблюдаемых волн. В среднем фактическая высота приблизительно каждой десятой волны будет превышать высоту, которую должен сообщить наблюдатель. Обычной практикой является определение высоты характерных волн, измеряемой волнографами в качестве средней высоты одной трети самых высоких волн; следует аппроксимировать высоту волн, которая будет визуально оцениваться наблюдателем.

Наблюдатель должен помнить, что необходимо регистрировать только измерения либо весьма хорошие оценки. Грубые оценки имеют небольшую ценность. Приоритетное значение должно иметь качество наблюдений, а не их количество. Если из трех элементов (направление, период и высота) можно измерить или действительно хорошо оценить только два или даже один, например ночью, их сообщение все же будет ценным.

Эти соображения должны учитываться во всех методах наблюдений, описываемых ниже. Более подробная информация о волнении содержится в *Руководстве по анализу и прогнозированию волнения* (ВМО-№ 702) и 4.3.4—4.3.6 настоящей главы.

Направление, откуда перемещаются волны, легче всего определить, если наблюдатель следит за перемещением гребней, а затем поворачивается на 90° в ту сторону, откуда движутся волны. Таким образом, наблюдатель получает направление распространения волн.

Рекомендованные процедуры для сообщения данных о зыби с проводящих наблюдения судов с неавтоматизированным представлением данных содержатся в приложении 4.C.

Период волны

Если имеется секундомер, то нужен один наблюдатель, либо необходимо иметь двух наблюдателей и часы с секундной стрелкой. Наблюдатель отмечает какой-либо небольшой предмет, плавающий на воде на некотором расстоянии от судна; если таких предметов нет, то, как правило, можно найти ясно видимый клок пены, остающийся заметным в течение нескольких минут, нужных для наблюдений. Секундомер включается в тот момент, когда предмет появляется на гребне волны. По мере продвижения гребня предмет исчезает в ложбине, а затем снова появляется на следующем гребне и т. д. Отмечается время, когда предмет виден на вершине каждого гребня. Наблюдения следует продолжать как можно дольше. Их прекращают тогда, когда предмет вследствие движения судна становится далеким и неразличимым. Очевидно, что продолжительность наблюдений будет наибольшей, если выбрать предмет, находящийся как можно дальше по носу судна, но так чтобы его было четко видно.

Другой метод заключается в наблюдении за двумя и более хорошо выраженными последовательными волнами отдельной группы без остановки секундомера; после прохождения последнего хорошо выраженного гребня группы или перед предполагаемым исчезновением предмета секундомер останавливают, а затем включают вновь при прохождении первого хорошо выраженного гребня новой группы. Наблюдатель подсчитывает общее число периодов волн, пока оно не достигает, по крайней мере, 15—20.

Наблюдения можно также проводить путем отслеживания килевой и бортовой качки носовой части судна. Наблюдатель выбирает точку на самом высоком или самом низком уровне цикла и начинает отсчет времени с нее. Когда она возвращается к той же точке, наблюдатель регистрирует данное время. Посредством повторения этой процедуры несколько раз можно определить надежные данные наблюдения. Этот метод срабатывает также во время ночного наблюдения, когда наблюдатель чувствует подъем и падение ощущениями своего собственного организма.

При измерениях периода волн менее 5 с и малых скоростях ветра такого рода наблюдение может быть затруднено, но такие волны представляют меньший интерес, чем волны с более длинными периодами.

Высота волн

При некотором опыте можно получить весьма надежные оценки. Для оценки высоты волн длиной значительно меньше длины судна наблюдатель должен занять положение на судне как можно ниже, например посередине, где килевая качка минимальна, и на том борту судна, откуда приходят волны. Следует использовать возникающие иногда моменты, когда бортовая качка временно прекращается.

В тех случаях, когда длина волны больше длины судна, вышеизложенный метод не подходит, так как все судно поднимается на волну. В этой ситуации наилучшие результаты получаются тогда, когда наблюдатель перемещается вместе с судном вверх или вниз до тех пор, пока он не окажется на такой высоте, с которой в момент нахождения судна в ложбине при отсутствии крена вершины приближающихся волн будут казаться на одной линии с горизонтом (рисунок 4.2). Тогда высота волны будет равна высоте, на которой находится глаз наблюдателя над уровнем воды (a). В случае бортовой качки необходимо убедиться, что приближающаяся волна находится на одной линии с горизонтом в тот момент, когда судно не имеет крена; в противном случае оценка высоты будет завышена (b).

Несомненно, самый трудный случай, когда длина волны превышает длину судна, а высота волны мала. Лучшая оценка получается, если спуститься как можно ближе к воде, но даже тогда оценка высоты будет лишь приблизительной.

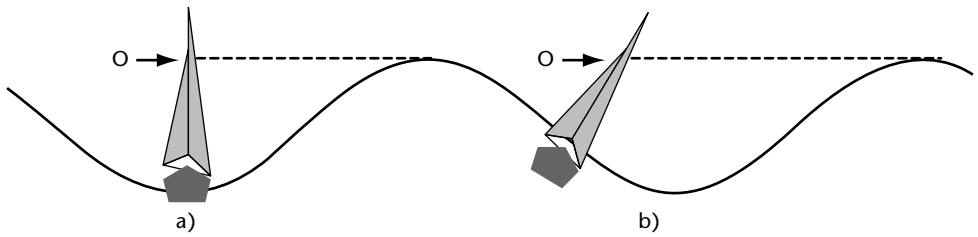


Рисунок 4.2. Влияние крена судна на оценку высоты волн.

4.2.2.13.3 Волнение в прибрежных водах

Дополнительными понятиями, связанными с определением состояния поверхности моря в прибрежных зонах, являются:

Бурун: возникает при обрушении волны в результате продвижения ее на очень мелкую воду глубиной порядка удвоенной высоты волны.

Прибой: волны, обрушивающиеся между береговой линией и наиболее удаленной линией бурунов.

Барашки: наблюдаются при частичном обрушении гребней волн, вызванном воздействием ветра, увеличением крутизны волн при встречном оттоке или приливо-отливном или увеличением крутизны волн из-за набегания на мелководье, недостаточно мелкое, чтобы вызвать буруны.

Нельзя ожидать, что наблюдения за волнением с береговой станции будут репрезентативными для условий в открытом море. Это связано с тем, что на волны влияют глубина, приливы, а также отражение от таких объектов, как крутые скалы или молы. Кроме того, место наблюдения может быть защищено мысами или, с меньшей вероятностью, мелями, при этом и те, и другие могут влиять на высоту волн и направление их перемещения. Эти явления подробно описаны в публикации *The Accuracy of Ship's Meteorological Observations: Results of the VSOP-NA* (WMO/TD-No. 455).

Когда, несмотря на наличие таких трудностей, необходимо провести наблюдения, волны следует выбирать так же, как в открытом море. Если они нужны для исследовательских целей, то необходимо указывать точную среднюю глубину в срок наблюдения и сам срок.

4.2.2.13.4 Терминология для ветровых волн и зыби

Для таких случаев, как передача метеорологической информации и прогнозов для мореплавания, публикаций, лоций и т.п., когда информация не включается в закодированные сообщения, рекомендуется следующая терминология:

Для длины волны зыби:	
короткая	0—100 м
средняя	100—200 м
длинная	более 200 м
Для высоты волны зыби:	
низкая	0—2 м
средняя	2—4 м
большая	более 4 м

Для высоты ветровых волн:

полный штиль (спокойная поверхность)	0 м
штиль (рябь)	0—0,1 м
сглаженное волнение (небольшие волны)	0,1—0,5 м
слабое волнение	0,5—1,25 м
умеренное волнение	1,25—2,5 м
сильное волнение	2,5—4 м
очень сильное волнение	4—6 м
высокое волнение	6—9 м
очень высокое волнение	9—14 м
исключительно сильное волнение	более 14 м

Во всех случаях точное граничное значение длины или высоты включается в более низкую категорию; так, например, если высота ветровых волн 4 м, то отмечается сильное волнение. Когда состояние морской поверхности такое сложное, что ни один из вышеуказанных описательных терминов не подходит, следует пользоваться термином «нерегулярное волнение».

4.2.2.14 ***Лед***

В море встречается несколько форм плавающего льда. Самая распространенная форма — это лед, образовавшийся в результате замерзания поверхностного слоя воды, а именно морской лед. Сообщение данных о морском льде рассматривается в *Номенклатуре ВМО по морскому льду* (ВМО-№ 259).

Другие формы — это речной лед и лед материкового происхождения. Речной лед встречается в гаванях и эстуариях, где он находится в движении за счет приливных течений и, как правило, лишь временно является помехой для судоходства. Лед материкового происхождения в виде айсбергов рассматривается отдельно ниже.

Как айсберги, так и морской лед могут представлять опасность для судоходства и всегда влияют на навигацию. Кроме того, морской лед влияет на обычные процессы энергетического обмена между океаном и атмосферой над ним. Протяженность морского ледяного покрова может существенно различаться в разные годы и в большой степени влиять как на соседние океанские акватории, а также на погоду на больших территориях земного шара. Поэтому распространение льда представляет значительный интерес для метеорологов и океанографов. Хотя широкомасштабные наблюдения за распространением морского льда изменились революционным образом за счет использования изображений со спутников, наблюдения на береговых станциях, судах и с самолетов по-прежнему играют важную роль при детальных наблюдениях и привязке спутниковых наблюдений к подлинным данным наземных наблюдений.

Наблюдения за плавучим льдом в настоящее время почти полностью основываются на визуальной оценке. Инструментальные наблюдения выполняются только обычным радиолокатором и такими методами, как пассивные микроволновые датчики и бортовые радиолокаторы бокового обзора. Однако айсберги плохо отражают лучи радиолокаторов и их не всегда можно обнаружить с помощью этой техники.

4.2.2.14.1 **Наблюдения за обледенением**

Обледенение может быть чрезвычайно опасно из-за своих последствий для малых судов, в частности для судов водоизмещением брутто приблизительно 1 000 тонн. Даже

на более крупных судах в результате обледенения антенн может выходить из строя радиоаппаратура и радиолокаторы. Может также ухудшаться видимость с мостика. Возникали проблемы из-за обледенения грузов, находящихся на палубе больших контейнеровозов. Помимо возможного воздействия на остойчивость судна, обледенение может вызывать трудности при разгрузке судна в порту назначения, когда контейнеры и их найтовы накрепко примерзают к палубе. Рыболовецкие суда особенно уязвимы к обледенению. Более подробная информация дается в публикации *The Accuracy of Ship's Meteorological Observations: Results of the VSOP-NA* (WMO/TD-No. 455); а что касается метеорологических аспектов, то подробности можно найти в публикации *The Meteorological Aspects of Ice Accretion on Ships* (WMO-No. 397).

В море встречается два основных вида обледенения: вследствие замерзания морской воды и вследствие замерзания пресной воды. Первое происходит в результате попадания брызг морской воды, возникающих при взаимодействии судна или установки с волнами, а также в результате попадания брызг, сдуваемых с гребней волн, либо по той и другой причинам одновременно. Пресноводное обледенение может быть вызвано замерзающим дождем и/или моросью; и иногда обледенение вызывает мокрый снег при последующем понижении температуры; обледенение также может возникнуть в результате замерзания тумана. И тот, и другой виды обледенения могут иметь место одновременно.

Наиболее важными метеорологическими элементами, влияющими на обледенение в море, являются скорость ветра и температура воздуха. Чем выше скорость ветра относительно судна и чем ниже температура, тем больше скорость нарастания льда. По-видимому, не существует предельной температуры воздуха, ниже которой уменьшается риск обледенения.

В кодовой форме ВМО (*Наставление по кодам* (ВМО-№ 306), том I.1 и том I.2), применяемой для передачи по радио метеосводок с судов, находящихся в море, предусмотрено включение сведений об обледенении. Эта информация может даваться либо в коде, либо открытым текстом. В одной пятизначной группе кодовая форма дает возможность передавать сведения о причинах обледенения, толщине и скорости нарастания льда. Сводкам открытым текстом должно предшествовать слово «ICING», и особенно ценными являются сводки, содержащие характеристики обледенения, опасные для судов.

4.2.2.14.2 **Формирование и развитие морского льда**

Лед толщиной менее 30 см

Первым признаком образования льда является появление маленьких ледяных игл или пластинок в верхнем слое воды толщиной несколько сантиметров. Эти иглы, которые так и называются — ледяные иглы, образуются в больших количествах и придают морской воде маслянистый вид. По мере понижения температуры ледяные иглы срастаются и образуют ледяное сало, которое имеет матовый оттенок. Если на поверхность воды, близкую к замерзанию, но все еще свободную от льда, выпадает снег, то она может покрыться слоем снежуры. Под действием ветра и волн эти формы могут видоизменяться, образуя шугу, и все они классифицируются как начальные виды льда. При дальнейшем выхолаживании в зависимости от его скорости и солености воды образуются ледяная корка (склянка) или нилас. Склянка образуется, когда вода с низкой соленостью замерзает в виде тонкого слоя хрупкого льда, который почти не содержит соли, в то время как при замерзании воды с высоким содержанием соли, особенно если это происходит быстро и при слабом ветре, образуется лед, обладающий эластичностью, — нилас. Этот вид льда в зависимости от толщины подразделяется на темный и светлый нилас; вторая, более развитая форма, достигает максимальной толщины 10 см.

Под действием ветра и волн склянка или нилас могут ломаться, образуя блинчатый лед, который впоследствии смерзается и утолщается, образуя серый и серо-белый

лед, достигающий со временем толщины 30 см. Эти виды льда объединяют под общим названием — молодой лед. При штормовой погоде лед может ломаться, образуя мелкобитый лед или ледяные поля разных размеров.

Лед толщиной от 30 см до 2 м

Следующий этап развития льда, известный как однолетний лед, подразделяется на три категории: тонкий, средний и толстый. Тонкий однолетний лед имеет толщину 30—70 см, средний — от 70 до 120 см, толстый однолетний лед в полярных районах к концу зимы может достигать толщины приблизительно 2 м.

Старый лед

Толстый однолетний лед, сохранившийся в течение летнего сезона таяния, классифицируется как старый лед. Этот лед подразделяется на двухлетний и многолетний в зависимости от того, сколько летних сезонов пережили ледяные поля. Перед наступлением сезона таяния толщина старого льда обычно колеблется от 1,2 до 3 м и более. К концу летнего сезона таяния толщина старого льда может значительно уменьшаться. Старый лед часто можно распознать по голубоватой поверхности, в то время как однолетний лед имеет зеленоватый оттенок.

Снежный покров

Зимой лед, как правило, покрывается снегом, который изолирует его от воздуха и замедляет скорость его роста. В зависимости от климатических условий высота снежного покрова в разных районах существенно различается. Высота снежного покрова может также сильно меняться на небольших расстояниях в зависимости от ветра и топографии льда.

Разрушение морского льда

Пока сохраняется снежный покров, в окружающее пространство отражается почти 90 % приходящей радиации. Однако с началом лета, когда температура воздуха поднимается выше 0 °C, снег начинает таять и на поверхности образуются пресноводные снежницы. Снежницы поглощают приблизительно 90 % приходящей радиации и быстро увеличиваются по мере таяния окружающего снега и льда. В конце концов снежницы проникают до нижней поверхности ледяных полей, и образуются так называемые проталины. Такой медленный процесс разрушения характерен для льдов Северного Ледовитого океана и морей, в которых движение ограничено береговой линией или островами. Там же, где лед свободно дрейфует в более теплые воды (например, в Антарктике, в восточной части Гренландского моря и в море Лабрадор), процесс разрушения льда ускоряется за счет волновой эрозии и более высокой температуры воздуха и воды.

Движение морского льда

По своей подвижности морской лед делится на два основных типа. Один тип — это дрейфующий лед, который находится в непрерывном движении под действием ветра и течений, второй — это припай, т.е. лед, прикрепленный к берегу или островам и остающийся неподвижным. Когда сплоченность льда достигает высокой степени, т. е. 7/10 или более, то термин «дрейфующий лед» может заменяться на термин «паковый лед».

Напор ветра на дрейфующий лед заставляет ледяные поля двигаться приблизительно в направлении ветра. Под воздействием отклоняющей силы вращения Земли (силы Кориолиса) в северном полушарии ледяные поля отклоняются приблизительно на 30° вправо от направления приземного ветра. Поскольку приземный ветер сам отклоняется на ту же величину, но в противоположном направлении от геострофического ветра (дующего по изобарам), то направление движения ледяных полей вследствие только ветрового дрейфа можно считать параллельным изобарам.

Скорость ветрового дрейфа льда меняется не только в зависимости от скорости ветра, но также от сплоченности дрейфующего льда и степени его деформации (см. подраздел ниже). Очень разреженный лед (1/10—3/10) может более свободно перемещаться под действием ветра, чем сплоченный лед (7/10—8/10), когда свободное пространство ограничено. Скорость дрейфа сплоченного льда, вызванного ветром, в среднем составляет 2 % скорости ветра, а скорость дрейфа разреженного льда может быть значительно больше. Поскольку дрейфующий лед находится на плаву, на него воздействуют устойчивые по направлению течения, существующие в верхних слоях океана, независимо от того, являются ли они приливными по своей природе или вызваны другими силами. Зачастую очень трудно определить, чем вызван дрейф — ветром или течением, но, когда действуют обе силы, результирующее движение представляет собой векторную сумму того и другого. Преобладающий вклад обычно вносит напор ветра, особенно в оффшорных районах.

Деформация морского льда

Когда лед подвергается давлению, поверхность его деформируется. В результате, если это начальные виды льда или молодой лед, могут возникнуть наслоения, когда ледяное поле надвигается на соседнее; в случае более толстого льда в зависимости от того, какие силы сжатия оказывают влияние, могут возникнуть гряды льда и торосы. В процессе образования торосов и гряд льда, когда куски льда нагромождаются выше общего его уровня, большие массы льда погружаются, чтобы поддерживать тяжесть гряд и торосов. Подводная часть гряд может быть в 3—5 раз больше их надводной части, и поэтому такие деформации являются серьезным препятствием для судоходства. Вновь образовавшиеся гряды, как правило, менее опасны для судоходства, чем подвергшиеся атмосферным влияниям старые и монолитные гряды.

4.2.2.14.3 **Айсберги**

Айсберги представляют собой большие массы плавающего льда, отколовшиеся от ледников, в том числе от шельфовых. Глубина подводной части айсберга по сравнению с надводной колеблется в широком диапазоне в зависимости от вида айсбергов. Подводная масса антарктических айсбергов, отколовшихся от находящегося на плаву шельфового льда, как правило, меньше, чем подводная масса айсбергов, отколовшихся от ледников Гренландии. У типичного столообразного антарктического айсберга, самая верхняя часть которого высотой 10—20 м состоит из старого снега, над поверхностью видна, как правило, одна часть его массы, а пять частей находятся под водой; у арктического айсберга со значительно меньшим количеством снега, состоящего почти полностью из льда, это соотношение, как правило, составляет 1:8.

Размеры айсбергов уменьшаются тремя путями: откалывание, таяние и волновая эрозия. Когда от него откалывается кусок льда, говорят об обрушении айсберга; это нарушает его равновесие, в результате чего он может поплыть под другим углом или опрокинуться. Характерной чертой айсбергов являются большие подводные выступы, которые трудно заметить. В холодной воде айсберг тает в основном по ватерлинии, в то время как в теплой воде — снизу и часто раскалывается. Особенно опасно приближаться к тающему в теплой воде айсбергу, поскольку он неустойчив, может расколоться или опрокинуться в любой момент. Вокруг быстро разрушающихся айсбергов может находиться много обломков и небольших айсбергов, представляющих особую опасность для судоходства.

Айсберги плохо отражают лучи радиолокаторов и поэтому не всегда могут быть обнаружены с их помощью. Фрагменты их разрушения (обломки и небольшие айсберги) зачастую еще труднее обнаружить с помощью судового радиолокатора, так как они скрываются за фоновыми помехами, создаваемыми ветровыми волнами и зыбью. Эти мелкие обломки особенно опасны для судов, так как несмотря на низкий профиль, масса их достаточно велика, чтобы повредить судно, которое сталкивается с ними на обычной крейсерской скорости. Некоторые небольшие айсберги из чистого льда почти не видны на поверхности воды, и их крайне трудно обнаружить.

4.2.2.14.4 **Наблюдения за морским льдом и айсбергами**

Ключом к хорошим наблюдениям за льдом является хорошее знание номенклатуры льдов и опыт работы. Для моряков лучшим руководством по определению льдов является иллюстрированная публикация *Номенклатура ВМО по морскому льду* (ВМО-№ 259).

На судоходство влияют следующие четыре важные характеристики морского льда:

a) толщина: стадия развития (а именно начальные виды льда, молодой лед, однолетний лед или старый лед, а также виды, на которые они подразделяются);

b) количество: сплоченность (оцениваемая десятыми долями поверхности моря, покрытой льдом);

c) вид льда, как-то припай или дрейфующий лед, и размер составляющих ледяных полей;

d) движение: особенно с учетом его влияния на деформацию.

Поскольку айсберги представляют собой опасность для судоходства, особенно ночью или при плохой видимости, важно также сообщать количество айсбергов, находящихся в поле зрения во время наблюдения, особенно в водах, где они наблюдаются редко.

Информация о морском льде может передаваться открытым текстом или с использованием кодов. В ВМО для международного использования приняты два кода для морского льда. Самой простой является группа ICE, прибавляемая к кодовой форме SHIP. Код ICEAN был разработан для использования его специалистами в целях передачи результатов анализа и прогноза морского льда.

Существуют два основных правила наблюдений на судах и береговых станциях:

a) обеспечивать широкое поле обзора путем производства наблюдений с максимально высокой точки над поверхностью моря (например, с верхней части маяка, с мостика или с марсовой площадки судна);

b) не пытаться передавать информацию о состоянии морского льда за пределами радиуса, равного более половины расстояния между точкой наблюдения и горизонтом.

ВМО разработала систему обозначений для нанесения на карты фактической или прогнозируемой ледовой обстановки. Эти обозначения предназначены для международного обмена информацией о морских льдах, а также для радиофаксимильной передачи ледовых данных.

4.2.2.15 ***Наблюдения за особыми явлениями***

Морские наблюдатели могут передавать сводки о природных явлениях, используя традиционные или определенные электронные судовые журналы. Однако такие специальные наблюдения обычно не могут распространяться по ГСТ вследствие международных ограничений формата. Наблюдения могут иметь форму письменных описаний, эскизов или фотографий, или их сочетания. Целый ряд различных явлений могут быть переданы, включая:

a) астрономические явления (например, затмения, кометы, зодиакальный свет, солнечные пятна и карликовые новые звезды);

b) явления в верхней атмосфере (например, замирание или непрохождение радиосигнала, магнитные возмущения и бури, свечение атмосферы, полярное сияние, метеоры или шаровидные молнии, серебристые облака);

c) явления в нижней атмосфере (например, аномальная рефракция и миражи, глория или разорванные спектры, окрашенное солнце или луна, ореолы, огни Эльма, сумеречные лучи, выпадение пыли, зеленые лучи, гало, светящееся облако, молния, радуга, сцинтилляция, необычная окраска неба и водяные смерчи). Следует отметить, что при описании водяных смерчей направление вращения следует всегда указывать так, как будто это видится сверху;

d) случаи наблюдения морских млекопитающих, птиц, рыб, беспозвоночных и эффектов массового планктона таких как биолюминесценция, красные приливы и вода, изменившая натуральный цвет;

e) другие морские явления (например, необычные случаи отклонения стрелки компаса, изменения уровня моря или волнения).

Национальные издания или информация, сопровождающая электронные судовые журналы, содержат сведения о том, какие именно явления представляют интерес, и какая информация требуется для передачи сообщений о конкретных типах явлений.

4.3 ЗАЯКОРЕННЫЕ БУИ

Заякоренные буи характеризуются широким разнообразием конфигураций (например, с точки зрения конструкции заякоривания, типов датчиков, схем выборки, техники подъема, телеметрии и т. д.), обслуживающих целый ряд оперативных и исследовательских применений и дисциплин. Главное внимание в настоящем разделе, в котором не содержится информации о широком спектре современных функционирующих систем, уделяется требованиям к морским метеорологическим измерениям с оперативных метеорологических заякоренных буев. С информацией, касающейся других систем, связанных с требованиями к другим применениям и научным исследованиям, можно ознакомиться в других публикациях (например, Bradley and Fairall, 2006) и на веб-сайтах:

— СКОММОПС: http://www.jcommops.org/;

— тропические заякоренные буи АТЛАС: http://www.pmel.noaa.gov/tao/proj_over/mooring.shtml;

— океанские климатические станции: https://www.pmel.noaa.gov/OCS/;

— тропические заякоренные буи ТРИТОН в западной части Тихого океана: http://www.jamstec.go.jp/jamstec/TRITON/real_time/php/top.php;

— Глобальная система заякоренных буев: https://www.pmel.noaa.gov/gtmba/;

— OceanSITES эталонные заякоренные буи: http://www.oceansites.org;

— буи для наблюдений за цунами: http://www.ndbc.noaa.gov/dart/dart.shtml;

— буи для наблюдений за волнением: http://www.jcomm.info/wet.

Более современные заякоренные буи м-ТРИТОН в Индийском океане:
– http://www.jamstec.go.jp/iorgc/iomics/index.html

Типичный морской метеорологический заякоренный буй оборудован датчиками для измерения следующих переменных:

a) скорость ветра;

b) направление ветра;

c) атмосферное давление;

d) ТПМ;

e) высота и период волн;

f) температура воздуха;

g) температура точки росы или относительная влажность.

Дополнительные элементы, измеряемые некоторыми заякоренными буями, могут включать:

a) максимальный порыв ветра;

b) волновой спектр (направленный или ненаправленный);

c) солнечная радиация (направленная вниз коротковолновая радиация);

d) поверхностное течение или профили течения;

e) соленость поверхностного слоя;

f) подповерхностная температура и соленость на глубине до 500 м или 750 м;

g) атмосферная видимость;

h) осадки;

i) приземная концентрация CO_2;

j) уровень pH поверхности океана;

k) активная радиация фотосинтеза;

l) флуоресценция и мутность;

m) параметры качества воды.

Что касается волн, то обычно измеряются или оцениваются приведенные ниже переменные; при этом используются следующие определения (см. также 4.2.2.13 для дополнения этих определений):

Характерная высота волн. Оценка средней высоты одной трети наиболее высоких волн;

Максимальная высота волн. Максимальная высота одной волны, наблюдаемая за определенный период времени;

Средний период прохождения волнами нулевого уровня. Период волн, соответствующий прохождению нулевого уровня высоты поверхности. Он также может оцениваться по второму порядку частоты спектра волновой энергии;

Пиковая высота. Высота волны, соответствующая пику спектра волновой энергии (часть спектра с наивысшей энергией волны);

Пиковый период. Период волн, соответствующий пиковой высоте спектра волновой энергии;

Период волнового спектра. Период волн, соответствующий средней частоте спектра.

Помимо метеорологических и океанографических измерений необходимо следить за местоположением буев, с тем чтобы выявлять, когда они дрейфуют, чтобы соответствующие ведомства могли быть уведомлены о том, что они не представляют собой опасности для судоходства. Также полезно осуществлять мониторинг различных параметров их состояния и технических параметров с целью контроля качества данных и технического обслуживания. Технология использования заякоренных буев в настоящее время усовершенствована до такой степени, что технически возможна работа буев в точке на протяжении периода до двух лет даже в самых суровых условиях. Продолжительность оперативной жизни буя определяется в основном сроком службы датчиков, которые часто заменяются через 24 месяца. Общие практики для минимизации неисправностей в системах буев включают использование медной ленты и пасты на основе окиси цинка на приборах раз в 24 месяца.

В настоящее время считается, что наблюдения с заякоренных буев являются более качественными, чем наблюдения с судов, с точки зрения точности и надежности измерений (Wilkerson и Earle, 1990; Ingleby, 2010). Действительно считается, что заякоренные буи обычно сообщают данные наблюдений высшего качества в широком диапазоне морских метеорологических переменных, и помимо их использования прогнозистами и включения в модели численного прогнозирования погоды (ЧПП) эти данные могут быть также использованы для получения информации о климатологии океанических районов, эталонных данных, прошедших «наземную проверку», для калибровки/валидации спутников и оценки приземных потоков (например, Bourras, 2006).

Недавно сформированные сети заякоренных буев имеют возможности для измерения подповерхностных параметров для более глубокого понимания взаимодействия воздуха и моря.

Надежность в работе представляет собой ключевое требование к приборам, которые используются в заякоренных буях в море для мониторинга циклонов, поскольку датчики, которые не обладают достаточной эффективностью работы, могут серьезным образом сказаться за гражданской защите, а дополнительно также привести к затратным ремонтным работам и переустановке. Недавние изменения в части отбора приборов и практик применения, основанных на опыте глобального научного сообщества, привели к повышению эффективности работы в море (Venkatesan et al., 2015).

Ниже приводятся типичные погрешности измерений, проведенных с оперативных метеорологических и океанографических буев:

скорость ветра	1 м·с$^{-1}$ или 5 % для показателя более 20 м·с$^{-1}$
направление ветра	10°
температура ветра	0,2 °C
давление на уровне моря	0,2 гПа
ТПМ	0,2 °C
температура	0,5°
характерная высота волн	10 % или 0,2 м
направление волн	10°
период волн	1 с

Стандартный комплект датчиков, установленный на заякоренных оперативных метеорологических и океанографических буях, осуществляет измерения скорости ветра, максимального порыва ветра (например, порыв ветра в течение 3—5 секунд, в зависимости от национальных требований); направления ветра; барометрического давления; температуры воздуха; температуры воды; и характерная высота волн и пиковый (или средний) период волны. Некоторые буи также измеряют (направленные и ненаправленные) спектры энергии волн.

4.3.1 Атмосферное давление

Атмосферное давление и его изменчивость как во времени, так и пространстве, имеют исключительно важное значение для ЧПП и для анализа и прогнозирования. Измерение атмосферного давления на большинстве буев осуществляется при помощи цифровых барометров (см. том I, глава 3). Проводятся следующие измерения давления:

a) давление на уровне станции — это фактическое измерение при помощи барометра на заякоренном буе в гПа; в некоторых случаях могут использоваться два барометра, и их значения усредняются;

b) давление на уровне моря — это давление, приведенное к уровню моря на высоте измерения, выраженное в единицах гПа. Для установленных в море заякоренных буев эта величина весьма близка к давлению на уровне станции. Однако может наблюдаться большое различие между давлением на уровне моря и давлением на уровне станции, данные о котором поступают с буев, размещенных на озерах, находящихся на большой высоте. Преобразование в давление на уровне моря осуществляется с использованием процедур, описанных в WBAN (United States Weather Bureau, 1963).

Многие буи, размещенные в регионах, подверженных ураганам или воздействиям интенсивных систем низкого давления, способны измерять дополнительные данные среднего давления за одну минуту. Эти данные регистрируются после того, как почасовые данные о давлении становятся ниже предопределенного порогового значения (например, 1 008 гПа в тропиках). Полусуточный период изменения давления может использоваться для выявления циклонов. Давление воздуха показывает два пиковых и два низких значения в сутки, и наиболее высокое и наиболее низкое значения давления практически повторяются в тот же период в течении полусуточных колебаний. Сокращение полусуточного колебания в течении прохождения циклона могло бы использоваться для выявление циклона/системы низкого давления. Этот метод может усовершенствовать алгоритм выявления циклона.

Ниже приводятся условия получения дополнительных данных о давлении:

a) минимальное барометрическое давление за минимум одну минуту в гПа, показанное первым (и вторым, если он установлен) барометром — это минимальное среднее барометрическое давление за одну минуту в течение часа;

b) время — это минута в течение часа, когда наблюдается минимальное давление.

Ветер зачастую может вызывать динамические изменения давления, что воздействует на считывание показаний барометра. Входное отверстие барометра должно размещаться там, где воздействие ветра минимально. Барометрическое давление как правило измеряется из входного отверстия, расположенного в 3 м над поверхностью моря.

4.3.2 Измерения ветра

Измерения ветра являются самыми важными измерениями, которые проводятся с заякоренных буев. Они имеют существенное значение для морских синоптиков.

Определения:

Направление ветра. Это направление, откуда дует ветер, выраженное в градусах по часовой стрелке от истинного севера. Это средний векторный показатель направления ветра.

Скорость ветра. Это средняя скалярная величина скорости ветра за выборку (обычно стандартный 10-минутный период).

Максимальная скорость ветра. Это наивысшая, документально зарегистрированная скорость ветра. Порывы ветра определяются по высшей скользящей средней величине, зарегистрированной в течение короткого интервала времени (например, 5 с).

Измерение ветра обычно производится при помощи крыльчатого или чашечного анемометра и флюгера. Для предотвращения механического износа на заякоренных буях сейчас, как правило, практикуется использование ультразвуковых датчиков скорости и направления ветра, не имеющих никаких подвижных частей, при котором измерение направления ветра обычно производится при помощи компасного пеленга таким образом, чтобы направление относительно буя поддавалось коррекции для получения истинного направления. Высота датчика ветра различается в зависимости от буев различного размера, поэтому важно, чтобы высота датчика (3 м над СУР) сообщалась в данных BUFR (ТМ3-15-008), обмен которыми производится по ГТС, с тем чтобы пользователи могли расчитать производное эквивалентное скорости ветра 10 м.

Четырехлопастной роторный датчик-флюгер на метеорологических заякоренных буях, как правило, используется в некоторых сетях заякоренных буев. Конечные измерения — это статистические оценки параметров ветра на основе временных рядов мгновенных выборочных измерений ветра, проведенных с минимальной частотой 1 герц (Гц) за конкретный период времени. Скорость дискретизации является функцией номинальной нагрузки. На большинстве заякоренных буев используется 8-минутный период сбора данных. Стандартные измерения ветра производятся каждый час.

В некоторых сетях метеорологические заякоренные буи осуществляют статистическую обработку данных в конце периода их сбора, а итоговое сообщение обновляется при помощи новых статистических данных и шести 10-минутных сегментов. Статистическая обработка включает расчет среднего значения как параметров направления и скорости, так и стандартного отклонения скорости. Почасовые данные не представляют собой данные от нулевой минуты до 59-ой минуты. Они представляют собой скорее самые последние полные шесть 10-минутных сегментов до конца последнего сбора данных. В то же время обязательным является отсчет 10-минутных сегментов от 0, 10, 20 и так далее минут.

В случае заякоренных буев некоторых сетей, измерения скорости ветра производятся на уровнях в 3 м и 4 м, а скорости ветра на 10 и 20 м выше площадки измерения выводятся при помощи алгоритма (Liu et al., 1979), используя высоту анемометра, скорость ветра, постоянную относительную влажность в 85 %, постоянное давление на уровне моря 1 013,25 гПа, и температуру воздуха и воды. Если отсутствуют данные о температуре либо воздуха, либо воды, то предполагается нейтральная стабильность с учетом того, что нейтральная стабильность может вызвать ошибку до 5 %. Если отсутствуют оба этих параметра, то скорость ветра не определяется ни на высоте 10 м, ни на высоте 20 м над уровнем площадки.

Некоторые страны эксплуатируют заякоренные буи, традиционно используя чашечный анемометр и флюгер с самостоятельной ориентацией для измерения скорости и направления ветра за 10-минутный период сбора данных до начала каждого часа. Однако во время работы соленая вода проникает через уплотнения, и фактически происходит сбой в работе приборов, когда кристаллы соли образуются в смазочном материале, что ведет к механической поломке движущихся частей. Эти заякоренные буи сейчас заменены новыми ветровыми системами, которые используют акустический анемометр и электронный компас. Для дальнейшего повышения надежности заякоренные буи оснащаются двойными системами измерения параметров ветра для повышения устойчивости к воздействию внешней среды в случае поломки анемометра (Turton and Pethica, 2010).

4.3.3 Температура

Температура — это одно из основных метеорологических измерений. Для проведения измерений температуры обычно используются электронные термисторы, градуированные в градусах Цельсия (°C). Измерения температуры могут также быть использованы для выведения давления на уровне моря и скорости ветра на стандартной высоте по измерениям атмосферного давления и ветра на нестандартной высоте, соответственно.

4.3.3.1 *Температура воздуха*

Измерения температуры воздуха, как правило, являются весьма надежными; однако важно отметить, что физическая позиция датчиков температуры может негативно воздействовать на проводимые измерения. Защитные оболочки датчиков температуры могут стать причиной нерепрезентативных отсчетов в условиях слабого ветра (Национальный центр буев для сбора данных (НЦБСД), 2003*a*). Выборочные измерения температуры воздуха проводятся с частотой, установленной в период выборочных измерений (обычно 1 Гц или 0,1 Гц). Температура воздуха обычно измеряется наряду с ОВ, и разрешение составляет 0,1 °C. Некоторые операторы буев также используют температурные датчики высокого разрешения, порядка 0.000 1 °C. Такие датчики в первую очередь используются для подводных применений.

4.3.3.2 *Температура воды*

Хотя с измерениями температуры воды связано, как правило, мало проблем, следует отметить, что глубина погружения датчиков температуры воды меняется в зависимости от корпуса буя и что датчики температуры на буях часто крепятся к внутренней части корпуса. Поскольку корпуса буев характеризуются высокой теплопроводимостью, то измеряемые температуры могут соответствовать средней температуре воды вокруг погруженного в воду корпуса, а не температуре воды вблизи датчика. В весьма стратифицированном слое воды, особенно в полуденные часы в условиях спокойного ветра, температура воды, сообщаемая с буя, может быть на 2—3 °C ниже ТПМ воды. Это значение может также быть искаженным ввиду биозагрязнения. Значительная часть датчиков для долгосрочных измерений подводной температуры имеет высокое разрешение порядка 0.000 1 °C. Температурные значения, указываемые другими датчиками, такими как измерители течения, устанавливаемые в различных точках, могут подвергаться сравнениям для оптимальных измерений. Международная шкала температуры 90 г. обычно применяется для измерения температуры воды.

4.3.4 Оценки океанских волн

Оценки состояния моря являются, вероятно, самыми сложными измерениями, которые проводятся с заякоренных буев, и они имеют исключительно важное значение для морских прогнозистов, мореплавателей, инженеров океанских судов и сооружений, а также ученых. При использовании буя все основные измерения волнения осуществляются определенным образом на основе временного ряда движения буев. Полная информация об измерениях волнения представлена НЦБД Национального управления США по океанам и атмосфере (НУОА) (2003a, 2003b, 2009).

Состояние моря — это описание характеристик волн на поверхности моря в данное время и в данном месте. Его можно было бы представить в виде волнового спектра или более просто — в показателях характерной высоты волн и определенном измерении периода волн (AMS, 2000). Многие заякоренные буи проводят измерение плотности спектральной изменчивости (Frigaard et al., 1997), которая будет упоминаться в качестве спектральной плотности волн. На большинстве буев все не связанные с направлением параметры волнения, высот и периодов, крутизны и т. д. выводятся из спектральных плотностей волнения. Кроме того, многие буи измеряют спектральные направленные компоненты, определяемые средними значениями направления, распространения, ассиметрии и

эксцесса, которые определяют четыре коэффициента Фурье (функционально связанные с каждой частотой), которые рассылаются центрами посредством заякоренных буев ВМО BUFR образец ТМ 315008 (см. *Наставление по кодам* (ВМО-№ 306)).

4.3.5 Оценки ненаправленного волнения океана

На большинстве буев для измерения их перемещения используются акселерометры или датчики движения. Датчики крепятся таким образом, чтобы оставаться в вертикальном положении по отношению к корпусу буя или в стабильном параллельном положении по отношению к земной вертикали, и таким образом осуществляется подавляющее большинство измерений волнения океана. Вертикальная стабилизация в тех случаях, когда она применяется, достигается благодаря использованию датчиков перемещения, килевой и бортовой качки, эталонная плоскость которых монтируется на платформе со стабилизацией гравитации и обеспечивает естественный период порядка 40 с. Этот тип оборудования является дорогостоящим и имеет встроенную механическую систему для сохранения вертикального положения акселерометра в случае наклона буя и датчика.

Оперативные системы измерения ненаправленного волнения сообщают оценочные данные об ускорении или спектрах перемещения. При отсутствии прямых данных о них спектры перемещения выводятся на основе спектров ускорения в качестве части расчетов, связанных с обработкой данных о волнении на берегу. На основе этих спектров рассчитываются средний период волн, их доминирующий период, характерная высота и крутизна волн. Эти параметры ненаправленного волнения определяются, как указано далее.

Средний период волн, выраженный в секундах, может быть рассчитан разными способами. Это может быть период, который соответствует частоте волн, согласно которой их спектр делится на равные зоны, или он может быть основан на моменте второго порядка частоты спектральной ненаправленной плотности. Он может быть также оценен посредством метода пересечения нуля.

Доминирующий период волн или пиковый период волн, выраженный в секундах, — это период волн, соответствующий центральной частоте полосы частот при максимальной ненаправленной спектральной плотности.

Характерная высота волн H_{m0} оценивается по изменчивости перемещения волн, выведенному из спектра перемещения в соответствии со следующим уравнением:

$$H_{m0} = 4\left[\int_{f_1}^{f_u} S(f)\,df\right]^{\frac{1}{2}}$$

где: $S(f)$ — это спектральная плотность перемещения; df — ширина частотной полосы; f_u — верхний предел частоты; f_1 — нижний предел частоты.

4.3.6 Оценки направленных океанских волн

Системы измерения направленного движения волн требуют, помимо параметров вертикального ускорения или движения (перемещения), измерения азимута буя, килевой и бортовой качки. Эти данные позволяют рассчитать восточный-западный и северный-южный волновой уклон. На большинстве буев используется несколько разных методов и комплектов датчиков для измерения этих углов.

Для обслуживания всего диапазона пользователей рекомендуется (Swail et al., 2010*a*; Swail et al., 2010*b*), чтобы системы измерения направленного спектра волн позволяли надежно оценивать так называемый стандарт «First 5». С технической точки зрения речь идет о пяти определяющих переменных для конкретной частоты волн (или периода волн). Первой переменной является энергия волн, которая связана с их высотой, а остальными четырьмя

являются первые четыре коэффициента ряда Фурье, которые дают оценку бесконечного ряда значений, которое описывает направленное распределение этой энергии. Для каждой полосы частот определяется не только направление волн, но также и их дисперсия (момент второго порядка), их асимметрия (момент третьего порядка) и куртозис (четвертый момент). Асимметрия показывает то, каким образом сконцентрировано распределение по направлениям (налево или направо от среднего значения), а куртозис определяет пиковость распределения. Получение этих трех дополнительных параметров (дисперсия, асимметрия и куртозис) для каждой полосы частот позволяет улучшить репрезентативность волнового поля.

Данные измерений волнения с заякоренных буев также используются для оценки и валидации измерений волн, полученных при помощи высокочастотных радаров и радаров диапазона В, а также соответствующих и космических приборов.

4.3.7 Высота водного столба для обнаружения цунами

Большинство установленных на буях цунаметров сообщают об уровне воды (фактически высота водного столба) на основе измерений давления и температуры на дне моря и преобразованных в высоту водного столба путем умножения величины давления на абсолютную константу 670 мм на 1 фунт на 1 квадратный дюйм.

4.3.8 Относительная влажность

Датчики влажности, используемые на буях, включают цепь, которая измеряет влажность благодаря изменению емкости тонкого полимера, подверженному колебаниям водяного пара. Газопроницаемая мембрана защищает электронные части от водных брызг и частиц, но пропускает воздух в защитную оболочку прибора. Чувствительный к температуре датчик включает датчик температуры, который осуществляет корректировку температуры при расчете относительной влажности. Датчик выставляется на установленную частоту в период выборочных контрольных измерений (например, 1 Гц для заякоренных метеорологических буев США и Канады). В английских, французских и ирландских буях серии К мгновенное значение электрической гидрометрической цепи получают в момент наблюдения.

4.3.9 Океанские датчики

Для понимания и предсказания данных об океанах необходимо осуществлять мониторинг их характеристик. Многочисленные буи способствуют мониторингу океанов посредством измерения параметров поверхностных течений, профилей океанских течений, температуры вблизи поверхности и качества воды. В число параметров качества воды могут входить мутность воды, окислительно-восстановительный потенциал (Eh), pH, хлорофилла, активная радиация фотосинтеза, «окрашенная растворення органическая материя», и растворенный кислород. Данные с буев проходят контроль качества в режиме реального времени и, если это возможно, эти данные распространяются по ИСВ.

4.3.10 Поверхностные океанские течения

Сбор данных измерений поверхностных течений осуществляется в целях содействия торговле, безопасности функционирования, поисково-спасательным операциям, ликвидации разлива нефти и определения течений поблизости от входов в порт, которые влияют на океанские перевозки. Данные измерений поверхностных течений при помощи буев также используются для валидации измерений этих течений высокочастотными радарами и спутниковыми измерениями. Большинство буев получают эти данные при помощи смонтированных на них акустических доплеровских измерителей течения. Интервал измерений должен устанавливаться таким образом, чтобы исключить течение, обусловленное орбитальной скоростью волнового движения.

4.3.11 **Профили океанских течений**

Профили океанских течений показывают движение океанов на разных уровнях столба воды. Эта информация является существенной для оценки дисперсии разливов нефти, для операций по поиску и спасению, измерения стрессов, создаваемых течениями для оффшорных платформ, и валидации океанских моделей. В настоящее время эти данные поступают от направленных вниз систем, установленных на буях или в клетках. На оффшорных нефтяных платформах профиль течений может быть нисходящим, начиная с определенных уровней столба воды, или восходящим по отношению к установленной на корме системе.

На большинстве буев используется технология акустических профилометров Доплера для измерения течения (АПДТ) как основных датчиков для сбора данных о текущем профиле океана. Эти датчики испускают короткие высокочастотные импульсы акустической энергии вдоль узких лучей. Элементы рассеяния (предположительно пассивный нектон и планктон), находящиеся внутри столба воды, возвращают отраженную энергию, а приборы преобразуют сдвиги частот Доплера вдоль луча в ортогональные наземные координаты для получения данных об океанских течениях на различных уровнях столба воды. АПДТ обычно используется отдельно или вкупе с системой буев для профилирования требуемой глубины.

4.3.12 **Соленость**

Необходимо знать соленость воды для инициализации океанских моделей, позволяющих готовить океанские прогнозы и предсказывать циркуляцию в океанах (которая в значительной мере определяется плотностью). Как правило, показатель солености выводится из данных измерений проводимости морской воды. Некоторые приборы сообщают данные о солености непосредственно (посредством внутренних расчетов), а другие сообщают данные о проводимости, температуре и глубине, которые необходимы для расчета солености. Измерения солености основаны на практической шкале солености, использующей эмпирическое соотношение между соленостью и проводимостью морской воды (хотя недавно резолюцией XXV-7 Ассамблеи Межправительственной океанографической комиссии ЮНЕСКО было утверждено новое международное термодинамическое уравнение состояния морской воды-2010 (TEOS-10)). Показатель солености сообщается в практических единицах солености. Измерение проводимости осуществляется при помощи двух методов: (a) используя индукционную обмотку для оценки объема проводящих ионов; (b) забором известного объема морской воды в стеклянную измерительную трубку и измерением проводимости путем измерения изменения сопротивляемости платинового электрода. Биозагрязнение прибора ограничивающий фактор для любых попыток обеспечить точные измерения солености с заякоренного буя.

4.3.13 **Осадки**

Измерение осадков с большим пространственным охватом критически важно для связанных с климатом исследований. Потоки пресной воды представляют собой косвенную меру локального латентного прогревания, которое стимулирует циркуляцию атмосферного воздуха. В этой связи сифоновые дождемеры были установлены на системах буев. Осадки собираются в воронку бассейна и сливаются в измерительную трубку, которая оснащена емкостным преобразователем, обеспечивающим линейные выходные данные. Самосифонирование опустошает измерительную трубку после ее наполнения. Интервал измерений составляет 1 Гц для расчета интенсивности дождевых осадков. На эти датчики незначительное воздействие оказывает электромагнетическое поле, создаваемое передающей антенной, и достаточное пространство зазора должно обеспечиваться на заякоренных буях, с тем чтобы преодолевать помехи.

4.3.14 **Измерения солнечной радиации**

Солнечная радиация оказывает серьезное воздействие на физические, биологические и химические процессы вблизи границы между атмосферой и океаном, и поэтому она представляет интерес для ученых и инженеров. Проведенные на поверхности измерения солнечной радиации использовались для калибровки радиометров видимого диапазона, установленных на спутниках. Датчик размещается как можно выше на платформе, чтобы на него не падала тень. Солнечный радиоактивный поток измеряется в ваттах на квадратный метр, а активная радиация фотосинтеза измеряется в микромолях на квадратный метр в секунду. Системы буев оборудованы длинно- и коротко-волновыми датчиками радиации с аналоговым и последовательным выводом.

4.3.15 **Видимость**

Датчики видимости размещаются на некоторых станциях, где видимость является серьезной проблемой для безопасности навигации. Датчик измеряет затухание света в небольшом объеме воздуха между источником и приемником света. Важно отметить, что эти измерения в одной точке и что существуют несколько похожих, но отличных друг от друга определений.

4.4 **ПЛАВУЧИЕ МАЯКИ**

По большинству параметров эти платформы могут рассматриваться как аналогичные заякоренным буям, поскольку автоматические и опираются на автоматизированные системы наблюдений. Поскольку они имеют бóльшие размеры и способны нести большую приборную нагрузку, на них проще размещать дополнительные датчики, такие как датчики видимости. В условиях суровой погоды такие датчики видимости могут подвергаться воздействию морских брызг, которые образуются самим плавучим маяком. Также ввиду того, что плавучие маяки значительно больше по размеру, чем заякоренные буи, внимание должно уделяться при отсылке к датчикам ветра, чтобы исключить препятствия, связанные с конструкцией судна, по аналогии с описанием выше СДН (см. 4.2.2.6.2). В то же время, для большинства условий их рабочие характеристики соответствуют характеристикам приборов, устанавливаемых на наземных автоматических метеорологических станциях.

Измерения волн производились с плавучих маяков в водах у берегов Соединенного Королевства на протяжении множества лет, данные имеются за период с 1962 года. Эти измерения изначально производились с использованием приборов регистратора волн на борту судна (СБВР), монтировавшихся на плавучих маяках, которые использовали акселерометры и датчики давления (воды) для предоставления информации о высоте и периода волн. С 1990 годов измерения волн производились с использованием датчиков вертикальной качки на плавучих маяках. Однако давно имелись подозрения относительного того, что текущие измерения волн с плавучих маяков не были столь же точны, как измерения, производимые с заякоренных буев Метеобюро СК. Это связано с тем, что современные измерения волн с плавучих маяков производятся с помощью датчиков вертикальной качки, размещаемых в близости от центральной части судна, которые измеряют лишь вертикальное перемещение, в то время как более ранние измерения СБВР опирались на акселерометры для измерения вертикальной качки судна и датчики давления (ниже ватерлинии) для измерения изменений уровня моря относительно судна. В этой связи измерения СБВР учитывали инерцию (а плавучие маяки слишком велики для точного отслеживания подъема и спада каждой волны) судна, что в настоящее время не учитывается. Это приводит к тому, что нынешние измерения лишь с использованием датчиков вертикальной качки недооценивают характерную высоту волн и переоценивают средний период волн (Anderson et al., 2016).

4.5 ВЫШКИ И ПЛАТФОРМЫ

На вышках (обычно на относительном мелководье поблизости от берега) и на платформах в более удаленных районах можно эксплуатировать стандартные автоматические метеорологические станции, аналогичные по своей конструкции наземным автоматическим метеорологическим станциям (см. главу 1 данного тома). Часто размещаются дополнительные датчики, например, датчики волнения и датчики для измерения среднего уровня воды выше реперной точки, облакомеры и измерители дальности. К числу фиксированных платформ могут относиться крупные сооружения гравитационного типа, мобильные самоподъемные морские буровые установки и полупогруженные буровые платформы. Самоподъемные и полупогруженные буровые платформы и буровые суда могут считаться стационарными платформами, поскольку они заякорены или динамически позиционированы, с тем чтобы оставаться в одном и том же месте во время их эксплуатации. Большая часть платформ в открытом море в настоящее время оснащена АМС, которые эксплуатируются офшорными индустриальными компаниями и в этой связи подпадают под категорию «данных третьих сторон», которые могут предоставляться через посредство ГТС ВМО.

На некоторых платформах и буровых установках данные автоматических измерений могут дополняться визуальными наблюдениями за облачностью, видимостью и погодой, обеспечивая таким образом полный набор синоптической информации. Визуальные наблюдения с нефтяных/газовых платформ следует проводить в соответствии с процедурами, рекомендованными в 4.2. Однако имеются случаи, когда применяются иные процедуры. Например, платформа может включать данные о волнении с ближайшего заякоренного буя для измерения волнения и данные о ТПМ с находящегося неподалеку судна снабжения.

Некоторые неавтоматические фиксированные или стационарные (морские нефтяные и газовые) платформы могут включать в свои метеорологические сводки данные измерений параметров волн, такие как характерная высота волн и некоторые данные об измерении периода волн, пользуясь при этом выходными данными с близлежащего буя для измерения волнения или с бортового радиолокатора для измерения волнения.

Платформы и вышки представляют собой удобные сооружения для установки метеорологических датчиков. Установка и техническое обслуживание могут быть менее сложными и более экономичными по сравнению с заякоренным буем, обеспечивая лучшую частоту и надежность данных. На качество данных не влияет движение судна или буя, и оно в меньшей степени подвержено ошибкам, возникающим в результате повреждения датчиков ударами волн. Датчики волн, однако, могут зависеть от места расположения фиксированных измерителей, таких как опора платформы. Взаимодействие физической конструкции и накатывающих волн способно создавать помехи или отражение в условиях подъема и спада волн.

В то же время датчики температуры и влажности требуют очень тщательного позиционирования, поскольку часто имеются источники тепла и выхлопных газов, которые изменяют местную окружающую среду, в результате чего условия окружающей среды характеризуются нерепрезентативными величинами. Измерения параметров ветра могли бы проводиться на высотах более 100 м над средним уровнем моря, и они требуют корректировки для приведения полученных значений к эквиваленту приземного ветра на высоте в 10 м (отметим, что в идеальном варианте желательно знать также данные реального наблюдения и его высоты). Если вышки находятся вблизи берега, то высота прилива может существенно изменить эффективную высоту датчика ветра.

В заключение, таким образом, фиксированные вышки и морские платформы могут обеспечить экономически эффективный источник дополнительных данных, устраняющий необходимость в размещении заякоренных буев в этих регионах.

4.6 ДРЕЙФУЮЩИЕ БУИ

Дрейфующие буи с плавучим якорем (Niiler, 2001; Maximenko et al., 2013;, Centurioni, 2018) использовались в течение многих лет в океанографии, главным образом для измерения течений на поверхности моря. Однако разработка надежных спутниковых систем отслеживания и ретрансляции данных (*Guide to Data Collection and Location Services using Service Argos*) привела к резкому увеличению количества океанских дрейфующих буев и к существенному расширению возможностей датчиков дрейфующих буев для метеорологических и океанографических целей.

Практические все лагранжианские поверхностные дрейфующие буи (в этой связи именуемые «дрифтерами»), функционирующие в рамках глобального массива дрейфующих буев сообщают ТПМ, геолокацию и время наблюдений. Поскольку якорь дрифтеров погружается на глубину 15 м, данные о геолокации и времени используются для расчета течений на этой глубине, когда имеется плавучий якорь.

Наличие плавучего якоря зачастую определяется датчиком деформации. Методы восстановления данных о приповерхностных океанских течениях в случае потери плавучего якоря также существуют. В 2018 году более половины дрифтеров глобального массива также производили измерения атмосферного давления поверхности моря, а также ряд дрифтеров, размещенных в поддержку специальных исследований процессов и/или изучений взаимодействия океана и циклонов, измеряют соленость поверхности моря (например, Centurioni et al., 2015; Hormann et al., 2015; Hormann et al., 2016), горизонтальную скорость ветра над поверхностью моря и подповерхностные температуры, обычно на глубине 15 м. Подкласс экспериментальных дрифтеров без плавучего якоря также развертывается, и эти устройства предназначены для измерения направленного спектра поверхностных гравитационных волн. Современное описание систем дрейфующих буев содержится в публикации Centurioni (2018) и ЮНЕСКО (UNESCO, 1988). Группа экспертов ВМО/МОК по сотрудничеству в области буев для сбора данных (ГСБД) опубликовала *Global Drifter Programme Barometer Drifter Design Reference* (*Справочник по устройству дрифтера с барометром для работы по Глобальной программе по дрейфующим буям*) . Читателям также следует ознакомиться с ежегодными отчетами и материалами практических семинаров ГСБД, которые имеются по ссылке: https://community.wmo.int/mmop-publications-and-documents-0.

Эволюция технологии дрейфующих буев была обусловлена потребностями океанографических исследований, с одной стороны, и оперативной метеорологией, с другой стороны. Таким образом, три основных различных типов буев могут быть охарактеризованы следующим образом:

a) в интересах океанографических исследований, и особенно для Эксперимента по циркуляции Мирового океана (Программа по измерению скорости поверхностных течений (SVP), 1988-1993), была разработана конструкция дрейфующего буя с плавучим якорем с центром на глубине 15 м и предназначенном для измерения приповерхностных течений в верхнем перемешанном слое океана и оснащенном для измерения ТПМ с точностью в диапазоне ±0.1 °C и ±0.05 °C; такие буи были установлены в большом количестве в Мировом океане;

b) в интересах оперативной метеорологии конструкция дрейфующих буев была разработана на основе буев, разработанных для первого Глобального эксперимента в рамках Программы изучения глобальных атмосферных процессов. Эти буи измеряют, главным образом, атмосферное давление, ТПМ и температуру воздуха;

c) в интересах полярных применений были разработаны различные буи для размещения на плавучих льдинах для измерения традиционных атмосферных переменных, а также состояния льда и снега (температура льда/снега и температурные профили льда, толщина льда, нагрузка на лед, состояние воды подо льдом). Путем прослеживания местоположения буя на льдине можно оценивать движение ледовой массы.

Были предприняты усилия по разработке буев, которые одновременно удовлетворяли требованиям океанографических исследований и оперативной метеорологии (Centurioni, 2018), в результате чего были разработаны:

a) дрейфующий буй SVP-B (см. также Centurioni et al., 2016*a*), который представляет собой модификацию дрейфующего буя SVP, как описано в пункте (a) предыдущего параграфа, с добавлением датчика давления воздуха. Барометр, как правило, обладает точностью ±0.4 гПА;

b) дрейфующий буй SVP-BW, который по существу представляет собой дрейфующий буй SVP-B, который может измерять параметры ветра. В более старых ветровых дрейфующих буях для получения оценок скорости ветра использовался подповерхностный гидрофон и поверхностный флюгер, но в современных дрейфующих буях SVP-BW эта технология была полностью заменена акустическим анемометром. Направление ветра измеряется при помощи внутреннего компаса с точностью ±2°;

c) буй, измеряющий вертикальный профиль ветра, давления и температуры, или автономная дрейфующая океаническая станция (АДОС), который представляет собой производную дрейфующего буя SVP-BW с подповерхностной термисторной цепью, пришедшей на смену плавучему якорю, для измерения температурного профиля до глубин порядка 150 м;

d) дрейфующий буй SVP, измеряющий соленость (SVP-S), который представляет собой дрейфующий буй SVP или SVP-B, с датчиком проводимости на глубине примерно 0,45 м и с точностью порядка ±0.0003 с $м^{-1}$. Точность датчика температуры поверхности для этих дрейфующих буев составляет порядка ±0.002 °C. В некоторых экспериментальных конфигурациях использовались дополнительные датчики проводимости/температуры еще на нескольких глубинах (Dong et al., 2017);

e) дрейфующий буй для измерения направленного спектра волн (Centurioni et al., 2016*b;* Centurioni et al. 2019), который представляет собой дрейфующий буй без плавучего якоря, предназначенный для измерения параметров направленного спектра волн с использованием технологии GPS. Эта экспериментальная технология становится более популярной ввиду точности производимых с ее помощь наблюдений направленного спектра и низкой затратности.

Дрейфующие буи представляют собой устройства одноразового применения, и таким образом их рабочие характеристики являются компромиссом между предъявляемыми требованиями и стоимостью их производства и поставки. В то же время, функционирование датчиков дрейфующих буев является адекватным, в случае необходимости, для целей синоптической метеорологии и океанографии. Отметим, что качество гидрофонных наблюдений за скоростью ветра является спорным, в результате чего их данные не используются оперативными центрами (Ingleby, 2010). Современная технология дрейфующего буя SVP-BW, которая использует акустический датчик ветра, представляется весьма перспективной и сейчас проходит оценку.

Ниже приводятся типичные погрешности измерений оперативных систем:

Размещение	22 м[a]
ТМП	От 0,05 °C до 0,21 °C[b]
Атмосферное давление	0,84 гПа[c]
Скорость ветра	3,5 $м \cdot с^{-1}$ или 10 %[bc]
Направление ветра	18,5°[c]

Подповерхностная температура	0,05 °C

К 2018 году данные с дрейфующих буев преимущественно передаются при помощи спутника Irridium, Примеры форматов коротких пакетов данных Irridium были предложены Blouch et al. (2018).

За прошедшие годы дрейфующие буи стали преобладающим источником данных измерений поверхностного давления воздуха в точке и ТПМ над мировыми океанами. Данные о давлении критически важны для глобального ЧПП (Centurioni et al., 2016*b*; Horányi et al. 2017), и данные ТПМ в настоящее время представляют собой ключевую часть данных о климате и также используются для калибровки и валидации продукции ТПМ, получаемой при помощи спутников. В данное время существует совместная инициатива ГСБД, ГПДБ и спутникового сообщества для оценки дрейфующих буев с более высокой точностью датчиков ТПМ (до ±0.05 °C и лучше), с тем чтобы определить, способны ли они привести к повышению точности спутниковой продукции ТПМ, при сообщении времени измерений до ±5 минут и местоположения до ±5 км, что сейчас является стандартной функцией дрейфующих буев Иридиум/GPS. В 2018 году была утверждена новая европейская (EBMETCAT, программа «Коперник», EBMETHET) концепция SVP с барометром и эталонным датчиком температуры (SVP-BRST) (Poli et al., 2019). Эти буи используются для передачи данных о температуре поверхности моря *in situ* с высоким разрешением для содействия калибровке и валидации радиометра температуры поверхности моря и суши на спутнике Сентинел-3. Было развернуто около 100 буев SVP-BRST.

ПРИЛОЖЕНИЕ 4.A. РЕГИОНАЛЬНЫЕ ЦЕНТРЫ МОРСКИХ ПРИБОРОВ ВМО/МОК

1. Учитывая потребность в высококачественных морских метеорологических и океанографических измерениях, проводимых в Мировом океане для удовлетворения требований программ ВМО и МОК/ЮНЕСКО и совместно финансируемых программ, необходимость в технических средствах для регулярной калибровки и технического обслуживания морских приборов и мониторинга их работы на региональной основе, с тем чтобы обеспечить соответствие данных океанских наблюдений и соответствующих метаданных высоким стандартам для приборов и методов наблюдений, необходимость в документировании методов измерений в целях понимания погрешностей, вносимых каждым типом приборного обеспечения, а также разработки методов коррекции подобных погрешностей для обеспечения предоставления и использования согласованных комплектов данных, было рекомендовано следующее[1]:

Региональные центры по морским приборам (РЦМП) должны обладать следующими возможностями для выполнения своих соответствующих функций:

Возможности:

a) РЦМП должен иметь необходимые технические средства и лабораторное оборудование и иметь доступ к ним, с тем чтобы выполнять функции, необходимые для калибровки метеорологических и соответствующих океанографических приборов, установленных для удовлетворения общих потребностей морских и совместно финансируемых программ ВМО и МОК/ЮНЕСКО[2];

b) РЦМП должен обслуживать комплект стандартных метеорологических и океанографических приборов или эталонов и обеспечивать согласованность своих собственных стандартов измерений и измерительных приборов с Международной системой единиц (СИ);

c) РЦМП должен иметь квалифицированный управленческий и технический персонал, обладающий необходимым опытом для выполнения своих функций;

d) РЦМП должен разработать свои индивидуальные технические процедуры для калибровки метеорологических и соответствующих океанографических приборов, пользуясь своим собственным калибровочным оборудованием;

e) РЦМП должен разработать свои индивидуальные процедуры обеспечения качества;

f) РЦМП должен участвовать в межлабораторных сравнениях стандартных калибровочных приборов и методов и организовывать эти сравнения;

g) РЦМП должен использовать, в случае необходимости, ресурсы и возможности своего изучаемого региона в наивысших интересах данного региона;

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

i) Авторитетный орган[3] должен оценивать работу РЦМП как минимум раз в пять лет для поверки его возможностей и эффективности.

---

[1] Рекомендовано Совместной технической комиссией ВМО-МОК по океанографии и морской метеорологии на ее третьей сессии, проведенной в 2009 г.

[2] В основном геофизические приборы *in situ*, размещенные в поверхностной или подповерхностной морской среде.

[3] СКОММ представляла собой орган, который официально предлагал новые РЦМП, а также любой авторитетный орган для проведения оценок.

Соответствующие функции:

a) РЦМП должен оказывать помощь странам-членам/государствам-членам своего региона в проведении калибровки их национальных метеорологических эталонов и соответствующих приборов для океанографического мониторинга в соответствии с возможностями РЦМП;

b) РЦМП должен участвовать в проводимых СКОММ и/или региональных взаимных сравнениях приборов или организовывать их, следуя соответствующим рекомендациям СКОММ;

c) РЦМП должен вносить позитивный вклад в деятельность стран-членов/государств-членов, связанную с качеством измерений;

d) РЦМП должен консультировать страны-члены/государства-члены по запросам, касающимся эксплуатации и обслуживания приборов, а также наличия соответствующих руководящих материалов;

e) РЦМП должен активно участвовать, или оказывать помощь, в организации региональных семинаров по метеорологическим и соответствующим океанографическим приборам и измерениям;

f) РЦМП должен сотрудничать с другими РЦМП в области стандартизации метеорологических и соответствующих океанографических измерений и датчиков;

g) РЦМП должен регулярно информировать страны-члены/государства-члены и сообщать на ежегодной основе Комитету управления СКОММ об услугах, предложенных странам-членам/государствам-членам и осуществленной деятельности. СКОММ, в свою очередь, следует постоянно информировать исполнительные советы ВМО и МОК/ЮНЕСКО о ходе работы и деятельности РЦМП и предлагать, в случае необходимости, соответствующие изменения.

2. Механизм официального назначения РЦМП ВМО и МОК/ЮНЕСКО предполагает следующее:

a) руководящие указания, касающиеся определения функций и принятия РЦМП, предлагаются СКОММ и утверждаются исполнительными советами ВМО и МОК/ЮНЕСКО;

b) от представившего свою кандидатуру РЦМП требуется представление заявления о соответствии требованиям, перечисление возможностей предлагаемого центра, заявление о предлагаемой совокупности возможностей по экспертизе приборов, заявление об официальном обязательстве в отношении добровольного размещения центра и представление в СКОММ подтверждения имеющихся возможностей;

c) процедура создания РЦМП инициируется СКОММ, а процесс назначения координируется СКОММ и секретариатами ВМО/МОК в соответствии с процедурой, утвержденной СКОММ и документально оформленной в техническом отчете СКОММ № 53;

d) в случае создания нескольких РЦМП в пределах Региона ВМО и/или МОК необходимо обеспечить координацию среди центров.

3. В качестве РЦМП были назначены следующие центры:

Регион	*Центр*	*Местонахождение*
Азиатско-Тихоокеанский регион	Национальный центр по океаническим стандартам и метрологии	Тяньцзинь, Китай

Регион	*Центр*	*Местонахождение*
Северная Америка, Центральная Америка и Карибский бассейн	Национальный центр по буям для сбора данных, США	Космический центр Стенниса, Миссисипи, США

ПРИЛОЖЕНИЕ 4.B. ОПИСАНИЯ ОСАДКОВ ДЛЯ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ СУДОВЫМИ НАБЛЮДАТЕЛЯМИ ТЕКУЩЕЙ ПОГОДЫ

Осадки бывают либо более или менее равномерными (прерывающиеся или непрерывные), либо ливневыми.

О всех осадках, кроме ливневых, необходимо сообщать как о прерывающихся или непрерывных.

Неливневые осадки обычно выпадают из слоистых облаков (в основном из высокослоистых (Altostratus) и слоисто-дождевых (Nimbostratus) облаков).
Ливневые осадки выпадают из мощных конвективных облаков (главным образом из кучево-дождевых облаков (Cumulonimbus) или средних или мощных кучевых (Cumulus) облаков вертикального развития) и обычно характеризуются своими внезапными началом и концом выпадения, и значительными колебаниями интенсивности. Капли и градины при ливневых осадках обычно большего размера, чем при неливневых осадках.

Капли в осадках могут быть переохлажденными (а именно — их температура может быть ниже 0 °C). При попадании на поверхность капли переохлажденного дождя образуют смесь воды со льдом, имеющую температуру около 0 °C.

Виды осадков

Описания, представленные ниже, соответствуют определениям, которые даны в публикации *International Cloud Atlas* (WMO-No. 407) (*Международный атлас облаков)*:

Морось. Довольно равномерные осадки в виде мельчайших капель воды, весьма схожи друг с другом, которые выпадают из облаков.

Капли мороси обычно имеют диаметр менее 0,5 мм. Эти капли кажутся почти парящими, так что делают заметными даже легкие движения воздуха. Морось выпадает из толщи слоистых облаков, обычно низких и иногда касающихся земли (туман). Объем осадков в виде мороси может быть существенным (до 1 мм $ч^{-1}$), особенно вдоль побережья и в гористой местности. Капли, выпадающие на границе зоны дождевых осадков, либо во время незначительных дождей, могут быть аналогичного каплям мороси размера, ввиду их частичного испарения. В таком случае капли дождя отличаются от каплей мороси тем, что носят более рассеянный характер выпадения.

Идентификация дождевых облаков как слоистых также отличает дождь от мороси.
Для целей кодирования морось должна классифицироваться как слабая, умеренная или сильная:

a) *слабая морось* может легко ощущаться кожей лица и обнаруживаться на окнах рулевой рубки, но она дает очень небольшой сток с палубы, крыш и т.п.;

b) *умеренная морось* образует на окнах, настилах, стенах надстроек струйки воды;

c) *сильная морось*: то же, что при умеренной мороси. Кроме того, уменьшает видимость до менее 1 000 м.

Дождь. Осадки в виде капель воды, которые выпадают из облаков. Плотность массы и размер распределения дождевых капель меняются в значительном диапазоне в зависимости от интенсивности осадков и в зависимости от их природы. Непрерывный дождь обычно выпадает из более или менее однородного слоя или слоев

сплошной плотной облачности слоистых форм. При кодировании дождь должен подразделяться на слабый, умеренный или сильный. Эти термины определяются следующим образом:

a) *слабый дождь:* может состоять из редких больших или многочисленных небольших капель. Скорость накопления воды на палубе мала, лужи образуются очень медленно;

b) *умеренный дождь:* отдельные капли ясно не прослеживаются. Наблюдаются брызги дождя. Лужи образуются быстро. С крыш слышится легкий или шуршащий шум;

c) *сильный дождь:* ливень, который создает сильный шум на тентах и настилах и образует за счет всплесков на поверхностях палубы туманообразную водяную пыль.

Снег. Осадки, состоящие из разрозненных или склеенных вместе кристаллов льда (снежинок), выпадающих из облаков. Форма, размер и концентрация снежинок варьируются в широком диапазоне в зависимости от температуры и сверхнасыщения, которые они формируют. Выпадение снега обычно включает различные типы кристаллов снега, и почти все типы кристаллов могут наблюдаться в период одного выпадения снега. Мелкие капли замерзшей воды зачастую прикрепляются к кристаллам снега. Наличие их в большом количестве может сделать неясной структуру кристаллов снега. При температурах выше примерно -5 °C кристаллы как правило склеиваются в виде хлопьев снега.

По интенсивности кодируется как слабый, умеренный или сильный.

Ливневые осадки. Эти осадки характеризуются внезапными началом и концом, и обычно быстрыми и иногда сильными колебаниями интенсивности. Выпадающие капли и твердые частицы обычно большего размера, чем при неливневых осадках. Появление ливневых или неливневых осадков (дождь или снег) зависит от облаков, в которых они образовались. Ливневые осадки выпадают из мощных конвективных облаков и определяются следующим образом:

a) *ливневый дождь и ливневый снег* при кодировании должны подразделяться по интенсивности на слабый, умеренный и сильный. Описание слабого, умеренного и сильного дождя и снега одно и то же. Надо, однако, помнить, что видимость при погоде с ливнями обладает большей изменчивостью, чем при погоде аналогичной категории с непрерывным дождем;

b) *сильные ливни* — это исключительно интенсивные и обильные ливневые дожди. Они бывают, главным образом, в тропических районах.

Снежная крупа. Осадки в виде белых и непрозрачных ледяных крупинок, которые выпадают из облаков. Эти крупинки обычно имеют коническую или округлую форму, и Их диаметр может достигать 5 мм. Снежная крупа состоит из центрального ядра, покрытого замерзшими облачными каплями. Они формируются, когда частицы льда, как правило кристалл, собирают облачные капли, которые быстро замерзают. Их плотность, как правило, невысока, менее 0,8 г см, ввиду воздушных зазоров между ядром и замерзшими каплями. Снежная крупа отличается хрупкостью и легко разрушается. Когда они падают на твердую почву, то отскакивают от нее и часто разрушаются. Дождь из снежной крупы выпадает из кучевых или кучево-дождевых облаков. Дождь обычно состоит из снежной крупы и хлопьев снега, и обычно возникает при температуре воздуха у поверхности близкой к 0 °C. Могут наблюдаться кристаллы не в полном окружении капель; это — промежуточная стадия между кристаллами снега и снежной крупой. Для целей регистрации интенсивность снежной крупы, когда она выпадает в чистом виде, определяется по видимости так же, как и интенсивность снега.

Град. Осадки в виде частиц льда (градин). Они могут быть прозрачными, полупрозрачными или совершенно непрозрачными. Обычно они обладают сфероидальной, конической или неправильной формой и диаметром 5—50 мм.

Частицы могут выпадать из облаков либо разрозненно, либо сцепленными в бесформенные комья. Выпадение града всегда наблюдается во время ливней. Оно обычно наблюдается при сильных грозах. Для целей кодирования град должен подразделяться на слабый, умеренный и сильный. Интенсивность определяется по степени скопления градин следующим образом:

a) *слабый град:* небольшое количество выпавших градин; на плоских поверхностях не наблюдается заметного их скопления;

b) *умеренный град:* наблюдается медленная аккумуляция градин. Их количество становится достаточным, чтобы палубы стали белыми;

c) *сильный град:* быстрое накопление градин. Редко наблюдается на море в средних широтах.

Ледяной дождь. Осадки в виде прозрачных ледяных частиц, которые выпадают из облаков. Эти частицы, почти всегда сферической формы, имеют иногда конические вершинки. Их диаметр может приближаться к 5 мм и более. Ледяной дождь всегда возникает в ходе ливней из кучево-дождевых облаков. Ледяной дождь состоит из снежной крупы полностью или частично имеющей слой льда. Зазоры в снежной крупе заполняются льдом, либо льдом и водой; замороженным может оказаться лишь тонкий корпус. Источником воды могут быть облачные капли или частично тающие снежные крупинки. Плотность ледяного дождя относительно высока; она варьируется от 0,8 г $см^{-3}$ до, в редких случаях, 0,99 к $см^{-3}$. Обычно они нелегко разбиваются и при падении на твердую почву отскакивают от нее с громким звуком. Ледяной дождь представляет собой промежуточную стадию между снежной крупой и градом. Он отличается от снежной крупы своей частично гладкой поверхностью и своей более высокой плотностью. Он отличается от града своим особенно небольшим размером.

Ледяная крупа. Осадки в виде прозрачных ледяных частиц, которые выпадают из облаков. Эти частицы обычно имеют сфероидальню или неправильную форму и реже — коническую. Их диаметр менее 5 мм. Ледяная крупа возникает как дождевые капли или хлопья снега (менее типично), которые, как правило, выпадают из высокослоистых или слоисто-дождевых облаков. Они выпадают в подоблачный слой теплого воздуха, где хлопья снега тают или тают частично, а затем выпадают в холодный слой воздуха (ниже 0 °C), где замерзают и достигают земли в виде замерзших осадков. Ледяная крупа в виде замерзших дождевых капель прозрачна, менее типичны повторно замерзшие хлопья снега и частично прозрачны и частично непрозрачны, в зависимости от того, полностью или частично растаяли хлопья снега. Ледяная крупа нелегко разбивается. При падении на твердую почву, как правило, отскакивает от нее с громким звуком. Ледяная крупа может быть частично жидкой. Ее плотность обычно ближе к плотности льда, либо выше (0,92 г $см^{-3}$). Интенсивность определяется так же, как и интенсивность града.

Снежные зерна. Осадки в виде очень мелких непрозрачных белых частиц льда, которые выпадают из облаков. Эти частицы имеют довольно плоскую или удлиненную форму; их диаметр обычно менее 1 мм. Хотя они замерзшие и возникают при температуре между приблизительно 0 °C и -10 °C, другие свойства этих осадков сопоставимы с моросью. Когда снежные зерна падают на твердую почву, они не отскакивают от нее. Снежные зерна выпадают в основном из слоистых облаков или из тумана и никогда не бывают ливневыми. Кроме горных районов снежные зерна обычно выпадают в небольших количествах. Поскольку существует только одна кодовая характеристика, относящаяся к снежным зернам, то классифицировать интенсивность этих осадков нет необходимости.

ПРИЛОЖЕНИЕ 4.C. РЕКОМЕНДУЕМЫЕ ПРОЦЕДУРЫ ПЕРЕДАЧИ ИНФОРМАЦИИ О ЗЫБИ С СУДОВ С НЕАВТОМАТИЗИРОВАННЫМ ПРЕДСТАВЛЕНИЕМ ДАННЫХ

Рекомендуемые процедуры передачи сообщений о зыби с судов с неавтоматизированным представлением данных, согласованные на пятой сессии Группы по наблюдениям с судов (ГНС-V) в 2009 г. (WMO/IOC, 2009*b*) и осуществляемые с согласия Экспертной группы по морской климатологии (ЭГМК; WMO/IOC, 2010), приведены ниже:

a) в случае, когда зыбь не определяется в том смысле, что наблюдения не предпринимались, группы зыби из наблюдения опускаются;

b) в случае, когда в наблюдениях регистрируют, что зыби нет вследствие спокойного моря, направление основной зыби и направление вторичной зыби сообщаются как штиль. Период и высота основной зыби и вторичной зыби могут тогда быть опущены, поскольку если передается сообщение о спокойном море, то можно сделать вывод о том, что и эти элементы будут спокойными, и в этом случае они не сообщают никакой дополнительной информации;

c) в случае, когда направление зыби неопределенное, передается сообщение о беспорядочном волнении. Когда период и высота зыби также беспорядочны, это включается в сводку наблюдения. Период и высота вторичной зыби могут быть опущены;

d) в случае, когда зыбь является беспорядочной, но период и высота могут быть оценены, направление зыби передается как неопределенное, а период и высота первичной зыби включаются в сводку. Период и высота вторичной зыби могут быть опущены;

e) в случае, если наблюдается одиночная зыбь, то направление, период и высота этой зыби передаются в сводке. Период и высота вторичной зыби могут быть опущены;

f) в случае, если наблюдаются две зыби, то направление, период и высота каждой из них включаются в сводку наблюдения.

СПРАВОЧНАЯ И ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ЛИТЕРАТУРА

Всемирная метеорологическая организация (ВМО). *Номенклатура ВМО по морскому льду* (ВМО-№ 259). Женева, 1970.

Всемирная метеорологическая организация (ВМО). *Руководство по анализу и прогнозированию волнения* (ВМО-№ 702). Женева, 1998.

Всемирная метеорологическая организация (ВМО). *Руководство по глобальной системе наблюдений* (ВМО-№ 488). Женева, 2017.

Всемирная метеорологическая организация (ВМО). *Наставление по кодам* (ВМО-№ 306), том I.1. Женева, 2019.

Всемирная метеорологическая организация (ВМО). *Наставление по кодам* (ВМО-№ 306), том I.2. Женева, 2021.

Всемирная метеорологическая организация (ВМО). *Руководство по морскому метеорологическому обслуживанию* (ВМО-№ 471). Женева, 2018.

Всемирная метеорологическая организация (ВМО*). Наставление по Интегрированной глобальной системе наблюдений ВМО* (ВМО-№ 1160). Женева, 2021.

American Meteorological Society. *Glossary of Meteorology.* 2nd ed.; American Meteorological Society, 2000. http://glossary.ametsoc.org/wiki/Main_Page.

Anderson, G.; Carse, F.; Turton J. et al. Quantification of Bias of Wave Measurements from Light Vessels. *Journal of Operational Oceanography* 2016, *9* (2), 93–102. https://doi.org/10.1080/1755876X.2016.1239242.

Barton, I. J.; Minnett, P. J.; Maillet, K. A. et al. The Miami2001 Infrared Radiometer Calibration and Intercomparison. Part II: Shipboard Results. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology* **2004**, *21* (2), 268–283. https://doi.org/10.1175/1520-0426(2004)021<0268:TMIRCA>2.0.CO;2.

Blouch, P.; Billon, C. E-SURFMAR Recommended Ship-to-shore Data Formats for Voluntary Observing Ships (VOS), 2017. https://zenodo.org/record/1324186.

Blouch, P.; Billon, C.; Poli, P. 2018: E-SURFMAR Recommended Ship-to-shore Data Formats for Buoys. doi:10.5281/zenodo.1473443.

Bourras, D. Comparison of Five Satellite-derived Latent Heat Flux Products to Moored Buoy Data. *Journal of Climate* **2006**, *19* (24), 6291–6313. https://doi.org/10.1175/JCLI3977.1.

Bowditch, N. *The American Practical Navigator: An Epitome of Navigation*, 2002 Bicentennial edition, NIMA Pub. No. 9; National Imagery and Mapping Agency: Bethesda, USA, 2002.

Bradley, F.; Fairall, C. *A Guide to Making Climate Quality Meteorological and Flux Measurements at Sea*, NOAA Technical Memorandum OAR PSD-311, NOAA/ESRL/PSD; National Oceanic and Atmospheric Administration: Boulder, USA, 2006.

Centurioni, L. R. Drifter Technology and Impacts for Sea Surface Temperature, Sea-level Pressure, and Ocean Circulation Studies. In: *Observing the Oceans in Real Time*; Venkatesan, R.; Tandon, A.; D'Asaro E. et al., Eds.; Springer Oceanography: Cham, Switzerland, 2018.

Centurioni, L.; Braasch, L.; Di Lauro, E. et al. A New Strategic Wave Measurement Station off Naples Port Main Breakwater. *Coastal Engineering Proceedings* 2016. https://doi.org/10.9753/icce.v35.waves.36.

Centurioni, L.; Horányi, A.; Cardinali, C. et al. A Global Ocean Observing System for Measuring Sea Level Atmospheric Pressure: Effects and Impacts on Numerical Weather Prediction. *Bulletin of the American Meteorological Society* 2017, 98 (2), 231–238. https://doi.org/10.1175/BAMS-D-15-00080.1.

Centurioni, L. R.; Hörmann, V.; Chao, Y. et al. Sea Surface Salinity Observations with Lagrangian Drifters in the Tropical North Atlantic During SPURS: Circulation, Fluxes, and Comparisons with Remotely Sensed Salinity from Aquarius. *Oceanography* 2015, *28* (1), 96-105. https://doi.org/10.5670/oceanog.2015.08.

Centurioni, L. R.; Turton, J.; Lumpkin, R. et al. Global In Situ Observations of Essential Climate and Ocean Variables at the Air–Sea Interface. *Frontiers in Marine Science* **2019**, *6* (419). https://doi.org/10.3389/fmars.2019.00419.

Dohan, K.; Bonjean, F.; Centurioni, L. et al. Measuring the Global Ocean Surface Circulation with Satellite and In Situ Observations. In *Proceedings of OceanObs'09: Sustained Ocean Observations and Information for Society*, Venice, 21–25 September 2009; Hall, J.; Harrison D. E.; Stammer, D., Eds.; ESA Publication WPP-306, European Space Agency, 2010; Vol. 2. https://doi.org/10.5270/OceanObs09.cwp.23.

Dong, S.; Volkov, D.; Goni, G. et al. 2017: Near-surface Salinity and Temperature Structure Observed with Dual-sensor Drifters in the Subtropical South Pacific. *Journal of Geophysical Research: Oceans* 2017, *122* (7), 5952–5969. http://dx.doi.org/10.1002/2017JC012894.

Donlon, C.; Robinson, I. S.; Wimmer, W. et al. An Infrared Sea Surface Temperature Autonomous Radiometer (ISAR) for Deployment aboard Volunteer Observing Ships (VOS). *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology* **2008**, *25* (1), 93–113. https://doi.org/10.1175/2007JTECHO505.1.

Fairall, C. W.; White, A. B.; Edson J. B. et al. Integrated Shipboard Measurements of the Marine Boundary Layer. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology* **1997**, *14* (3), 338–359. https://doi.org/10.1175/1520-0426(1997)014<0338:ISMOTM>2.0.CO;2.

Freeland, H.; Roemmich, D.; Garzoli, S. et al. Argo – A Decade of Progress. In *Proceedings of OceanObs'09: Sustained Ocean Observations and Information for Society*, Venice, 21–25 September 2009; Hall, J.; Harrison, D. E.; Stammer, D. Eds.; ESA Publication WPP-306, European Space Agency, 2010; Vol. 2.

Frigaard, P. B.; Helm-Petersen, J.; Klopman, G. et al. IAHR List of Sea Parameters. In *Proceedings of the Twenty-seventh IAHR Congress*, San Francisco, 10–15 August 1997; 1997.

Goni, G.; Roemmich, D.; Molinari, R. et al. The Ship of Opportunity Programme. In *Proceedings of OceanObs'09: Sustained Ocean Observations and Information for Society*, Venice, 21–25 September 2009; Hall, J.; Harrison D. E.; Stammer, D. Eds.; ESA Publication WPP-306, European Space Agency, 2010; Vol. 2.

Hall, J.; Harrison, D. E.; Stammer, D., Eds. *Proceedings of OceanObs'09: Sustained Ocean Observations and Information for Society* ,Venice, 21–25 September 2009; ESA Publication WPP-306, European Space Agency, 2010.

Hasse, L.; Grossklaus, M.; Uhlig, K. et al. A Ship Rain Gauge for Use in High Wind Speeds. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology* **1998**, *15* (2), 380–386. https://doi.org/10.1175/1520-0426(1998)015<0380:ASRGFU>2.0.CO;2.

Horányi, A.; Cardinali, C.; Centurioni, L. The Global Numerical Weather Prediction Impact of Mean-sea-level Pressure Observations from Drifting Buoys. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society* **2017**, *143* (703), 974–985. https://doi.org/10.1002/qj.2981.

Hormann, V.; Centurioni, L. R.; Reverdin, G. Evaluation of Drifter Salinities in the Subtropical North Atlantic. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology* **2015**, *32* (1), 185–192. https://doi.org/10.1175/JTECH-D-14-00179.1.

Hormann, V.; Centurioni, L. R.; Mahadevan, A. et al. Variability of Near-Surface Circulation and Sea Surface Salinity Observed from Lagrangian Drifters in the Northern Bay of Bengal During the Waning 2015 Southwest Monsoon. *Oceanography* **2016**, *29* (2), 124–133. https://doi.org/10.5670/oceanog.2016.45.

Ingleby, B. Factors Affecting Ship and Buoy Data Quality: A Data Assimilation Perspective. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology* **2010**, *27*, 1476–1489. https://doi.org/10.1175/2010JTECHA1421.1.

Keeley, R.; Pazos M.; Bradshaw, B. Data Management System for Surface Drifters. In *Proceedings of OceanObs'09: Sustained Ocean Observations and Information for Society,* Venice, 21–25 September 2009; Hall, J.; Harrison, D. E.; Stammer, D., Eds.; ESA Publication WPP-306, European Space Agency, 2010; Vol. 2.

Kennedy, J. J.; Smith R. O.; Rayner, N. A. Using AATSR Data to Assess the Quality of In Situ Sea-surface Temperature Observations for Climate Studies. *Remote Sensing of Environment* **2012**, *116*, 79–92. https://doi.org/10.1016/j.rse.2010.11.021.

Kent, E. C.; Ball, G.; Berry, D. et al. The Voluntary Observing Ship (VOS) Scheme. In *Proceedings of OceanObs'09: Sustained Ocean Observations and Information for Society*, Venice, 21–25 September 2009; Hall, J.; Harrison, D. E., Stammer, D., Eds.; ESA Publication WPP-306, European Space Agency, 2010, Vol. 2.

Kent, E. C.; Berry, D. I. Quantifying Random Measurement Errors in Voluntary Observing Ships' Meteorological Observations. In Advances in the Applications of Marine Climatology – The Dynamic Part of the WMO Guide to the Applications of Marine Climatology (WMO/TD-No. 1081). WMO: Geneva, 2005.

Kent, E. C.; Taylor, P. K. Toward Estimating Climatic Trends in SST, Part I: Methods of Measurement. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology* **2006**, *23* (3), 464–475. https://doi.org/10.1175/JTECH1843.1.

Kent, E. C.; Taylor, P. K.; Josey, S. A. Improving Global Flux Climatology: The Role of Metadata. In Advances in the Applications of Marine Climatology: The Dynamic Part of the WMO Guide to the Applications of Marine Meteorology (WMO/TD-No. 1081). WMO/IOC: Geneva and Paris, 2003.

Kent, E. C.; Taylor, P. K.; Truscott B. S. et al. The Accuracy of Voluntary Observing Ships' Meteorological Observations – Results of the VSOP-NA. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology* **1993**, *10* (4), 591–608. https://doi.org/10.1175/1520-0426(1993)010<0591:TAOVOS>2.0.CO;2.

Kent, E. C.; Woodruff, S. D.; Berry, D. I. Metadata from WMO Publication No. 47 and an Assessment of Voluntary Observing Ship Observation Heights in ICOADS. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology* **2007**, *24* (2), 214–234. https://doi.org/10.1175/JTECH1949.1.

Klepp, C. The oceanic shipboard precipitation measurement network for surface validation – OceanRAIN. *Atmospheric Research,* Special issue on the Sixth Workshop of the International Precipitation Working Group **2015**, *163*, 74–90. https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2014.12.014.

Laurindo, L. C.; Mariano, A.; Lumpkin, R. An Improved Surface Velocity Climatology for the Global Ocean from Drifter Observations. *Deep Sea Research Part I* **2017**, *124*, 73–92. http://dx.doi.org/10.1016/j.dsr.2017.04.009.

Liu, W. T.; Katsaros, K. B.; Businger, J. A. Bulk Parameterization of Air–Sea Exchanges of Heat and Water Vapor Including the Molecular Constraints at the Interface. *Journal of Atmospheric Sciences* **1979**, *36*, 1722–1735. https://doi.org/10.1175/1520-0469(1979)036<1722:BPOASE>2.0.CO;2.

Maximenko, N.; Lumpkin, R.; Centurioni, L. Chapter 12 – Ocean Surface Circulation. In *Ocean Circulation and Climate: A 21st Century Perspective,* 2nd ed.; International Geophysics Series Volume 103; Siedler, G.; Griffies, S. M.; Gould J. et al., Eds.; Academic Press, 2013.

McPhaden, M. J.; Ando, K.; Bourlès, B. et al. 2010: The Global Tropical Moored Buoy Array. In *Proceedings of OceanObs'09: Sustained Ocean Observations and Information for Society*, Venice, 21–25 September 2009; Hall, J.; Harrison, D. E.; Stammer, D., Eds.; ESA Publication WPP-306, European Space Agency, 2010; Vol. 2.

Meldrum, D.; Charpentier, E.; Fedak, M. et al. Data Buoy Observations: The Status Quo and Anticipated Developments over the Next Decade. In *Proceedings of OceanObs'09: Sustained Ocean Observations and Information for Society*, Venice, 21–25 September 2009; Hall, J.; Harrison, D. E.; Stammer, D., Eds.; ESA Publication WPP-306, European Space Agency, 2010; Vol. 2.

Merrifield, M.; Aarup, T.; Allen, A. et al. The Global Sea Level Observing System (GLOSS). In *Proceedings of OceanObs'09: Sustained Ocean Observations and Information for Society*, Venice, 21–25 September 2009; Hall, J.; Harrison, D. E.; Stammer, D., Eds.; ESA Publication WPP-306, European Space Agency, 2010; Vol. 2.

Michaelides, S. *Precipitation: Advances in Measurement, Estimation and Prediction*. Springer, 2008

Moat, B. I., Yelland, M. J.; Molland A. F. Quantifying the Airflow Distortion over Merchant Ships, Part II: Application of the Model Results. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology* **2006**, *23* (3), 351–360. https://doi.org/10.1175/JTECH1859.1.

Moat, B. I.; Yelland, M. J.; Pascal R. W. et al. An Overview of the Airflow Distortion at Anemometer Sites on Ships. *International Journal of Climatology* 2005, 25 (7), 997–1006. https://doi.org/10.1002/joc.1177.

National Data Buoy Center. *Handbook of Automated Data Quality Control Checks and Procedures of the National Data Buoy Center*, NDBC Technical Document 03-02; National Data Buoy Center: Stennis Space Center, 2003a. https://www.ndbc.noaa.gov/NDBCHandbookofAutomatedDataQualityControl2009.pdf.

National Data Buoy Center. *Nondirectional and Directional Wave Data Analysis Procedures*, NDBC Technical Document 03-01; National Data Buoy Center: Stennis Space Center, 2003b. http://www.ndbc.noaa.gov/wavemeas.pdf.

National Data Buoy Center. *Handbook of Automated Data Quality Control Checks and Procedures*, NDBC Technical Document 09-02; National Data Buoy Center: Stennis Space Center, 2009. http://www.ndbc.noaa.gov/NDBCHandbookofAutomatedDataQualityControl2009.pdf.

Niiler, P. P. The World Ocean Surface Circulation. In *Ocean Circulation and Climate: Observing and Modelling the Global Ocean;* Siedler, G.; Church J.; Gould, J., Eds.; Academic Press: San Francisco, 2001.

O'Carroll, A. G.; Eyre, J. R.; Saunders, R. W. Three-way Error Analysis between AATSR, AMSR-E, and In Situ Sea Surface Temperature Observations. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology* **2008**, *25* (7), 1197–1207. https://doi.org/10.1175/2007JTECHO542.1.

Organisation Météorologique Internationale – Comité Météorologique International (OMI-CMI). *Procès-Verbaux de la Session de Paris, 1946*, Publication No. 55; 105–106; La Concorde: Lausanne, 1947.

Pazan, S. E.; Niiler, P. P. Recovery of Near-Surface Velocity from Undrogued Drifters. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology* **2001**, *18*, 476–489. https://doi.org/10.1175/1520-0426(2001)018<0476:RONSVF>2.0.CO;2.

Poli, P.; Lucas, M.; O'Carroll, A. et al. The Copernicus Surface Velocity Platform Drifter with Barometer and Reference Sensor for Temperature (SVP-BRST): Genesis, Design, and Initial Results. *Ocean Science* **2019**, *15*, 199–214. https://doi.org/10.5194/os-15-199-2019.

Send, U.; Weller, R. A.; Wallace, D. et al. OceanSITES. In *Proceedings of OceanObs'09: Sustained Ocean Observations and Information for Society*, Venice, 21–25 September 2009; Hall, J.; Harrison D. E.; Stammer, D., Eds.; ESA Publication WPP-306, European Space Agency, 2010; Vol. 2.

Smith, S. R.; Bourassa, M. A.; Bradley, E. et al. Automated Underway Oceanic and Atmospheric Measurements from Ships. In *Proceedings of OceanObs'09: Sustained Ocean Observations and Information for Society*, Venice, 21–25 September 2009; Hall, J.; Harrison D. E.; Stammer, D., Eds.; ESA Publication WPP-306, European Space Agency, 2010; Vol. 2.

Smith, S. R.; Bourassa, M. A.; Sharp, R. J. Establishing more truth in true winds. In Advances in the Applications of Marine Climatology: The Dynamic Part of the WMO Guide to the Applications of Marine Meteorology (WMO/TD-No. 1081). WMO/IOC: Geneva and Paris, 2003.

Swail, V.; Jensen, R. E.; Lee, B. et al. Wave Measurements, Needs and Developments for the Next Decade. *Proceedings of OceanObs'09: Sustained Ocean Observations and Information for Society*, Venice, 21–25 September 2009; Hall, J.; Harrison D. E.; Stammer, D., Eds.; ESA Publication WPP-306, European Space Agency, 2010a; Vol. 2.

Swail, V.; Lee, B.; Soares, A. et al. Storm Surge. *Proceedings of OceanObs'09: Sustained Ocean Observations and Information for Society*, Venice, 21–25 September 2009; Hall, J.; Harrison D. E.; Stammer, D., Eds.; ESA Publication WPP-306, European Space Agency, 2010b; Vol. 2.

Taylor, P. K.; Kent, E. C.; Yelland, M. J. et al. The Accuracy of Marine Surface Winds from Ships and Buoys. In Advances in the Applications of Marine Climatology: The Dynamic Part of the WMO Guide to the Applications of Marine Meteorology (WMO/TD-No. 1081). WMO/IOC: Geneva and Paris, 2003.

Turton, J.; Pethica, C. Assessment of a New Anemometry System for the Met Office's Moored Buoy Network. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology* **2010**, *27*, 2031–2038. https://doi.org/10.1175/2010JTECHA1475.1.

United Kingdom Meteorological Office. *Marine Observers Handbook*, 11th ed.; UK Met Office No. 1016, UK Met Office: London, 1995.

United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization (UNESCO). *Guide to Drifting Data Buoys*; WMO/IOC Manuals and Guides 20, 1988.

United States Weather Bureau. *Manual of Barometry (WBAN)*, 1st ed; US Government Printing Office: Washington, DC, 1963; Vol. I. http://babel.hathitrust.org/cgi/pt?id=uc1.31822010663441;seq=7;view=1up;num=i.

Venkatesan R.; Vengatesan, G.; Vedachalam, N. et al. Reliability Assessment and Integrity Management of Data Buoy Instruments Used for Monitoring the Indian Seas. *Applied Ocean Research* **2015**, *54*, 1–11. https://doi.org/10.1016/j.apor.2015.10.004.

Weller, R. A.; Bradley, E. F.; Edson, J. B. et al. Sensors for Physical Fluxes at the Sea Surface: Energy, Heat, Water, Salt. *Ocean Science* **2008**, *4* (4), 247–263. https://doi.org/10.5194/os-4-247-2008.

Wilkerson, J. C.; Earle, M. D. A study of Differences between Environmental Reports by Ships in the Voluntary Observing Programme and Measurements from NOAA Buoys. *Journal of Geophysical Research* **1990**, *95* (C3), 3373–3385.

World Meteorological Organization (WMO). *International List of Selected, Supplementary and Auxiliary Ships* (WMO-No. 47). Geneva, 1955–. (Serial publication; recently annual. Editions prior to 1966 were entitled *International List of Selected and Supplementary Ships*; future editions will be known as *International List of Selected, VOSClim, Supplementary and Auxiliary Ships*, https://community.wmo.int/mmop-operational-information.)

World Meteorological Organization (WMO). *Precipitation Measurements at Sea*. (WMO-No. 124). Geneva, 1962.

World Meteorological Organization (WMO). *Comparative Sea-surface Temperature Measurements* (WMO-No. 336). Geneva, 1972.

World Meteorological Organization (WMO). *The Meteorological Aspects of Ice Accretion on Ships* (WMO-No. 397). Geneva, 1974.

World Meteorological Organization (WMO). *Precipitation Measurement at Sea*, Marine Meteorology and Related Oceanographic Activities Report No. 1. WMO: Geneva, 1981.

World Meteorological Organization (WMO). *Wind Measurements Reduction to a Standard Level* (WMO/TD-No. 311). Geneva, 1989.

World Meteorological Organization (WMO). *Compendium of Lecture Notes in Marine Meteorology for Class III and Class IV Personnel* (WMO-No. 434). Geneva, 1991.

World Meteorological Organization (WMO). *The Accuracy of Ship's Meteorological Observations: Results of the VSOP-NA* (WMO/TD-No. 455). Geneva, 1991.

World Meteorological Organization (WMO). The accuracy of meteorological observations from Voluntary Observing Ships: Present status and future requirements (Taylor, P.K.; Kent, E.C.). *Final Report of the First Session of the Commission for Marine Meteorology Working Group on Marine Observing Systems Subgroup on Voluntary Observing Ships* (Athens 1999), WMO TC CMM, 1999. http://eprints.soton.ac.uk/347754/.

World Meteorological Organization (WMO). *International Cloud Atlas* (WMO-No. 407). Geneva, 2017.

World Meteorological Organization (WMO)/Intergovernmental Oceanographic Commission (IOC). *Guide to Data Collection and Location Services using Service Argos.* Data Buoy Cooperation Panel Technical Document No. 3. WMO and IOC: Geneva and Paris, 1995.

World Meteorological Organization (WMO)/Intergovernmental Oceanographic Commission (IOC). *Guide to Moored Buoys and Other Ocean Data Acquisition Systems*, Data Buoy Cooperation Panel Technical Document No. 8. WMO and IOC: Geneva and Paris, 1996.

World Meteorological Organization (WMO)/Intergovernmental Oceanographic Commission (IOC). Global *Drifter Programme Barometer Drifter Design Reference*, Data Buoy Cooperation Panel Report No. 4, Revision 2.2. WMO and IOC: Geneva and Paris 2009a.

World Meteorological Organization (WMO)/Intergovernmental Oceanographic Commission (IOC). *Ship Observations Team Fifth Session*, JCOMM Meeting Report No. 63. WMO and IOC: Geneva and Paris, 2009*b*. http://sot.jcommops.org/vos/documents/sot5_report.pdf.

World Meteorological Organization (WMO)/Intergovernmental Oceanographic Commission (IOC). *Third Session of the JCOMM Expert Team on Marine Climatology (Melbourne, Australia, 8–12 February 2010)*, JCOMM Meeting Report No. 70. WMO and IOC: Geneva and Paris, 2010.

Yelland, M. J.; Moat, B. I.; Taylor, P. K. Air Flow Distortion over Merchant Ships, Progress Report to the Atmospheric Environment Service, Canada. 2001. http://eprints.soton.ac.uk/67256.

ГЛАВА 5. СПЕЦИАЛЬНЫЕ МЕТОДЫ ПРОФИЛИРОВАНИЯ АТМОСФЕРНОГО ПОГРАНИЧНОГО СЛОЯ И ТРОПОСФЕРЫ

5.1 ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

Специальные методы профилирования были разработаны для получения данных с высоким временным и пространственным разрешением, которые необходимы для анализа, прогнозирования и научных исследований явлений малого метеорологического масштаба и для различных специальных применений. В настоящей главе дается общий обзор существующих наземных систем, которые можно использовать для этих целей. Глава делится на две основные части: методы дистанционного зондирования и прямого измерения *in situ*. Некоторые из этих методов могут применяться для измерений по всей тропосфере, другие используются в нижней тропосфере, в частности в атмосферном пограничном слое.

Методы дистанционного зондирования основаны на взаимодействии с атмосферой электромагнитной или акустической энергии. При использовании таких методов измерительный прибор и подлежащая измерению переменная разнесены в пространстве в отличие от измерений в точке (*in situ*). С прикладной точки зрения эти методы можно разделить на пассивные и активные. Пассивные методы основаны на использовании собственного теплового излучения атмосферы (микроволновые радиометры). Активные системы (содары, радарные ветровые профилометры, системы радиоакустического зондирования (РАСС), лидары и ГНСС) излучают собственные искусственные сигналы в атмосферу. Эти методы дистанционного зондирования с поверхности Земли описаны в 5.2. Другие методы дистанционного зондирования, о которых говорится в этой главе, описаны в настоящем томе, глава 7 (Радиолокационные измерения), и в томе IV (Космические наблюдения).

В разделе 5.3 содержится описание контактных методов наблюдений с помощью приборов, размещенных на различных платформах, с целью проведения непосредственных наблюдений в атмосферном пограничном слое (аэростаты, радиозонды атмосферного пограничного слоя, специально оснащенные башни и мачты, специально оснащенные привязные аэростаты). В томе I, главы 12 и 13, описываются более широко используемые методы с применением шаров-зондов для проведения измерений профилей структурных параметров атмосферы.

Литература по методам зондирования весьма обширна. С общими вопросами и сопоставлениями можно ознакомиться в работах Derr (1972), WMO (1980), Martner et al. (1993) и в материалах специального выпуска *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology* (том 11, № 1, 1994; см. https://journals.ametsoc.org/view/journals/atot/11/1/atot.11.issue-1.xml).

Пользователи должны обратить внимание на подробную информацию, которая поставляется с конкретными коммерческими измерительными системами. В частности, большинство из них включают советы по выбору площадки, безопасности и сравнительным преимуществам конкретных алгоритмов обработки сигналов, которые могут быть включены или выключены.

5.2 МЕТОДЫ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ С ПОВЕРХНОСТИ ЗЕМЛИ

5.2.1 Акустические зонды (содары)

Действие содаров (акустических радаров) основано на принципе рассеяния акустических волн атмосферой. Согласно теории рассеяния звука, звуковой импульс, излучаемый в атмосферу, рассеивается в ней под влиянием изменений индекса рефракции, вызываемых мелкомасштабными турбулентными флуктуациями температуры и скорости, которые происходят естественным образом в атмосфере и тесно связаны с наличием больших градиентов температуры и влажности в инверсиях. В случае обратного рассеяния (180°) возвратное эхо определяется лишь теми флуктуациями температуры, которые по масштабу составляют половину излучаемой акустической длины волны, а в других направлениях возвратное эхо вызывается колебаниями как температуры, так и скорости, за исключением угла в 90°, когда рассеяние не происходит.

Полезные сведения об акустическом зондировании содержатся в следующих публикациях: Brown and Hall (1978), Neff and Coulter (1986), Gaynor et al. (1990) и Singal (1990).

Разработано несколько различных типов акустических содаров, но оперативное применение нашли два обобщенных типа — моностатический содар и моностатический доплеровский содар.

Моностатический содар состоит из вертикально направленного источника пульсирующего звука и расположенного в том же месте приемника. Небольшая часть каждого звукового импульса рассеивается обратно в приемник под воздействием тепловых флуктуации, происходящих естественным образом в воздухе. Приемник измеряет интенсивность отраженного акустического сигнала. Как и в обычном радиолокаторе, временная задержка между передачей импульса и приемом эха указывает на дальность до цели. В бистатическом содаре приемник расположен на некотором удалении от источника звука, что необходимо для приема сигналов, вызываемых флуктуациями скорости.

Моностатический доплеровский содар наряду с измерением интенсивности отраженного сигнала также анализирует частотный спектр передаваемых и принимаемых сигналов для определения сдвига доплеровской частоты между передаваемым и обратно рассеянным звуком. Это различие возникает в связи с движением температурных флуктуаций в воздухе и позволяет измерять радиальную скорость ветра в атмосфере. В доплеровском содаре для определения компонентов ветра в трех направлениях обычно используются три луча: один направлен вертикально, а два других отклонены от вертикали. По этим компонентам рассчитываются вертикальная и горизонтальная составляющие ветра. Векторный ветер может быть представлен на графике «время-высота» с шагом по высоте порядка 30—50 м.

Максимальная высота, достигаемая акустическими содарами, зависит от параметров системы, но изменяется также в зависимости от атмосферных условий. Имеющиеся в продаже системы могут обычно достигать высоты зондирования 600 м и более с разрешением по высоте в несколько десятков метров.

Содар может иметь следующие характеристики:

Параметр	*Типовое значение*
Частота импульса	1 500 Гц
Длительность импульса	0,05—0,2 с
Период повторения	2—5 с
Ширина луча	15°
Акустическая мощность	100 Вт

Моностатические содары обычно дают возможность построить график время-высота для мощности обратно рассеянного эхо-сигнала. Такие графики содержат ценную информацию о внутренней структуре атмосферного пограничного слоя и могут в принципе использоваться как для мониторинга высоты инверсии и глубины слоя перемешивания (характеризующих состояние устойчивости пограничного слоя атмосферы), так и для мониторинга глубины тумана. Однако правильная интерпретация таких графиков требует значительного опыта и глубоких знаний, а также, желательно, дополнительной информации, основанной на данных измерений *in situ*, в совокупности со знанием общей метеорологической ситуации.

Системы моностатических доплеровских содаров обеспечивают измерения профилей ветра, а также информацию об интенсивности. Такие системы представляют собой экономически эффективный метод получения данных о ветре в пограничном слое и особенно пригодны для непрерывного мониторинга инверсий и ветра вблизи промышленных предприятий, где существуют потенциальные проблемы загрязнения.

Основным ограничением систем содаров, помимо ограниченного охвата по высоте, является их чувствительность к шумовым помехам. Они могут вызываться воздушным движением, осадками или сильным ветром. Такое ограничение не позволяет использовать содары в качестве всепогодных систем. Содары сами излучают звук, характер и уровень которого может раздражать проживающих неподалеку людей, и это может исключать их использование в условиях урбанизированной окружающей среды, пригодной по другим параметрам.

В некоторых системах для снижения влияния внешних источников шума и уменьшения раздражающего воздействия на людей используется поглощающая пена. Однако физические свойства такой пены изменяются со временем, и ее необходимо периодически заменять для предотвращения ухудшения характеристик прибора.

5.2.2 Радиолокаторы для измерения профилей ветра

Термин «измеритель профилей ветра» часто используется как аббревиатура для целого класса доплеровских радаров, которые специально разработаны для определения вертикальных профилей ветра. В отличие от традиционных метеорологических радиолокаторов, они способны проводить измерения даже при отсутствии осадков и облаков. Эта возможность измерения в чистом воздухе является поистине уникальной особенностью этого радиолокатора. Использование длин волн от 0,2 до 7 м (соответствующих частотам в диапазоне около 1300–40 МГц) позволяет обнаруживать эхосигналы, рассеянные под влиянием неравномерности показателя преломления воздуха. Если они имеют пространственные масштабы, равные половине длины волны, излучаемой радиолокатором, то возникает конструктивная интерференция, которая делает обратный сигнал достаточно сильным, чтобы его можно было обнаружить (условие Брэгга). Обратите внимание, что чистое рассеяние воздуха не наблюдается, если половинная длина волны радиолокатора меньше внутреннего масштаба турбулентности, когда неравномерности показателя преломления исчезают из-за диссипативных эффектов вязкости. В аппроксимации первого порядка турбулентные структуры перемещаются со скоростью ветра, являясь тем самым непосредственной мерой скорости ветра.

Измерители профилей ветра не только принимают электромагнитные волны, рассеянные под влиянием неравномерности показателя преломления, но и эхо, рассеянное от частиц (в основном, от осадков), воздушных объектов (птиц, летучих мышей, самолетов) и даже от плазмы в каналах молнии. Кроме того, эхосигналы от земли могут приниматься через боковые лопасти антенны. Относительный вклад этих различных процессов рассеяния является функцией длины волны радиолокатора.

Существует два метода измерения ветра радиолокационными измерителями профилей ветра, а именно доплеровский метод и метод с разнесенными антеннами (Fukao et al., 2014), при этом в большинстве действующих систем используется первый метод.

В доплеровском методе частотный сдвиг, вызванный движением рассеивающихся частиц вдоль линии видимости определенного направления луча, измеряется и преобразуется в радиальную скорость. Горизонтальная и вертикальная компоненты ветра получаются в результате последовательных радиальных измерений ветра как минимум в трех линейно независимых друг от друга направлениях. Получение вектора ветра основано на дальнейших предположениях о структуре поля ветра. Горизонтальная однородность и стационарность среднего поля ветра позволяет получить простое замкнутое выражение этого алгоритма (см. Teschke and Lehmann, 2017). В простых доплеровских конфигурациях с качанием луча используется вертикально направленный луч и около двух-четырех косых (отклонение около 15° от вертикали) лучей. Большее количество косых лучей дает в целом лучшие результаты, чем простой трехлучевой метод (Adachi et al., 2005). Возможны и другие конфигурации, такие как индикатор скорость-азимут.

Технология разнесенных антенн использует вертикально направленный радарный луч и, по крайней мере, три независимые приемные вертикально направленные антенны. Это позволяет проводить корреляционную оценку скорости ветра на основе видимого движения обратно рассеянной интерференции или дифракционной картины на местности. Для получения оценки горизонтального ветра необходимо внести поправки на временные изменения рассеивающих конструкций. Метод разнесенных антенн и доплеровский метод имеют сравнительные преимущества и недостатки, некоторые из которых описаны в работе Dolman and Reid (2014).

Выбор рабочей частоты зависит от требуемой высоты зондирования и вертикального разрешения, но на него сильно влияют нормативные ограничения. На практике большинство систем выпускается для трех полос частот (приблизительно 50, 400 и 1 000 МГц), определенных в соответствующих решениях о регулировании распределения спектра, принятых Всемирной конференцией по радиосвязи 1997 г. (резолюция 217). Получение необходимых частотных зазоров (эксплуатационных лицензий) может стать административной проблемой, а загрязнение радиочастотными помехами от других радиослужб, работающих в полосе частот, может привести к дополнительным трудностям в работе радиолокационного измерителя профилей ветра.

В приведенной ниже таблице представлены типовые характеристики.

Параметр профилометра	*Стратосфера*	*Тропосфера*	*Нижняя тропосфера*	*Атмосферный пограничный слой*
Частота (МГц)	50	400—500	400—500	1000
Высотный диапазон (км)	2—20	0,5—16	0,3—10	0,2—3
Вертикальное разрешение (м)	150—500	150—500	150—300	50—300
Типичный размер антенны (м)	100×100	10×10	6×6	3×3

В антеннах радиолокационных профилометров ветра, как правило, используется конструкция фазированной решетки с электронным управлением лучом, за исключением нескольких антенн тарельчатого типа с механическим управлением. Разрешение по вертикали зависит от длительности передаваемого импульса, и для конкретных настроек режима низкого и высокого разрешения обычно используются различные значения длительности импульса. Максимальная высота зондирования связана с длительностью импульса (через среднюю мощность), поэтому этот выбор делается в пользу высоты зондирования в ущерб разрешения по дальности. Методы сжатия импульсов также часто используются для улучшения высоты зондирования без ущерба для разрешения по дальности. В целом они эффективны, но потенциально могут порождать самопомехи (Wakasugi and Fukao, 1985).

Минимальная применимая высота зондирования зависит от размера антенны, длительности импульса, времени восстановления радиолокационного приемника и силы

сигнала возможного мешающего отражения от наземных предметов в ближнем диапазоне. Так как помехи от земной поверхности довольно изменчивы, эта минимальня высота зондирования может меняться в зависимости от времени и площадки.

Сила принимаемого сигнала, как правило, уменьшается с увеличением высоты. Это ограничивает высоту, до которой можно проводить измерения. В отличие от минимальной высоты зондирования, максимальная высота зондирования представляет собой статистическую величину, зависящую как от характеристик радиолокационного оборудования, так и от состояния атмосферы. Обычно она увеличивается с увеличением произведения средней мощности передатчика на апертуру антенны, но в основном подвергается физическому (чистое рассеяние воздуха) ограничению, заданному длиной используемой волны. Максимальная высота зондирования значительно варьируется в зависимости от метеорологических условий, и иногда могут возникать разрывы в покрытии на более низких высотах.

При установке профилометров следует проявлять осторожность, чтобы свести к минимуму мешающее отражение от наземных объектов и избежать возможных внутриполосных радиочастотных излучений других радиослужб.

Для крупных стратосферных профилометров требуются антенны большого размера и относительно мощные передатчики. В связи с этим бывает затруднительно найти соответствующую площадку, а их минимальная высота зондирования недостаточно хороша для некоторых применений. Преимущество их заключается в том, что они позволяют регулярно проводить измерения ветра до высоты около 20 км, и эти измерения не подвергаются сильному влиянию осадков. Тропосферные профилометры ветра, работающие в полосе частот 400—500 МГц, очевидно, являются наилучшим компромиссом между высотой зондирования и размером всей системы. Ветровые профилометры атмосферного пограничного слоя не так дороги и в них могут использоваться довольно небольшие антенны. Их вертикальная высота зондирования для измерений в чистом воздухе обычно ограничивается нижними слоями атмосферы, однако полезная вертикальная высота зондирования может значительно увеличиться во время выпадения осадков, когда рассеяние от гидрометеоров становится доминирующим отражающим механизмом.

Обработка сигнала для доплеровских ветровых профилометров аналогична обработке, применяемой на других доплеровских радарах. В отличие от метеорологических радаров, доплеровское разрешение скорости, как правило, лучше благодаря более длительному времени выдержки, а возможность алиасинга дальности и частоты может быть полностью исключена при разумной конфигурации режима измерений. Так как ветровые профилометры рассчитаны на получение очень слабых сигналов от колебаний показателя преломления, то обязательными являются специальные алгоритмы фильтрации отраженных сигналов от наземных объектов и периодических помех. Периодические помехи включают нежелательные отраженные сигналы от самолетов, птиц и насекомых. В частности, перелетные птицы могут привести к серьезным ошибкам в оценке скорости ветра, если не будет реализовано периодическое подавление помех (Bianco et al., 2013).

Измерение радиального ветра может быть выполнено с разрешением в несколько секунд. Поскольку для большинства профилирующих длин волн гидрометры представляют собой более эффективную радиолокационную цель, чем неоднородности по индексу преломления, измеренная радиальная скорость может быть средневзвешенной величиной скорости воздуха и скоростей рассеивающих частиц. Практический опыт показал, что горизонтальный вектор ветра может быть оценен с достаточной точностью как по чистому воздуху, так и по рассеянию частиц, так как рассеивающие частицы обычно почти мгновенно следуют за горизонтальным полем ветра. Таким образом, горизонтальный ветер действительно может быть получен практически в любых погодных условиях. Более крупные ошибки возникают только при нарушении неявных предположений, используемых в алгоритме оценки ветра. Обратите внимание, что вертикальный ветер можно измерить только в чистой (без частиц) атмосфере.

Радиолокационные ветровые профилометры являются проверенными системами, позволяющими проводить непрерывные, автоматические оперативные измерения среднего (аэрологического) вертикального профиля ветра непосредственно над площадкой. Типичное временное разрешение для одного профиля ветра составляет от 10 до 60 минут, в зависимости от характеристик и конфигурации приборов. Положительное влияние таких данных на численные прогнозы погоды было успешно продемонстрировано (см., например, Illingworth et al., 2015).

Дополнительные сведения можно найти в работах: Gossard and Strauch (1983), Hogg et al. (1983), Weber et al. (1990), Weber and Wuertz (1990), WMO (1994), Wilczak et al. (1996), Muschinski et al. (2005), Hocking (2011), Doviak and Zrnić (2014), Fukao et al. (2014) и Hocking et al. (2016).

5.2.3 **Радиоакустические системы зондирования**

Радиоакустическая система зондирования (РАСС) используется для измерения профиля виртуальной температуры в нижней тропосфере. С помощью доплеровского микроволнового радиолокатора прослеживается короткий акустический импульс высокой интенсивности, который излучается из того же места вертикально в атмосферу. Методика измерения основана на том, что акустические волны являются продольными и обуславливают изменения плотности окружающего воздуха. Эти изменения приводят к соответствующим изменениям локальных значений индекса рефракции атмосферы, что, в свою очередь, вызывает обратное рассеяние электромагнитной энергии, излучаемой микроволновым доплеровским радиолокатором, которая распространяется вместе с акустическим импульсом. Микроволновый радиолокатор измеряет скорость распространения этих возмущений индекса рефракции, набирающих высоту с локальной скоростью звука. Длина акустической волны выбирается так, чтобы она укладывалась в половине длины волны микроволнового радиолокатора (условие Брэгга), в этом случае энергия, обратно рассеянная от нескольких акустических волн, согласованным образом суммируется в приемнике, значительно увеличивая мощность отраженного сигнала. На основе измерения скорости распространения акустического импульса можно рассчитать виртуальную температуру, поскольку она пропорциональна квадрату разности скорости распространения импульса и вертикальной скорости движения воздуха.

По этой методике имеется обширная литература, в частности работы May et al. (1990), Lataitis (1992*a*, 1992*b*) и Angevine et al (1994).

Для получения профиля виртуальной температуры разработаны разнообразные экспериментальные методы с применением качающейся акустической частоты. Однако для практического применения предстоит разработать профилометры ветра повышенной мощности и чувствительности. Разработано несколько РАСС, в которых к радиолокаторам профилей ветра упомянутого выше типа добавлены акустический источник и соответствующая обработка данных. Для частот радиолокатора 50, 400 и 1 000 МГц требуются акустические частоты порядка 110, 900 и 2 000 Гц. На частоте 2 000 Гц высота зондирования ввиду акустического ослабления, как правило, ограничена 1—2 км. На частоте 900 Гц в применяемых на практике системах высота зондирования может достигать 2—4 км, а на частоте 110 Гц при использовании крупных профилометров с частотой 50 МГц максимально достижимая высота зондирования при благоприятных условиях может составлять 4—8 км.

Сравнения с радиозондовыми измерениями показывают, что при хороших условиях виртуальная температура может измеряться с точностью до 0,3 °C с разрешением по высоте 100—300 м. Однако при сильном ветре и осадках точность таких измерений может резко уменьшиться.

Измерения с помощью РАСС — перспективный метод получения профилей виртуальной температуры. Он используется в оперативном режиме, но имеет известные погрешности.

Потребуются дополнительные исследования, прежде чем их можно будет с уверенностью использовать в диапазонах высоты, разрешения и точности, которые отвечают требованиям пользователей.

5.2.4 **Микроволновые радиометры**

Тепловое излучение в микроволновом диапазоне формируется в атмосфере, главным образом, кислородом, водяным паром и жидко-капельной влагой и зависит от их температуры и пространственного распределения. Для такого газа, как молекулярный кислород, распределение которого по высоте при заданном приземном давлении хорошо известно, тепловое излучение содержит информацию, прежде всего, о температуре атмосферы. Вертикальные профили температуры в нижней атмосфере могут быть получены с помощью наземных пассивных микроволновых радиометров, измеряющих микроволновое тепловое излучение молекулярного кислорода в спектральной полосе частот около 60 ГГц. Спектральные измерения в верхней части полосы частот 22—30 ГГц, которая расширяется с ростом давления в условиях абсорбции излучения водяными парами, дают информацию о количестве водяного пара, жидко-капельной влаги и вертикальном распределении водяного пара. Кроме того, спектральные измерения в двух полосах в комбинации с измерениями температуры облаков инфракрасного спектра дают информацию о совокупном объеме и вертикальном распределении жидко-капельной влаги. Дополнительные сведения можно почерпнуть в работах Hogg et al. (1983), Westwater et al. (1990), Solheim et al. (1998), Ware et al. (2003) и Westwater et al. (2005).

Радиометры, работающие на различных частотах, максимально чувствительны к температуре в конкретных диапазонах атмосферного давления. График чувствительности как функции давления представляет собой колоколообразную кривую (весовая функция). Частоты радиометров выбираются таким образом, чтобы пики весовых функций были оптимально распределены по высотам, представляющим интерес. Профили температуры над пограничным слоем рассчитывают с помощью численных методов решения обратных задач, используя измеренное излучение и весовые функции. Методы космической радиометрии, описанные в томе IV, не позволяют получить точные профили температуры вблизи поверхности и в пограничном слое. Это объясняется относительно большой шириной весовых функций, излучением земной поверхности и тем фактом, что каналы, чувствительные к нижним слоям атмосферы, также будут чувствительны к температуре поверхностного слоя.

Достаточно изучены принципы наземного зенитного микроволнового радиометрического зондирования температуры и влажности. Температурные весовые функции вертикально направленных зондирующих радиометров имеют узкие пики у поверхности земли, величина которых снижается с высотой. Кроме того, чувствительность к эмиссиям молекулярного кислорода и водяного пара не ухудшается излучением от поверхности земли. Это дает возможность получения точных данных о температуре и влажности при относительно высоком разрешении в атмосферном пограничном слое и нижних слоях тропосферы. С другой стороны, ослабление микроволн в атмосфере и относительно большая ширина весовых функций для каналов, чувствительных к верхней части атмосферы, ограничивают точность получаемых температурных профилей над пограничным слоем. Методы обращения для вертикально направленных микроволновых радиометров основаны либо на климатологии температур и влажности для данного места, которая, как правило, определяется по данным радиозондирования, либо на вариационных методах. моделирования соотношения между измеренными профилями излучения, вертикальными профилями температуры и влажности.

Наземные радиометры обычно имеют низкую точность при получении температурных профилей во время дождя или снега. Это связано с накоплением воды, снега (Woods et al., 2005) или льда (Fernández-González et al., 2014) над обтекателем, отсутствием в алгоритме получения эффектов рассеяния и излучения/поглощения осадков, а также усиленным ослаблением микроволн в атмосфере из-за осадков. Первая проблема может быть решена путем использования водостойкого обтекателя и направления воздушного потока над поверхностью радиометра, чтобы избежать скопления воды, снега и льда (Chan, 2009)

или проведения наблюдений под внезенитным углом, чтобы избегать тонких пленок воды (Xu et al., 2014). Что касается второй проблемы, она может быть решена путем включения наблюдений с радара и параметризации микрофизики дождя в процесс получения профилей (Chan and Lee, 2015).

Наземные и спутниковые радиометры эффективно дополняют друг друга. Спутниковые измерения обеспечивают приблизительное разрешение во времени и пространстве в верхних слоях тропосферы, а наземные измерения дают высокое разрешение во времени и пространстве в пограничном слое и нижней тропосфере. Полученные наземными радиометрами наборы данных можно использовать в цифровых моделях погоды для уточнения краткосрочных прогнозов (1—12 ч) путем предоставления данных по верхним слоям воздуха в интервале между измерениями радиозондов. Или же приблизительные значения радиояркостных температур, полученные наземными радиометрами, могут непосредственно вводиться в цифровые модели погоды. Такой подход улучшает результаты путем избегания ошибок, возникающих в процессе решения обратных задач для получения профиля метеорологических параметров, а также позволяет учитывать факторы, связанные с зависимостью от потока, при ассимиляции. Подобный метод включения приблизительных данных излучения спутникового радиометра непосредственно в метеорологические модели продемонстрировал несколько лет назад более точные результаты и сейчас широко используется.

Основные преимущества наземных радиометров заключаются в их способности проводить непрерывные измерения по времени и в их способности измерять водозапас облаков. Непрерывные измерения температуры, влажности и жидко-капельной составляющей облаков можно использовать для уточнения прогнозов текущей погоды и краткосрочных прогнозов осадков. Изменение яркостной температуры может также помочь при наукастинге наступления конвективных событий (Chakraborty et al., 2016). Эти непрерывные измерения можно также использовать для обнаружения тенденции или времени изменения зафиксированных изменений температуры (для исследований по выбросам газов, загрязнению воздуха, по определению тепловых выбросов городов, для прогнозов неблагоприятных условий погоды и для выпуска предупреждений) (Kadygrov et al., 2003). Данные радиометра в реальном времени также могут быть использованы для оповещения о сдвигах ветра для использования в авиации (Chan and Lee, 2013).

В ходе длительных арктических исследований, исследований на средних широтах и в тропиках были широко продемонстрированы надежность и точность радиометров, обеспечивающих получение профилей метеорологических параметров (Güldner и Spänkuch, 2001; Liljegren et al., 2005). Один из результатов 13-месячной эксплуатации (Gaffard и Hewison, 2003) демонстрируют, что значение среднего квадратического отклонения (СКО) разницы температуры, полученной радиозондом, и температуры, полученной микроволновым радиометром, находится в диапазоне 0,5 K (у поверхности земли) — 1,8 K (на высоте 5 км). Второй результат (Güldner и Spänkuch (2001)) основан на 18-месячной эксплуатации, в ходе которой ежедневно проводилось сравнение полученных данных радиометра с данными четырех зондирований. Результаты говорят о схожих значениях СКО в диапазоне от 0,6 K (у поверхности земли) до 1,6 K (на высоте 7 км в летнее время и 4 км в зимнее время). Величина СКО данных по водяному пару не превышает 1 г·м$^{-3}$ на всех высотах (Gaffard и Hewison, 2003; Güldner и Spänkuch, 2001).

Наземные радиометры, дающие профили метеорологических параметров, демонстрируют существенные экономические и практические преимущества в тех случаях, когда требуются измерения температуры, влажности и водозапаса облаков нижней тропосферы с высоким временным разрешением, и в тех случаях, когда умеренное вертикальное разрешение является приемлемым. За последние несколько лет рыночные цены на радиометры, регистрирующие профили данных, существенно снизились.

5.2.5 **Лазерные локаторы (лидары)**

Электромагнитная энергия в оптическом диапазоне длин волн и вблизи него (от ультрафиолетового через видимый диапазон к инфракрасному), генерируемая лазерами,

рассеивается молекулами атмосферного газа и взвешенными частицами. Такого рассеяния достаточно, чтобы применить принцип локации для проведения наблюдений в атмосфере с помощью лидара (обнаружение света и дальнометрия). Оптическое рассеяние можно в целом разделить на неупругое и упругое. Когда длина волны излучения лазера, рассеянной атмосферными составляющими, отличается от первоначальной длины волны лазера, процесс называется неупругим рассеянием. Наиболее широко применяемым процессом неупругого рассеяния, используемым в экспериментальных атмосферных лидарных системах, является рассеяние Рамана, которое представляет собой результат обмена энергией между потоком падающих фотонов и молекулярным ротационным и вибрационным состояниями рассеивающих молекул. В процессе упругого рассеяния длины падающей и рассеянной волн одинаковы. Это может быть рассеяние Рэлея или Ми, что зависит от разновидностей частиц и их размеров по отношению к длине падающей волны лазера (более подробное описание рассеяния Рэлея см. в главе 7 настоящего тома). Оба эти основных процесса рассеяния могут происходить в атмосфере одновременно.

Дополнительную информацию можно почерпнуть в работах Hinkley (1976), WMO (1982), Thomas (1991) и Syed и Browell (1994).

Большинство лидаров действует в моностатическом режиме, при котором приемник расположен в том же месте, что и лазерный передатчик. В типовой лидарной системе для излучения импульсов когерентного света в атмосферу используется импульсный лазер. Средняя мощность используемых лазеров варьирует от нескольких милливатт до десятков ватт. Оптический телескоп, установленный рядом с лазером, используется для захвата энергии обратного рассеяния. Свет, собираемый телескопом, фокусируется на фотоумножитель или фотодиод. Полученная информация обычно поступает на дисплей для оперативного мониторинга и далее в компьютер для более детального анализа.

Величина обратного сигнала зависит как от величины рассеяния от цели, так и от двустороннего ослабления между лидаром и целью — такое ослабление зависит от части энергии луча, рассеянной на его пути, и от поглощения атмосферными газами. Процессы рассеяния и поглощения используются в различных лидарах для проведения разнообразных измерений.

Лидары, основанные на упругом рассеянии (их называют лидарами Рэлея или Ми, либо просто лидарами), используются, главным образом, для исследований облаков и твердых частиц. Измерение высоты нижней границы облаков с помощью лидара является очень простым: можно легко выявить быстрое увеличение сигнала, которое вызывает обратное рассеяние от нижней границы облаков, и, измерив время прохождения лазерного импульса от передатчика до нижней границы облаков и обратно в приемник, можно определить высоту нижней границы облаков (см. том I, глава 15).

Лидары используются также для обнаружения взвешенных частиц, присутствующих в относительно чистом воздухе, и для составления карт некоторых структурных особенностей, таких как термическая устойчивость и высота инверсий. Содержание природного аэрозоля в нижней атмосфере достаточно велико, что позволяет лидарам непрерывно измерять скорость движения воздуха в отсутствие осадков, подобно метеорологическим радиолокаторам. Наиболее широко применяемые методы измерения атмосферного ветра включают применение импульсного ветрового доплеровского лидара и когерентного доплеровского ветрового лидара непрерывного излучения, ветрового доплеровского лидара прямого обнаружения и резонансного ветрового доплеровского лидара. В приложении описаны требования и процедуры испытаний для гетеродинных импульсных доплеровских лидаров.

Лидары можно также использовать для составления карт и измерения концентраций антропогенных частиц, например, тех, которые поступают в атмосферу из промышленных дымовых труб. Лидарные наблюдения внесли весомый и хорошо документированный вклад в исследования концентраций стратосферных аэрозольных частиц, на которые оказывают сильное влияние крупные вулканические извержения. Эти частицы играют важную роль в глобальном радиационном балансе.

Гораздо труднее получить количественные данные об облаках ввиду изменений формы и распределения капель, содержания воды, различий между водой, льдом и смешанными фазами, а также свойств взвешенных частиц и аэрозолей. Действительно, такие измерения требуют комплексных многопараметрических исследовательских систем, проводящих несколько измерений одновременно с использованием гипотез, описывающих оптические свойства среды, и сложных математических методов преобразования данных.

Лидар дифференциального поглощения (ДИАЛ) основан на использовании сильной зависимости изменения коэффициента поглощения атмосферных газов от длины волны. Система ДИАЛ обычно использует лазер, который может быть настроен на две близко расположенные частоты, одна из которых энергично поглощается частицами газа, а другая нет. Различие в результатах измерений как функция дальности может быть использовано для оценки концентрации исследуемого газа. Это наиболее перспективный метод дистанционного зондирования для определения состава атмосферы, успешно использовавшийся для измерения концентраций воды, диоксида серы, диоксида азота и в особенности озона.

Применение Рамановского рассеяния представляет особый интерес ввиду того, что рассеянная радиация сдвинута по частоте, и этот сдвиг зависит от вида молекул (линии Стокса). Мощность сигнала обратного рассеяния связана с концентрацией этих молекул. Рамановские лидары не требуют специальной длины волны или настройки лазера; длины волн лазера могут быть выбраны в части спектра, свободной от атмосферного поглощения. С помощью измерения спектра Рамана можно проводить измерения выборочных составляющих атмосферы с пространственным разрешением, что использовалось для получения тропосферных профилей водяного пара, молекулярных азота и кислорода и малых газовых составляющих атмосферы. Основные недостатки сводятся к малой чувствительности на большом расстоянии ввиду малых поперечных сечений рассеяния и потребности в лазерах высокой мощности, что небезопасно для глаз при практическом применении.

Лидарные системы предоставляют большой объем полезной информации для научных исследований, однако их эксплуатация имеет ограничения. Это связано с тем, что они относительно дороги и для их разработки, установки и эксплуатации требуется весьма квалифицированный персонал. Кроме того, некоторые лидары могут работать лишь при определенных условиях, таких как ночные измерения, либо отсутствие осадков.

5.2.6 Глобальная навигационная спутниковая система

Главной целью ГНСС является определение местоположения, однако, поскольку атмосферная составляющая влияет на точность оценки местоположения, метеорологическое содержание может быть получено по расчетной ошибке. Время задержки, которым характеризуется сигнал, исходящий от спутника и измеряемый приемником на Земле, связано с отражаемостью вдоль траекторий сигнала и, таким образом, связано также с температурой и влажностью вдоль этой траектории.

Метеорологическая информация, полученная с наземной ГНСС, требует наличия наземной сети приемников ГНСС, передачи данных и средства обработки данных. Как правило, сеть приемников ГНСС устанавливается для целей проведения наблюдений за земной поверхностью, и, как результат, было установлено тесное сотрудничество с национальными учреждениями по проведению наблюдений в нескольких странах. Это сотрудничество обычно основано на совместном использовании площадок и/или совместном использовании информации.

Дополнительная информация о методах обработки данных имеется в публикации WMO (2006*b*).

5.2.6.1 *Описание Глобальной навигационной спутниковой системы*

ГНСС состоит из трех сегментов: космический, наземный и пользовательский сегменты. Космический сегмент включает ряд находящихся на орбите спутников. В настоящее время развернуты или разворачиваются четыре системы: ГСОМ (США), ГЛОНАСС (Российская Федерация), Галилео (Европейский союз) и Компасс (Китай). Спутники ГНСС передают сигналы с временным кодированием на ряде несущих частотах волн, которые являются разными для разных спутниковых систем.

Принцип работы ГНСС является одинаковым для всех четырех систем. Бортовые атомные часы контролируют все сигнальные компоненты на спутниках. Наземный сегмент контролирует корректировку орбиты спутников и обеспечивает передачу в эфир эфемерид, которые распространяются в пользовательский сегмент через навигационное сообщение сигнала ГНСС. Антенна и приемник ГНСС (наземного или космического базирования) составляют пользовательский сегмент. Приемник сравнивает кодированный по времени сигнал со спутников ГНСС с показаниями своих собственных внутренних часов и, на основе чего приемник может рассчитывать псевдо-расстояния (P) до каждого находящегося в поле зрения спутника. Когда проводятся наблюдения как минимум четырех псевдо-расстояний, то приемник может рассчитывать свои позицию и временную ошибку. Точность стандартного метода позиционирования, использующего кодированные сигналы времени, составляет порядка 3—5 м.

Основными измеряемыми величинами ГНСС являются псевдо-расстояние (P) и несущая фаза (L). Например, сигналы ГСОМ передаются в эфир на двух разных частотах: а именно: L1 (1 575,42 МГц) и L2 (1 227,60 МГц). На обеих частотах передаются измеряемые величины P и L. Таким образом, у двухчастотного приемника на период дискретизации приходится четыре измеряемых величины. Уравнения 5.1 и 5.2 представляют как P, так и L, выраженные в виде суммы всех привнесенных ошибок, составляющих измерения ГНСС, т. е.:

$$P = \rho + c\left(dt_{\text{rec}} - dt_{\text{sat}}\right) + \delta_{\text{rel}} + L_{\text{atm}} + I + K + M + \delta_{\text{tide}} + \varepsilon_P \tag{5.1}$$

$$L = \rho + c\left(dt_{\text{rec}} - dt_{\text{sat}}\right) + \delta_{\text{rel}} + L_{\text{atm}} - I + N\,\omega_L + K + M + \delta_{\text{tide}} + \varepsilon_L \tag{5.2}$$

где c — это скорость света; ρ — геометрическая дистанция между фазовым центром спутника и фазовым центром приемника; dt_{sat} — сдвиг спутникового датчика времени; dt_{rec} — сдвиг датчика времени приемника; L_{atm} — задержка в тропосфере или общая наклонная задержка, обусловленная рефрактивным характером атмосферы; I — задержка в ионосфере вдоль трассы луча; δ_{rel} — релятивистическая ошибка; K — инструментальная погрешность приемника; M — эффект многолучевости; δ_{tide} — позиционная погрешность приемника, обусловленная полярными приливами и отливами, приливно-отливными явлениями твердой оболочки Земли и океанической нагрузкой; N — обозначение неоднозначности (относится только к измерениям несущей фазы, уравнение 5.2), ω_L — вклад одной длины волны, обусловленный круговой поляризацией сигнала; и ε — немодулируемая погрешность из-за шумов.

Измеряемые величины имеют разные уровни неопределенности и разные характеристики. В частности, измерения фаз имеют уровень шума в несколько миллиметров и являются весьма точными по сравнению с псевдо-расстоянием, которое имеет неопределенность в несколько метров. Фаза несущей частоты является первичной и самой важной измеряемой величиной при оценке параметра низкой неопределенности, однако наблюдаемые величины псевдо-расстояния лучше подходят для наблюдения и устранения конкретных погрешностей, связанных с приемником (многолучевое распространение и т. д.). Для удаления ионосферного эффекта первого порядка используется линейное сочетание однородной наблюдаемой величины (P или L), измеряемой на двух разных частотах. Другие методы, такие как двойное дифференцирование, могут удалять временные ошибки спутников и приемников. Это требует, однако, тщательной обработки данных ГНСС.

5.2.6.2 *Тропосферный сигнал Глобальной навигационной спутниковой системы*

Превышение траектории сигнала в атмосфере вызвано рефракцией и изгибом сигнала, обусловленных градиентами показателя преломления n. Согласно принципу Ферма, эта чрезмерная траектория выражается формулой:

$$L_{\text{atm}} = {}_s\int n\, ds - D + \Delta S \approx {}_s\int (n-1)\, ds \tag{5.3}$$

где D (=$\int ds$) — это геометрическое расстояние, а ΔS — чрезмерная траектория, обусловленная фактором изгиба; последний может не учитываться для углов места более 10 градусов. Преломляющая способность N определяется как $N = 106\,(n - 1)$ и, согласно Smith and Weintraub (1953) и Thompson et al. (1986):

$$\begin{aligned} N &= k_1\, \rho\, R_d + \left(k_2 R_v - k_1 R_d + R_v / T\, k_3\right) \rho_w \\ &= N_h + N_w \end{aligned} \tag{5.4}$$

для нейтральной атмосферы. В данном уравнении ρ — это плотность воздуха (кг·м$^{-3}$); ρ_w — плотность водяного пара (кг·м$^{-3}$); T — температура (K) и R_v = 287,05 Дж·кг$^{-1}$·K^{-1} и R_v = 461,51·Дж·кг$^{-1}$·K^{-1} — это газовые постоянные для сухого воздуха и водяного пара. Эмпирическими постоянными являются k_1 = 77,6 K·гПа$^{-1}$, k_2 = 70,4 K·гПа$^{-1}$ и k_3 = 373 900 K^2·гПа$^{-1}$ (Thayer, 1974). Первый член в уравнении 5.4 — это гидростатическая рефракция N_h, а второй член называется влажной рефракцией N_w.

В рамках так называемого сетевого решения данных ГНСС тропосферная задержка картируется в зенитном направлении для всех углов места и азимутальных углов. Таким образом снижается число неизвестных и может быть точно определена позиция приемника. Закартированная наклонная общая задержка по вертикали именуется общей задержкой по вертикали (ZTD). При расчете точного местоположения может быть получена оценка атмосферной составляющей сигнала. ZTD может быть представлена в виде суммы гидростатической задержки по вертикали (ZHD) и влажной задержки по вертикали (ZWD) (или в более лучшем варианте, а именно негидростатической задержки по вертикали). Интегралы при гидростатической и влажной рефракции в вертикальном направлении (выраженные в метрах) составляют:

$$\text{ZHD} = 10^{-6}\, {}_z\int N_h\, dz \tag{5.5}$$

$$\text{ZWD} = 10^{-6}\, {}_z\int N_w dz \tag{5.6}$$

5.2.6.3 *Интегральное содержание водяного пара*

Гидростатическая задержка по вертикали связана с сухой составляющей атмосферы и в силу своего стационарного характера может быть рассчитана весьма точно, используя данные измерений приземного давления (p_s) и местоположение приемника (высота h и широта φ), используя, например, аппроксимацию Саастамойнена (1972), а именно:

$$\text{ZHD}_{\text{saas}}\left(p_s, h, \varphi\right) = 2.2768 \cdot 10^{-5}\, p_s \left(1 - 2.66 \cdot 10^{-3} \cos\left(2\varphi\right) - 2.8 \cdot 10^{-7}\, h\right)^{-1} \tag{5.7}$$

ZHD представляет приблизительно 90 % общей задержки по тропосферной трассе. С другой стороны, невозможно достаточно хорошо смоделировать ZWD на основе приземных данных из-за неравномерного распределения водяного пара в атмосфере. Формула ZWD может быть переписана следующим образом (согласно Davis et al., 1985):

$$\text{ZWD} = 10^{-6}\left[k_2 R_v - k_1 R_d + k_3 R_v \left({}_z\int \rho_w\, T^{-1}\, dz\right)\left({}_z\int \rho_w\, dz\right)^{-1}\right] {}_z\int \rho_w\, dz \tag{5.8}$$

и посредством определения взвешенной средней температуры в виде:

$$T_m = \left({}_z\int \rho_w\, dz\right)\left({}_z\int \rho_w\, T^{-1}\, dz\right)^{-1} \tag{5.9}$$

затем:

$$\mathrm{ZWD} = k'(T_m)\int_z \rho_w \, dz = k'(T_m)\,\mathrm{IWV} \tag{5.10}$$

где IWV — это вертикально интегрированный столб водяного пара, находящегося над приемником ГСОМ. Основываясь, например, на данных радиозондовых наблюдений, можно рассчитать средневзвешенную температуру по приземной температуре (T_s), т. е. $k'(T_m) \approx k(T_s)$ (Bevis et al., 1994). Таким образом, IWV может быть рассчитано, используя оценочное значение ZTD, данные о приземном давлении (p_s), высоте антенны (h) и широте (φ) приемника:

$$\mathrm{IWV} = k(T_s)^{-1}\left(\mathrm{ZTD} - \mathrm{ZHD}_{\mathrm{saas}}(p_s, h, \varphi)\right) \tag{5.11}$$

Величина $k(T_s)$ приблизительно равна 6,5 кг·м$^{-3}$.

5.2.6.4 *Неопределенности измерений*

Поскольку ZTD является оценочной величиной, точность ее расчета зависит от используемого метода, точности используемой исходной информации, стабильности местоположения приемника и многих других факторов. Например, точность позиции спутниковых орбит будет в целом более высокой через приблизительно 14 дней после того, когда доступными станут так называемые окончательные орбиты. В этой связи необходимо проводить различия между расчетами ZTD в оперативном режиме времени и расчетами после обработки данных. Точность показателя IWV, очевидно, тесно связана с точностью расчета ZTD.

Неопределенность измерений при расчетах в оперативном режиме времени составляет порядка 10 мм. Для расчетов, проведенных после обработки данных, это значение составляет порядка 5–7 мм. Неопределенность измерений IWV зависит от общего количества водяного пара и составляет порядка 5–10 % (Elgered et al., 2004). Средние величины характеризуются четким сезонным признаком: в средних широтах весьма низкие значения могут наблюдаться зимой (ниже 5 кг·м$^{-2}$), а значения в 40 кг·м$^{-2}$ могут наблюдаться в течение лета. В тропиках необычными не являются значения выше 50 кг·м$^{-2}$.

5.3 КОНТАКТНЫЕ МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЙ

5.3.1 Шаропилотные наблюдения

Шаропилотные наблюдения часто используются для получения данных о ветре в атмосферном пограничном слое и обычно выполняются с помощью оптических теодолитов или радиолокаторов слежения. В томе I, глава 13, представлено более общее описание средств для измерения ветра.

При проведении зондирований в нижней тропосфере желательно, чтобы скорость подъема шара была невелика, что позволяет иметь большее число точек измерений по вертикали. Уменьшение скорости подъема достигается либо с помощью тормозного парашюта, либо подбором оптимального соотношения веса и объема оболочки.

Для слежения с помощью радиолокатора под шаром подвешивается небольшая радиолокационная мишень. При зондировании в нижней тропосфере радиолокатор должен обеспечивать измерение данных с короткими интервалами, равными 100 м; при этом в идеале следовало бы запускать шар с площадки, отдаленной от локатора в подветренном направлении на расстояние, превышающее этот минимальный интервал.

Основные измерения ветра могут проводиться с использованием одного оптического теодолита, но для того, чтобы получить достаточно точные профили ветра, требуется система из двух теодолитов. Базисная линия между теодолитами должна превышать один километр. Для облегчения процесса зондирования, а также для обеспечения большей

точности определения высоты теодолиты должны быть оснащены компьютерными интерфейсами для своевременного ввода данных и проведения необходимых расчетов. При хороших условиях видимости профили можно получать до высоты 3 000 м. Однако этот метод непригоден при неблагоприятных условиях, таких как при выпадении осадков, низкой облачности или тумане.

Разумеется, существует возможность получения дополнительных данных о ветре в нижней атмосфере с использованием обычных радиозондов путем проведения более частых измерений в течение первых нескольких минут нормального полного зондирования, т. е. от 2 до 10 измерений в минуту.

5.3.2 Радиозонды атмосферного пограничного слоя

Обычные радиозондовые системы подробно описаны в томе I, глава 12. Для проведения наблюдений в атмосферном пограничном слое и нижней тропосфере разработаны специальные радиозонды. Они отличаются от обычных радиозондов тем, что обеспечивают повышенную чувствительность и позволяют проводить более частые измерения. Такие радиозонды обычно используются для измерения профилей температуры, влажности и ветра в слое от поверхности Земли до высоты обычно 3—5 км.

Скорость вертикального подъема таких радиозондов обычно устанавливается между 150 и 200 м·мин$^{-1}$, т. е. подъем происходит значительно медленнее, чем в случае обычных радиозондов. Медленный подъем позволяет более детально измерять вертикальные профили. Скорость подъема обычно определяется выбором оболочки соответствующих размеров, но может изменяться путем применения тормозного парашюта.

Поскольку приборы должны достигать лишь ограниченной высоты, они обычно могут подниматься с помощью шаропилотной оболочки. В остальном процесс зондирования и обработки данных почти тот же самый, что и при обычном радиозондировании.

В случае зондирований до высоты не более 2 000 м можно обойтись без датчика давления, в результате чего радиозонд станет более простым и дешевым. Имеются также еще более простые системы, которые измеряют только температуру.

К радиозондам атмосферного пограничного слоя предъявляются следующие основные требования[1]:

Переменная	*Рабочий диапазон*	*Разрешение*
Давление	1 050 до 500 гПа	±0,5 гПа
Температура	+40 °C до –40 °C	±0,1 K
Влажность	100 % до 20 (или 10) %	±2 %
Скорость ветра	0,5 до 60 м·с$^{-1}$	±0,5 м·с$^{-1}$
Направление ветра	0° до 360°	±5°

Измерения обычно производятся, по крайней мере, каждые 30 с для получения вертикального разрешения от 50 до 100 м.

5.3.3 Специально оснащенные вышки и мачты

Специально оснащенные вышки и мачты используются для многих целей, особенно для целей оценки распространения атмосферного загрязнения. Этот вопрос обсуждается в работе Panofsky (1973).

[1] Данные требования к измерениям профиля в пограничном слое отличаются от требований к приземным измерениям, содержащихся в приложении 1.A главы 1 тома I.

Для некоторых целей высота мачты может достигать 100 м, а при мониторинге загрязнения воздуха и осуществлении программ контроля она должна превышать высоту основных источников загрязнения минимум на 50 м.

Измерение температуры, влажности и ветра следует производить на нескольких уровнях (как минимум на двух-трех), самый нижний из которых должен находиться на уровне стандартной метеорологической будки, расположенной поблизости от вышки или мачты. Число уровней зависит от поставленной задачи и от высоты вышки или мачты. Измерение только на двух уровнях не обеспечивает получения информации для построения вертикального профиля метеорологических элементов и поэтому используется очень ограниченно. Как правило, число уровней измерения при исследовательских работах больше, чем при стандартных наблюдениях.

Обычно данные обрабатываются и представляются автоматически вместе с разностями между уровнями, которые характеризуют метеорологические условия. Если данные предназначаются для непосредственного использования специалистами, не являющимися метеорологами, например, специалистами, отвечающими за контроль поддержания уровней загрязнения воздуха в безопасных пределах, они часто подвергаются дальнейшей обработке на компьютере для получения производных величин, легко применимых к решаемой задаче.

Как правило, для измерения на вышках и мачтах используются следующие датчики:

a) температура: электрические термометры сопротивления или термопары в защитных экранах, аспирационные или не аспирационные;

b) влажность: психрометры, электрохимические или электромеханические датчики в защитных экранах;

c) ветер: чашечные и лопастные вертушки, звуковые или тепловые устройства.

Все датчики должны иметь линейные или линеаризованные характеристики, а их временные постоянные должны быть достаточно малы, чтобы полученные данные адекватно отражали локальные изменения метеорологических элементов.

Важно, чтобы конструкция башни или мачты не оказывала значительного влияния на датчики и результаты измерений. Для открытых конструкций длина стационарных или выдвижных стрел должна составлять не менее двух метров; при этом желательно, чтобы длина стрелы давала возможность разместить датчики на расстоянии от вышки или мачты, равном как минимум десяти диаметрам вышки. Для жестких конструкций или в случае невозможности соблюдения требуемой длины стрел на каждом уровне необходима двойная система, при которой стрелы располагаются на противоположных сторонах вышки или мачты и длина их должна превышать диаметр конструкции минимум в три раза. Измерения в конкретный момент производятся только теми датчиками, которые расположены с наветренной стороны.

Иногда, в особых ситуациях, вышки можно использовать для получения профилей метеорологических элементов, не устанавливая фиксированных датчиков; при этом используется упрощенный метод зондирования. Как можно выше укрепляется блок с веревкой, достигающей уровня земли. С помощью этой веревки посредством ручной или механической лебедки радиозонд перемещается по вертикали на требуемые уровни. С радиозонда, оснащенного ветровыми датчиками, данные передаются на соответствующую приемную наземную систему. При этом можно достичь существенно большего вертикального разрешения и получить более подробную информацию, чем при установке стрелы, причем можно также определить высоты с наиболее значимыми характерными особенностями. Однако длительное наблюдение возможно только на одном уровне.

При некоторых погодных условиях высота башни может оказаться недостаточной для точного определения протяженности распространения загрязнения. В таких случаях, если

в пределах 50 км от башни нет станции радиозондирования, должно быть установлено специальное оборудование для проведения локальных зондирований возле башни или мачты до высоты около 3 000 м. Помимо главной цели полученные данные могут дополнять информацию основной аэрологической сети, а также служить для более детального изучения местных погодных явлений.

Измерительное оборудование на башнях требует периодической проверки высококвалифицированным обслуживающим персоналом, которому следует обращать особое внимание на состояние и функционирование датчиков, регистраторов, а также соединительных проводов, вилок и розеток, подвергающихся воздействию внешних погодных условий.

5.3.4 Специально оснащенные привязные аэростаты

Привязные аэростаты, в основном, применяются для измерения профилей температуры, влажности и ветра (и их краткосрочных изменений) от земной поверхности до высоты около 1 500 м, а также для долговременного исследования метеорологических условий на одном или нескольких выбранных уровнях. Необходимые для этого датчики подвешиваются в одном или нескольких специальных контейнерах под аэростатом или прикрепляются зажимом к тросовому кабелю. Их сигналы передаются на Землю по радио или по проводам, вмонтированным в тросовый кабель. Эта методика описана в работе Thompson (1980).

В системах привязных аэростатов, как правило, используются либо большие (приблизительно 600 $м^3$), либо малые (приблизительно 10—100 $м^3$) аэростаты. Малые аэростаты обычно используются для получения профилей, а большие для производства измерений на нескольких уровнях. Оболочки для привязных аэростатов должны конструироваться таким образом, чтобы обеспечивать хорошую обтекаемость и достаточную подъемную силу. Они обычно наполняются гелием. Большие аэростаты должны поднимать груз до 50 кг (в дополнение к тросовому кабелю) на высоту 1 500 м. Должна быть обеспечена возможность проведения измерений при скорости ветра до 5 $м \cdot с^{-1}$ у поверхности Земли и до 15 $м \cdot с^{-1}$ на высотах рабочего диапазона. Во избежание обрыва тросовый кабель большой оболочки должен выдерживать нагрузку 2 000—3 000 кг (200—300 кг для малых оболочек).

Запуски привязных аэростатов должны производиться в соответствии с национальными правилами обеспечения безопасности полетов авиации. С этой целью, а также для удобства обслуживания персоналом настоятельно рекомендуется использовать оболочки хорошо различимых цветов, а также предупредительные огни в ночное время. Наличие автоматического устройства для быстрого выпуска газа из оболочки обязательно, наличие металлизированной радиолокационной мишени, подвешенной под аэростатом, желательно.

Основными факторами, влияющими на возможность запусков привязных аэростатов, являются скорость ветра на высотах, турбулентность вблизи поверхности Земли и молнии.

Лебедки, использующиеся для управления аэростатом, могут быть ручными или электрическими. Должна быть обеспечена подача кабеля по крайней мере двумя скоростями (например, 1 и 2 $м \cdot с^{-1}$). Кроме того, лебедка должна быть оснащена тормозом, счетчиком длины кабеля и измерителем натяжения. Для защиты от атмосферных разрядов лебедка должна быть заземлена, независимо от того, электрическая она или нет.

Использование кабелей для передачи сигналов датчика на Землю нежелательно по нескольким причинам. Как правило, предпочтительно использовать специальные радиозонды. Такие радиозонды позволяют получить лучшее разрешение, чем используемые в нормальных условиях для свободных полетов. Датчики для измерения температуры и влажности должны иметь защиту от солнечной радиации и дождя, но в то же время обеспечивающую необходимую вентиляцию. Для измерения скорости и направления ветра необходимы дополнительные датчики.

Основные требования сводятся к следующему[2]:

Переменная	*Рабочий диапазон*	*Разрешение*
Давление	1 050 до 850 гПа	±0,5 гПа
Температура	+40 °C до –20 °C	±0,1 K
Влажность	100 % до 20 (или 10) %	±2 %
Скорость ветра	0,5 до 15 м·с$^{-1}$	±0,5 м·с$^{-1}$
Направление ветра	0° до 360°	±1°

Для телеметрии может использоваться одна из стандартных частот радиозондов; как правило, выбирается частота 400 МГц. Максимальная масса, включая массу батареи, должна быть заведомо меньше грузоподъемности аэростата, т. е., как правило, не более 5 кг. Радиозонд подвешивается под оболочкой на расстоянии от нее не менее трех ее диаметров в устойчивом положении так, чтобы обеспечивались надлежащие защита и вентиляция.

Основная трудность, с которой сталкиваются при измерениях турбулентных, а не средних значений величин, связана с влиянием вибрации кабеля и движением аэростата при измерениях. Для таких измерений должна применяться специальная методика.

В состав наземного оборудования должны входить приемник и регистратор. Данные обычно обрабатываются с помощью небольшого компьютера.

Зондирование может производиться во время подъема или спуска аэростата либо непрерывно, либо с остановками на выбранных уровнях. Для нескольких нижних уровней высоту можно определить по длине вытравленного троса, но на более высоких уровнях этот способ весьма приблизителен, поэтому необходим какой-то другой метод определения высоты. Ее можно определить путем вычисления с помощью уравнения гидростатики, используя наблюдаемое распределение давления, температуры и влажности. Таким образом, приращение в геопотенциальных метрах от уровня n до уровня n+1 выражается формулой:

$$29,27\, T_{\mathrm{v}} \ln\left(p_n / p_{n+1}\right) \qquad (5.12)$$

где T_v — среднее значение виртуальных температур на уровнях n и n+1; а p_n и p_{n+1} — два последовательных значения давления. Если нужен перевод геопотенциальных метров в геометрические, то это легко сделать, используя Смитсонианские метеорологические таблицы; однако, как правило, этого не требуется. Высота барометра, расположенного на станции, берется в этих расчетах за исходный уровень.

Если наблюдение метеорологических переменных ведется методом площадок, следует производить несколько серий измерений на каждом уровне. Время, требуемое для стабилизации датчиков, составляет от 2 до 3 минут. В этом случае полный цикл зондирования занимает от получаса до часа. Для всех радиозондов непосредственно перед использованием обязательно проводится проверка в контрольной будке для определения разностей в показаниях с барометром и аспирационным психрометром. Подобную проверку следует проводить также сразу после выполнения зондирования. Как и при регулярных подъемах радиозондов, данные на уровне расположения станции следует определять не по результатам радиозондирования, а традиционными приборами в стандартной метеорологической будке.

При обработке данных зондирования на каждом уровне определяются средние значения давления, температуры и влажности. Для скорости ветра средние значения

[2] Данные требования к измерениям профиля в пограничном слое отличаются от требований к приземным измерениям, содержащихся в приложении 1.A главы 1 тома I.

следует рассчитывать за период 100 с или 120 с. Если направление ветра не измеряется непосредственно, то его можно оценить приблизительно по ориентации продольной оси аэростата по отношению к истинному северу. Погрешность этого метода составляет ±30°.

Следует подчеркнуть, что наблюдатели должны извещать диспетчерские службы авиации о своих планах и получать разрешение на каждое зондирование или на серию зондирований с использованием привязных аэростатов.

ПРИЛОЖЕНИЕ. НАЗЕМНОЕ ДИСТАНЦИОННОЕ ЗОНДИРОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ ВЕТРА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ГЕТЕРОДИННЫХ ИМПУЛЬСНЫХ ДОПЛЕРОВСКИХ ЛИДАРОВ

(В настоящем приложении представлен текст общего стандарта ИСО/ВМО. Он также публикуется, с идентичным содержанием, как ISO 28902-2:2017 (E))

ВВЕДЕНИЕ

Лидары (обнаружение и определение дальности с помощью света), в рамках данного приложения имеются в виду атмосферные лидары, зарекомендовали себя в качестве ценных систем для дистанционного зондирования загрязнений в атмосфере, а также параметров различных метеорологических элементов, таких как облака, аэрозоли, газы и (где имеется доплеровское устройство) ветер. Измерения могут проводиться без прямого контакта и в любом направлении, поскольку для зондирования целей используется электромагнитное излучение. Лидарные системы, таким образом, дополняют традиционные технологии измерений *in situ*. Они пригодны для широкого ряда задач, которые не могут быть корректно и качественно решены при помощи методов *in situ* или точечных измерений.

Существует несколько методов, в рамках которых для измерения атмосферного ветра может быть использован лидар. Четыре наиболее часто используемые системы включают импульсный и непрерывный когерентные ветровые доплеровские лидары, ветровой доплеровский лидар прямого обнаружения и резонансный ветровой доплеровский лидар (обычно используется для измерений в мезосферном натриевом слое). Дополнительную информацию см. в библиографических ссылках [1] и [2].

В настоящем приложении[1] описано использование гетеродинных импульсных доплеровских лидарных систем. Некоторая общая информация о непрерывных доплеровских лидарах содержится в дополнении A. Международный стандарт по данной системе находится в стадии разработки.

1. ОБЛАСТЬ ПРИМЕНЕНИЯ

В данном приложении сформулированы требования и процедуры проверок эффективности для гетеродинных импульсных доплеровских лидаров, а также описаны преимущества и ограничения, связанные с их использованием. Термин «доплеровский лидар», используемый в этом приложении, применяется исключительно к гетеродинным импульсным лидарным системам, которые используются для измерения параметров ветра при помощи аэрозольного рассеяния лазерного излучения в атмосфере. Представленные характеристики лидарных систем и ограничения, связанные с их использованием, относятся к работе в стандартных атмосферных условиях.

В настоящем приложении приведено описание определения скорости ветра по линии визирования (радиальной скорости ветра).

Примечание: описание получения вектора ветра с помощью проведения отдельных измерений по линии визирования не представлено в настоящем приложении, поскольку является специфическим для конкретной конфигурации ветрового лидара. Пример определения вектора ветра содержится в дополнении B.

В данном приложении не рассматривается получение вектора ветра.

---

[1] Хотя в *Руководстве по метеорологическим приборам и методам наблюдений* (ВМО-№ 8) это называется приложением, в документации ИСО на него ссылаются как на «стандарт».

Настоящее приложение может быть использовано для следующих областей применений:

a) метеорологический инструктаж, например для авиации, безопасности аэропортов, морских применений и нефтяных платформ;

b) производство ветровой энергии, например оценка участка и определение силовых характеристик;

c) регулярные измерения профилей ветра на метеорологических станциях;

d) мониторинг распространения загрязнений в атмосфере;

e) менеджмент промышленных рисков (с помощью прямого мониторинга данных или путем усвоения в микромасштабных моделях потока);

f) обменные процессы (выбросы парниковых газов).

Настоящее приложение обращено к производителям гетеродинных импульсных доплеровских ветровых лидаров, а также к органам, которые занимаются проверкой и сертификацией их соответствия. Кроме того, в приложении содержатся рекомендации для пользователей по надлежащему использованию этих приборов.

2. НОРМАТИВНЫЕ ССЫЛКИ

Нормативные ссылки в настоящем приложении не содержатся.

3. ТЕРМИНЫ И ОПРЕДЕЛЕНИЯ

Для целей настоящего приложения применяются следующие термины и определения.

Весовая функция дальности. Весовая функция радиальной скорости ветра по линии визирования.

Временное разрешение. Переменная, связанная с оборудованием, описывающая кратчайший интервал времени, с которого может быть получена независимая сигнальная информация.

Источник: ISO 28902-1:2012, термин 3.11

Время интегрирования. Время, потраченное на получение значения скорости по линии визирования.

Диапазон разрешения по дальности. Постоянный пространственный интервал между центрами двух последующих *стробов дальности*.

Примечание: диапазон разрешения по дальности также является размером строба дальности на дисплее. Он определяется длиной строба дальности и перекрытием между последовательными стробами.

Диапазон скоростей. Диапазон, определяемый минимальной измеряемой скоростью ветра, максимальной измеряемой скоростью ветра и способностью измерять однозначно знак скорости (недвусмысленно).

Примечание: в зависимости от применения лидара диапазон скоростей может определяться на основе радиальной скорости ветра (сканирующие лидары) или горизонтальных скоростей ветра (профили ветра).

Доступность данных. Отношение объема реальных рассматриваемых данных измерений с заданным качеством к объему ожидаемых данных измерений в рамках рассматриваемого *периода измерений*.

Коэффициент ослабления, α Мера мутности атмосферы, выраженная с помощью натурального логарифма отношения интенсивности падающего света к переданной интенсивности света на единицу оптической длины.

Источник: ISO 28902-1:2012, термин 3.10

Максимальная дальность обнаружения, R_{MaxA}**.** Максимальное расстояние, до которого сигнал лидара записывается и обрабатывается.

Примечание: зависит от количества точек захвата и частоты измерений.

Максимальная дальность действия, R_{MaxO}**.** Максимальное расстояние, до которого может быть получено достоверное значение скорости ветра на основе сигнала лидара.

Примечания:
1. Максимальная дальность действия меньше или равна максимальной дальности обнаружения.
2. Максимальная дальность действия определяется вдоль оси в соответствии с типом применения. Она измеряется вертикально для получения вертикального профиля ветра и горизонтально — для сканирующих лидаров, способных производить измерения во всей полусфере.
3. Максимальная дальность действия может быть увеличена путем увеличения периода измерений и/или путем понижения разрешения дальности.
4. Максимальная дальность действия зависит от параметров лидара, а также от атмосферных условий.

Минимальная дальность обнаружения, R_{MinA}**.** Минимальное расстояние, с которого сигнал лидара записывается и обрабатывается.

Примечание: если минимальная дальность обнаружения не определена, предполагается, что она равна нулю. Она может отличаться от нуля, когда имеет место «слепой» прием в процессе импульсного излучения.

Минимальная дальность действия, R_{MinO}**.** Минимальное расстояние, до которого может быть получено достоверное значение скорости ветра на основе сигнала лидара.

Примечания:
1. Минимальная дальность действия также называется «слепой» дальностью.
2. В импульсных лидарах минимальная дальность действия ограничена рассеянным световым излучением в лидаре в ходе излучения импульса, глубиной фокуса или временем переключения индикатора приемопередатчика. Она может зависеть от длительности импульса (T_p) и ширины строба дальности.

Период измерений. Период времени между первым и последним измерениями.

Погрешность скорости. Максимальное инструментальное смещение при измерении скорости.

Примечание: смещение скорости должно быть минимизировано путем надлежащей калибровки, например по фиксированной цели.

Разрешение по дальности. Переменная, связанная с оборудованием, описывающая кратчайший интервал дальности, с которого может быть получена независимая сигнальная информация.

Источник: ISO 28902-1:2012, термин 3.13

Разрешение по скорости. Стандартное отклонение скорости, измеренной прибором.

Примечание: разрешение по скорости зависит от длительности импульса, отношения мощности сигнала несущей частоты к шуму и от времени интегрирования.

Разрешение физической дальности. Ширина (ПШПМ) *весовой функции дальности*.

Сдвиг ветра. Изменение скорости ветра по плоскости, перпендикулярной вектору направления ветра.

Строб дальности. Ширина (ПШПМ) весовой функции при селектировании точек во временных рядах с целью спектральной обработки и вычисления скорости ветра.

Примечания:

1. Строб дальности центрирован по расстоянию измерения.
2. Строб дальности определен в ряде элементов сигнала или строба дальности эквивалентного расстояния.

Эффективное разрешение по дальности. Переменная, зависящая от типа применения, описывает интегральный интервал дальности, для которого целевая переменная получается с заданной неопределенностью.

Источник: ISO 28902-1:2012, термин 3.14

Эффективное временное разрешение. Переменная, зависящая от типа применения, описывает интегральный временной интервал, для которого целевая переменная получается с заданной неопределенностью.

Источник: ISO 28902-1:2012, термин 3.12, модифицирован

4. ОСНОВЫ ГЕТЕРОДИННЫХ ИМПУЛЬСНЫХ ДОПЛЕРОВСКИХ ЛИДАРОВ

4.1 Обзор

Импульсный доплеровский лидар испускает лазерный импульс в узком лазерном луче (см. рисунок 5.A.1). В процессе его распространения в атмосфере лазерное излучение рассеивается во всех направлениях аэрозолями и молекулами. Часть рассеянного излучения распространяется обратно к лидару; оно попадает в телескоп, детектируется и анализируется. Поскольку аэрозоли и молекулы движутся с атмосферой, доплеровский сдвиг обусловливает частоту рассеянного лазерного излучения.

На длинах волн (и, таким образом, частотах), относящихся к гетеродинному (когерентному) доплеровскому лидару, аэрозольный сигнал представляет собой основную цель для измерения сигнала обратного рассеяния.

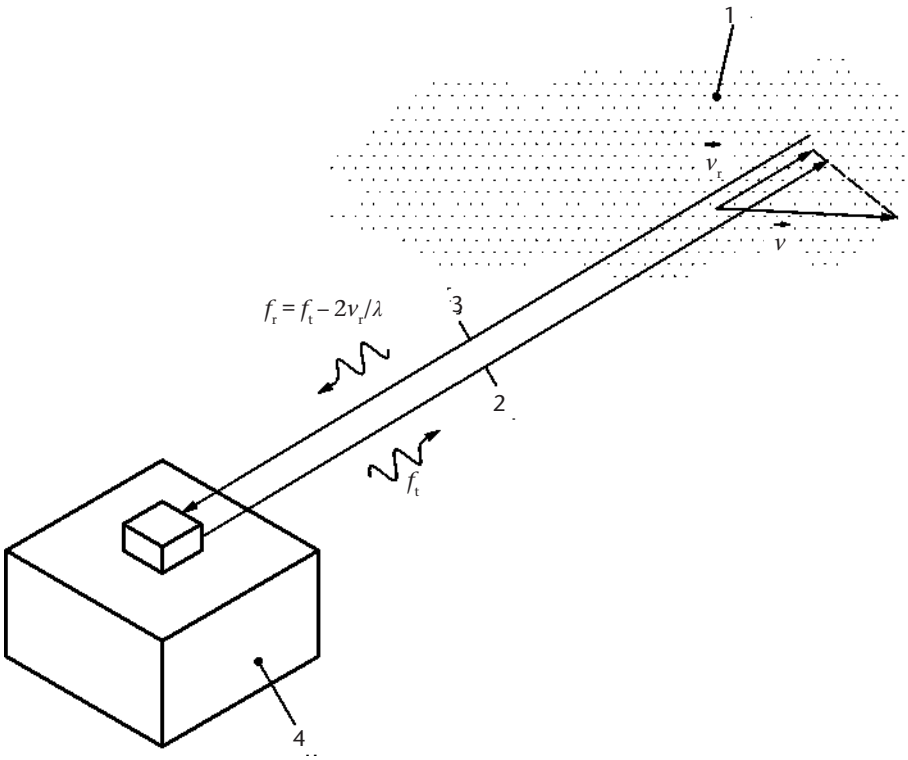
Цель анализа заключается в измерении разницы Δf между частотой испускаемого лазерного импульса f_t и частотой обратного рассеяния света f_r. Согласно уравнению Доплера эта разница пропорциональна составляющей скорости ветра по линии визирования, как свидетельствует формула 5.A.1:

$$\Delta f = f_r - f_t = -2v_r / \lambda \qquad (5.A.1)$$

где:

λ длина волны лазера;

v_r составляющая скорости ветра по линии визирования (составляющая вектора ветра, $\vec{v}$, направленная вдоль оси лазерного луча, считается положительной, когда ветер дует по направлению от лидара).



Обозначения
1 Рассеивающие частицы, перемещающиеся вместе с ветром
2 Оптический путь испускаемого лазерного импульса (лазерный луч)
3 Оптическая ось приемника
4 Лидар

Рисунок 5.А.1. Принцип измерения с помощью гетеродинного доплеровского лидара

Предметом измерения является дальность x, равная расстоянию, которое проходит обратное рассеянное излучение за время t после испускания лазерного импульса от лидара до аэрозолей и обратно до лидара со скоростью света c. Формула 5.А.2 показывает линейную связь между дальностью и временем.

$$x = \mathrm{c} \cdot \frac{t}{2} \tag{5.A.2}$$

4.2 Гетеродинное детектирование

В гетеродинном лидаре детектирование света, получаемого приемным телескопом (на частоте $f_r = f_t + \Delta f$), схематически изображено на рисунке 5.А.2. Полученный свет микшируется с лучом высокоустойчивого лазера непрерывного излучения, который называется гетеродин. Сумма двух электромагнитных волн — обратно отраженной и гетеродина — трансформируется в электрический сигнал с помощью квадратичного детектора (который производит электрический ток, пропорциональный мощности электромагнитной волны, освещающей светочувствительную поверхность). Для устранения низкочастотных составляющих сигнала затем применяется аналоговый высокочастотный фильтр.

Результатом является ток $i(t)$, пульсирующий на радиочастоте $f_t + \Delta f - f_{lo}$:

$$\underbrace{i(t) = 2 \cdot \frac{\eta \cdot e}{h \cdot f_t} \cdot K \cdot \xi(t) \cdot \sqrt{\gamma(t) \cdot P_r(t) \cdot P_{lo}} \cdot \cos\left[2\pi\left(\Delta f + f_t - f_{lo}\right) \cdot t + \varphi(t)\right] + n(t)}_{i_{het}(t)} \tag{5.A.3}$$

где:

t время;

h постоянная Планка;

η квантовая эффективность детектора;

e электрический заряд электрона;

K инструментальная постоянная с учетом потерь при прохождении через приемник;

$\xi(t)$ случайная модуляция амплитуды сигнала за счет образования спекл-структуры (см. 4.5.4);

$\gamma(t)$ эффективность гетеродина;

$P_r(t)$ мощность обратно рассеянного света;

P_{lo} мощность гетеродина;

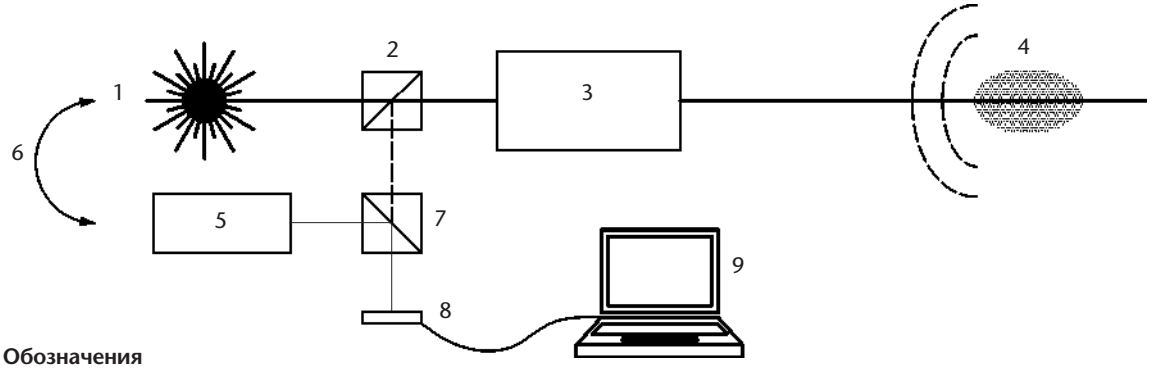
f_{lo} частота гетеродина;

$\varphi(t)$ случайная фаза;

$n(t)$ белый шум детектирования;

$i_{het}(t)$ сигнал гетеродина.

Эффективность гетеродина $\gamma(t)$ — это мера для измерения качества оптического микширования полей волны обратного рассеяния и гетеродинной волны на поверхности детектора. Она не может быть больше 1. Хорошая эффективность гетеродина требует точного определения величин и настроек гетеродина по отношению к обратно рассеянной волне. Оптимальные условия микширования рассмотрены в ссылке [3]. Эффективность гетеродина не является исключительно инструментальной функцией; она также зависит



Обозначения

1 Импульсный лидар
2 Оптический элемент, разделяющий переданный и принимаемый свет
3 Телескоп (используемый для передачи и приема)
4 Рассеивающие элементы
5 Гетеродинный лазер (непрерывный лазер)
6 FПодстройка частоты (это устройство задает разницу $f_t - f_{lo}$)
7 Оптический элемент, который соединяет луч гетеродина с оптической осью луча получаемого света и микширует их
8 Квадратичный детектор
9 Аналого-цифровой преобразователь и устройство обработки цифрового сигнала

Рисунок 5.A.2. Принцип гетеродинного детектирования

от турбулентности рефракционного индекса (Cn^2) вдоль лазерного луча (см. ссылку [4]). В условиях сильной атмосферной турбулентности воздействие на изменение рефракционного индекса снижает эффективность гетеродина. Это может произойти, когда лидар функционирует вблизи поверхности Земли в жаркий солнечный день.

В формуле 5.А.4 $P_r(t)$ — мгновенная мощность обратно рассеянного света. Она представлена основным уравнением оптической локации (см. ссылку [3]):

$$P_r(t) = A \cdot \int_0^{+\infty} x^{-2} \cdot G(x) \cdot g\left(t - \frac{2x}{c}\right) \cdot \beta(x) \cdot \tau^2(x)\,dx \qquad (5.A.4)$$

при этом

$$\tau(x) = \exp\left[-\int_0^x \alpha(\zeta)\,d\zeta\right]$$

где:

x расстояние до лидара;

A собирающая поверхность приемного телескопа;

$G(x)$ зависящая от дальности функция чувствительности ($0 \le G(x) \le 1$), учитывающая, например, ослабление эффективности приемника на близком расстоянии, с тем чтобы избежать подавления сигнала детектора;

$g(t)$ огибающая мощности лазерного импульса ($\int g(t)\,dt = E_0$, где E_0 — энергия лазерного импульса);

$\beta(x)$ коэффициент обратного рассеяния исследуемой атмосферной цели;

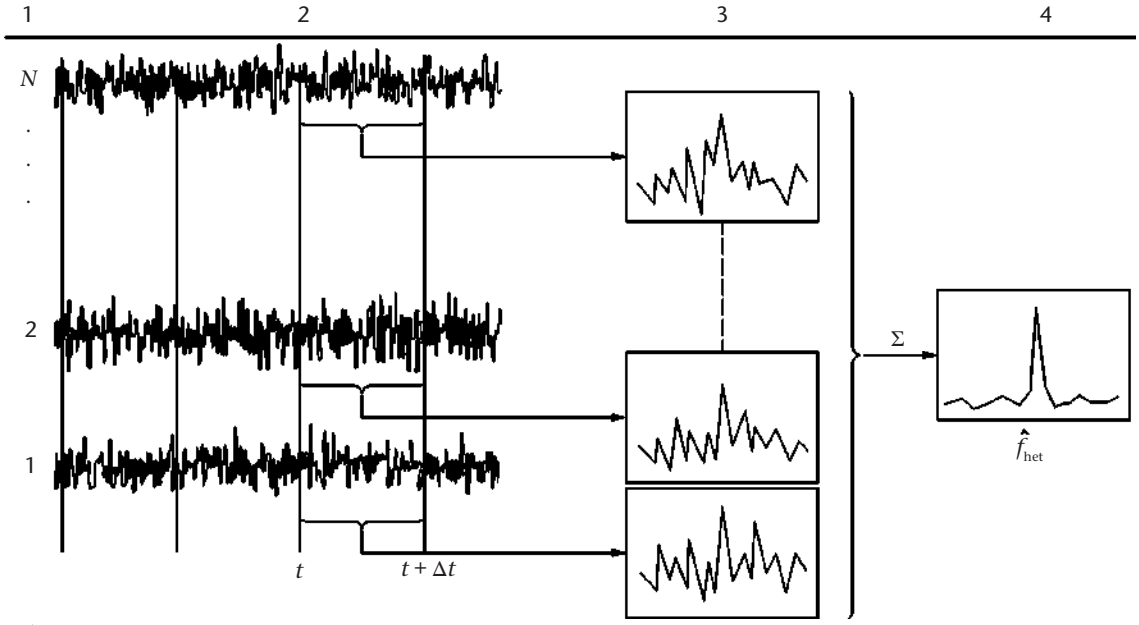
$\tau(x)$ прозрачность атмосферы как функция коэффициента ослабления, α.

4.3 Спектральный анализ

Получение результатов измерений радиальной скорости с использованием гетеродинных сигналов требует проведения частотного анализа. Он выполняется в цифровом представлении после аналого-цифрового преобразования гетеродинных сигналов. Обзор процесса представлен на рисунке 5.А.3. Частотный анализ применяется к временному интервалу (t, $t + \Delta t$) и повторяется для заданного числа лидарных импульсов N. Интервал определяет строб дальности (x, $x + \Delta x$), где $x = c \cdot t / 2$ и $\Delta x = c \cdot \Delta t / 2$. N связано с периодом интегрирования измерения $t_{int} = 1/f_{PRF}$ (f_{PRF} — частота повторения импульса). Анализ сигнала заключается в усреднении функций плотности мощности сигналов с селектированием по дальности. Затем для оценки центральной частоты пика сигнала используется алгоритм оценивания частоты. На рисунке 5.А.3 — это оценка $\hat{f}_{het}$ для частоты $f_{het} = \Delta f + f_t - f_{lo}$ гетеродинного сигнала.

Благодаря аналого-цифровому преобразованию интервал частоты, полученный с помощью частотного анализа, ограничен до (0, $+F_s/2$) или ($-F_s/2$, $+F_s/2$) для комплекснозначных сигналов, что ограничивает минимальные и максимальные значения $\hat{f}_{het}$ и, таким образом, интервал измеряемых радиальных скоростей. Согласно ссылке [5] по формуле 5.А.5 можно оценить среднее значение строба дальности реальной радиальной скорости ветра:

$$\hat{v}_r = -\frac{\lambda}{2}\left(\hat{f}_{het} - f_t + f_{lo}\right) \qquad (5.A.5)$$



Обозначения

t Время, прошедшее с момента испускания лазерного импульса
Δt Продолжительность временного интервала спектрального анализа (задает размер строба дальности)
N Число сигналов
1 Импульсы
2 Временные ряды
3 Спектры
4 Доплеровская частота

Рисунок 5.A.3. Диаграмма, показывающая проведение частотного анализа

Например, в случае, когда сигнал является вещественной величиной (а не комплексной демодуляцией), смещение частоты $f_t - f_{lo}$ составляет около $F_s / 4$, т. е. $|\hat{v}_r| \le \lambda F_s / 8$. С другой стороны, системная спецификация, предполагающая возможности для измерения радиальной составляющей ветра до v_{max}, требует $F_s \ge 8 v_{max} / \lambda$.

Ядром усреднения является функция свертки между профилем импульса и профилем строба дальности. Ее длина является функцией отпечатка импульса в атмосфере, Δr (см. формулу 5.A.6), строба дальности Δx и весового коэффициента κ, где κ — отношение полной ширины на уровне половины максимума (ПШПМ) строба к Δx.

$$\Delta r = \frac{c \cdot T_p}{2} \tag{5.A.6}$$

где:

T_p продолжительность ПШПМ мгновенной интенсивности лазерного импульса, $g(t)$.

Разрешение по дальности ΔR определено как ПШПМ ядра усреднения. Для гауссового импульса и невзвешенного строба дальности ΔR рассчитывается по формуле 5.A.7[6]:

$$\Delta R = \frac{c}{2} \cdot \frac{\Delta t}{\operatorname{erf}\left(\frac{\sqrt{\pi} \cdot \Delta t}{2T_p}\right)} = \frac{\Delta x}{\operatorname{erf}\left(\frac{\sqrt{\pi} \cdot \Delta x}{2\Delta r}\right)} \tag{5.A.7}$$

Для гауссового импульса и гауссового взвешенного строба дальности ΔR соответствует формуле 5.A.8:

$$\Delta R = \frac{c}{2} \cdot \sqrt{T_p^2 + (\kappa \cdot \Delta t)^2} = \sqrt{\Delta r^2 + (\kappa \cdot \Delta x)^2} \tag{5.A.8}$$

Как показано на рисунке 5.А.3, рассмотрены и селектированы по дальности несколько сигналов. Рассчитан средний спектр и применен алгоритм оценивания частоты.

Последовательные стробы дальности могут частично пересекаться (тогда последовательные результаты измерения радиальной скорости частично коррелируются), быть близкими или разделенными (тогда имеет место «дыра» в профиле радиальной скорости по линии визирования).

В ссылке [6] представлено несколько возможных алгоритмов оценивания частоты с первичным анализом их эффективности. Эффективность данных алгоритмов оценивания более подробно рассмотрена в ссылке [7]. Какой бы ни был алгоритм оценивания, функция плотности вероятности алгоритмов оценивания является суммой равномерного распределения «плохих» оценок (грубые ошибки), распределенных по всей ширине [$-f_{max}$, f_{max}], и относительно узкого распределения хороших оценок, часто смоделированной при помощи гауссового распределения, как показано в формуле 5.А.9:

$$p\left(\hat{f}_{\text{het}}\right) = \begin{cases} \dfrac{b}{2f_{\text{max}}} + \dfrac{1-b}{\sqrt{2\pi}\sigma_{\text{f}}} \exp\left(-\dfrac{\left(\hat{f}_{\text{het}} - \bar{f}_{\text{het}}\right)^2}{2\sigma_{\text{f}}^2} \right), \text{for } \hat{f}_r \in \left[-f_{\text{max}}, f_{\text{max}}\right] \\ 0 \quad \text{otherwise} \end{cases} \tag{5.A.9}$$

В принципе средняя частота $\bar{f}_{\text{het}}$ может отличаться от «истинной» частоты гетеродинного сигнала f_{het}. Это может произойти, например, когда частота изменяется в процессе лазерного импульса (ЧИРП, см. ссылку [8]). Однако эти условия встречаются редко, и хороший гетеродинный доплеровский лидар на практике производит несмещенные измерения доплеровских сдвигов.

Параметр σ_f характеризует точность частоты алгоритма оценивания. Точность соответствующей радиальной скорости: $\sigma_V = \lambda \cdot \sigma_f / 2$. В гетеродинной системе, как правило, она составляет порядка от нескольких сантиметров до нескольких десятков сантиметров в секунду. Она уменьшается пропорционально уровню шума (мощность $n(t)$ в формуле 5.А.3) и увеличивается пропорционально числу суммированных сигналов N. На практике увеличение точности ограничено, поскольку суммирование большого количества сигналов приводит к увеличению времени интегрирования, в течение которого естественная изменчивость (турбулентность) ветра увеличивается.

В работе [9] приведено описание грубых ошибок (также называемые выбросами[1]) и предложена модель для параметра b в качестве функции нескольких инструментальных характеристик и уровня определения шума. Выброс возникает, когда устройство обработки сигналов детектирует пик шума вместо пика сигнала. Параметр b является убывающей функцией отношения мощности сигнала на несущей частоте к шуму. В гетеродинных лидарных системах должны проводиться проверки качества, для того чтобы грубые ошибки были отфильтрованы и проигнорированы как пропущенные данные. Наличие грубых ошибок определяет максимальную дальность лидара.

4.4 Целевые переменные

Цель измерений, произведенных с помощью гетеродинных доплеровских ветровых лидаров, заключается в определении характера ветровых полей. В каждом интервале дальности оценка измеряемой переменной приводит к значению радиальной скорости; см. формулу 5.А.5.

Существуют дополнительные целевые значения, такие как изменчивость радиальной скорости, которые не рассматриваются в настоящем приложении.

Целевые переменные могут быть использованы в качестве исходных данных в различных методах производства метеорологической продукции, такой как вектор ветра в точке или по линии (профиль) в произвольной плоскости или в пространстве в целом. Это также включает измерение сдвигов ветра и вихрей спутных струй за воздушным судном

(см. рисунок в дополнении C), а также определение областей восходящих или нисходящих потоков ветра. Помимо этого, измерения с помощью доплеровских ветровых лидаров нацелены на определение кинематических свойств и параметров негомогенных ветровых полей, таких как дивергенция и ротация. См. примеры применений в дополнении C.

4.5 Источники шума и неопределенностей

4.5.1 *Гетеродинный флуктуационный шум*

Флуктуационный шум обозначается как $n(t)$ в формуле 5.A.3. Его изменчивость пропорциональна мощности гетеродина, как показано в формуле 5.A.10:

$$\left\langle n^2{}_{SN} \right\rangle = 2eSP_{\mathrm{lo}}B \tag{5.A.10}$$

где:

S чувствительность детектора, $S = \frac{\eta e}{hf_{\mathrm{t}}}$, где η — квантовая эффективность детектора;

B ширина детектируемой полосы частот.

Он является причиной грубых ошибок и ограничивает максимальную дальность сигнала. Если не преобладают другие источники шума, сила гетеродинного сигнала по отношению к уровню шума измеряется отношением мощности сигнала на несущей к шуму (CNR), как показано в формуле 5.A.11[6]:

$$\mathrm{CNR} = \frac{\eta \cdot K \cdot \gamma(t)}{h \cdot f_t \cdot B} P_{\mathrm{r}}(t) \tag{5.A.11}$$

Примечание: некоторые авторы иногда называют «отношение сигнал-шум», что обозначено здесь как «отношение мощности сигнала на несущей к шуму».

4.5.2 *Шум детектора*

Дополнительные технические источники шума могут влиять на отношение сигнал-шум. Как и для флуктуационного шума, их спектральная плотность является постоянной вдоль ширины детектируемой полосы частот (белый шум).

a) темновой шум, создаваемый флуктуациями темнового тока детектора i_D, представлен в формуле 5.A.12:

$$\left\langle n^2{}_{DN} \right\rangle = 2e\, i_D B \tag{5.A.12}$$

b) тепловой шум (шум Джонсона/Найквиста) — это электронный шум, производимый в результате теплового возмущения электронов внутри нагрузочного резистора R_{L} при температуре T, как показано в формуле 5.A.13:

$$\left\langle n^2{}_{TN} \right\rangle = \frac{4k_{\mathrm{B}}T}{R_{\mathrm{L}}} B \tag{5.A.13}$$

где k_{B} — постоянная Больцмана.

4.5.3 *Относительный шум интенсивности*

Относительный шум интенсивности (дБ/Гц) — это шум мощности гетеродина, нормализованный по среднему уровню мощности. Относительный шум интенсивности (RIN), как правило, достигает пика на частоте релаксационных колебаний лазера,

затем снижается на более высоких частотах до тех пор, пока не достигнет уровня флуктуационного шума («розового» шума). Ток RIN увеличивается пропорционально квадрату мощности гетеродина.

$$n^2_{\mathrm{RIN}} = \left(SP_{\mathrm{lo}}\right)^2 10^{0.1\mathrm{RIN}} B \qquad (5.\mathrm{A}.14)$$

В хорошей лидарной системе значения i_D, RIN, $1/R_{\mathrm{L}}$ достаточно низкие, поэтому флуктуационный шум гетеродина является преобладающим источником шума. Только в этом случае формула 5.A.14 применима.

4.5.4 *Спекл-структура*

Гетеродинный сигнал для когерентного доплеровского ветрового лидара является суммой многих волн, обратно отраженных от отдельных аэрозольных частиц. Поскольку частицы в случайном порядке распределены вдоль луча в объемах, значительно превышающих длину волны лазера, обратно отраженные волны имеют случайную фазу, когда они достигают чувствительной поверхности детектора, в связи с чем они суммируются случайным образом. В результате гетеродинный сигнал имеет случайную фазу и амплитуду. Это явление называется спекл-структура (см. ссылку [10]). Она ограничивает точность оценок частоты.

4.5.5 *Частота лазера*

Точное измерение радиальной скорости требует точного значения величины $f_{\mathrm{r}} - f_{\mathrm{lo}}$. Любая неопределенность данного значения ведет к отклонениям значения $\hat{f}_{\mathrm{r}}$. Если частота лазера f_{t} не стабильна, она должна быть либо измерена, либо закреплена на f_{lo}.

4.6 Установление дальности

Установление дальности доплеровских измерений обусловлено временем, прошедшим с момента испускания лазерного импульса. Это время должно быть измерено с хорошей точностью (ошибка ε_{t} должна быть меньше или равна $2\delta \cdot x$ / с, где $\delta \cdot x$ — требуемая точность установления дальности). Это требует, в частности, определения времени испускания лазерного импульса по крайней мере с данной точностью.

4.7 Известные ограничения

Принцип работы доплеровских лидаров основан на обратном аэрозольном рассеянии. Аэрозоли большей частью образуются у поверхности земли и поднимаются вверх на большие высоты в результате конвекции или турбулентности. Вследствие этого они в больших количествах содержатся в планетарном пограничном слое (как правило, 1 000 м толщиной в течение дня в умеренных зонах и 3 000 м в тропических регионах), но в гораздо меньших концентрациях выше. В этой связи для доплеровских лидаров измерение параметров ветра выше планетарного пограничного слоя является почти невозможной задачей, за исключением случаев присутствия на больших высотах аэрозольных слоев, таких как пустынная пыль или шлейфы вулканических выбросов.

Лазерные лучи сильно ослабляются в тумане или облаках. Вследствие этого максимальная дальность доплеровских лидаров значительно ограничена в условиях тумана (в лучшем случае несколько сотен метров), и они не могут измерять параметры ветра внутри облаков или над ними. Они могут проникать в невидимые вооруженным глазом облака, такие как перистые. Поэтому информация о ветре на больших высотах (от 8 до 12 км) может быть получена с помощью обратного рассеяния от кристаллических частиц.

Доплеровские лидары обнаруживают капли облачной воды или ледяные кристаллы, когда они присутствуют в атмосфере. Поскольку они являются эффективными отражателями,

они могут играть ведущую роль в отраженных сигналах от атмосферы, например в случае сильных осадков. В этом случае доплеровский лидар произведет измерение радиальной скорости гидрометеоров, а не радиальной скорости ветра.

Нисходящие потоки дождя в атмосфере приносят аэрозоли на Землю. Дальность доплеровского лидара после дождя, как правило, значительно снижена до тех пор, пока аэрозоли снова не поднимутся вверх.

Присутствие дождевой воды на окне доплеровского лидара значительно уменьшает пропускание окна. Если лидар не оснащен приборами для протирки или сдува воды, окно следует протирать вручную.

Как описано в 4.2, эффективность гетеродинного детектирования снижается в случае наличия турбулентности рефрактивного индекса вдоль луча. Турбулентность рефрактивного индекса в большинстве случаев имеет место около поверхности Земли в солнечные дни. Таким образом, максимальная дальность доплеровского лидара, направленного горизонтально близко к поверхности, в таких условиях может значительно снизиться.

5. СПЕЦИФИКАЦИИ И ИСПЫТАНИЯ СИСТЕМЫ

5.1 Спецификации системы

5.1.1 *Характеристики передатчика*

5.1.1.1 Длина волны лазера

Длина волны лазера главным образом зависит от технологии, используемой при создании лазерного источника. Большинство существующих методов основаны на использовании излучения ближней инфракрасной области спектра с длинами волн от 1,5 до 2,1 мкм, хотя могут использоваться и другие длины волн до 10,6 мкм. При выборе длины волны учитываются ожидаемые параметры мощности, а также прозрачность атмосферы и требования безопасности при работе с лазерами (см. ссылки [11] и [12]). Фактически выбор диапазона длин волн от 1,5 до 2,1 мкм является компромиссом между технологическими соображениями и соображениями безопасности (> 1,4 мкм безопасно для глаз).

5.1.1.2 Длительность импульса

Длительность лазерного импульса $T_{\text{р}}$ — это ПШПМ огибающей лазерного импульса $g(t)$. $T_{\text{р}}$ определяет глубину мгновенного зондирования атмосферы $R_{\text{р}}$ с помощью лидара, как показано в формуле 5.A.15:

$$R_{\text{р}} = \frac{\text{с} \cdot T_{\text{р}}}{2} \qquad \text{(5.A.15)}$$

Например, длительность импульса 200 нс соответствует глубине зондирования порядка 30 м.

5.1.1.3 Взаимосвязь точности измерения скорости и разрешающей способности по дальности с длительностью импульса

Существует критическая зависимость между длительностью импульса и двумя характеристиками, связанными с производительностью. Большая длительность

импульса, в несколько сотен наносекунд, приводит к потенциально узкой ПШПМ спектра лазерного импульса (если можно избежать «чирпирования» (линейная частотная модуляция)), (см. преобразование Фурье по всему импульсу в ограниченном временном интервале). Это приводит к достаточно точному измерению ветра даже при очень низком соотношении сигнал-шум, но только в том случае, если можно избежать выбросов (см. 4.3). Высокая производительность оказывает негативное влияние на разрешающую способность по дальности. Импульс длительностью 1 мкс ограничивает эффективное разрешение по дальности примерно до 150 м (см. формулу 5.A.6).

5.1.1.4 Частота следования импульсов

Частота следования импульсов f_{PRF} — это частота испускания лазерных импульсов. f_{PRF} определяет число импульсов, посланных и усредненных по линии визирования в течение времени измерения. Она также определяет максимальный однозначный диапазон, где информация двух последовательных лазерных импульсов не будет перекрываться. Максимальный однозначный диапазон R_{MaxO} связан с f_{PRF} по формуле 5.A.16:

$$R_{MaxO} = \frac{c}{2 f_{PRF_{max}}} \quad (5.A.16)$$

Например, для максимальной дальности действия 15 км максимальная f_{PRF} составляет 10 кГц.

В то же время для радаров определенные типы модуляции (по несущей частоте, частоте повторений и т. д.) могут компенсировать эту неоднозначность по дальности за границами R_{MaxO}.

5.1.2 *Характеристики передатчика/приемника*

Передатчик/приемник характеризуется, как минимум, параметрами, приведенными в таблице 5.A.1.

Таблица 5.A.1. Характеристики передатчика/приемника

Характеристики передатчика/приемника	*Примечания*
Диаметр апертуры	Физический размер апертуры прибора, который ограничивает передаваемые и принимаемые лучи
Диаметр лазерного луча и коэффициент усечения	Для гауссова пучка диаметр лазерного луча определяется как диаметр, измеренный при $1/e^2$ мощности в апертуре лидара. Диаметр лазерного луча определяет уровень освещенности, а следовательно, и безопасность для глаз. Коэффициент усечения — это отношение между диаметром, измеренным при $1/e^2$, и физическим размером апертуры прибора
Точка фокусировки	Обычно в импульсных лидарах используются коллимированные пучки. Для некоторых применений пучок может быть частично сфокусирован в заданной точке, чтобы максимизировать интенсивность пучка на измеряемых расстояниях. Интенсивность сигнала и, следовательно, точность значения скорости будут максимальными в этой конкретной точке

В принципе, импульсные системы являются моностатическими. Для систем, использующих режим непрерывной волны, также доступны и бистатические установки.

5.1.3 ***Параметры дискретизации сигнала***

Дискретизация сигнала импульсного лидара в некотором диапазоне определяется параметрами, представленными в таблице 5.A.2.

Таблица 5.A.2. Параметры дискретизации сигнала

Параметры дискретизации сигнала	*Примечания*
Селекция по дальности	Положения строба дальности могут быть определены вдоль линии визирования
Ширина строба дальности	Задается выборочными точками или частотой стробирования на цифровом преобразователе. Должна выбираться близко к ширине импульса
Количество стробов дальности	Для обработки в реальном времени спектральная оценка всех стробов дальности должна быть рассчитана за время, меньшее времени интегрирования
Диапазон измерения радиальной скорости ветра	С помощью доплеровских лидарных систем скорость ветра может быть измерена с точностью до 0,1 м/с. Диапазон измерения ограничивается вблизи его верхнего предела только вследствие технической конструкции прибора, главным образом шириной полосы пропускания детектора. Для измерения доступен диапазон радиальных скоростей ветра более 70 м/с
Разрешение радиальной скорости	Разрешение скорости ветра является минимальной обнаруживаемой разницей скорости ветра в интервале времени и дистанции. Разрешение 0,1 м/с или более высокое может быть достигнуто путем усреднения

5.1.4 ***Характеристики системы ориентации***

Характеристики системы ориентации приведены в таблице 5.A.3.

Таблица 5.A.3. Характеристики системы ориентации

Характеристики системы ориентации	*Примечания*
Азимутальный диапазон	При использовании устройства ориентации лидар может наводить свой лазерный луч с различными азимутальными углами от 0 до 2π. Для поворотного оборудования без ограничений допускается постоянное поворотное управление вдоль вертикальной оси. Для устройств с ограниченным вращением следует использовать другие методы
Диапазон возвышения	Устройство ориентации может быть оснащено возможностью вращения вокруг горизонтальной оси. Потенциально возможно вращение на 360°. Для того, чтобы увидеть полу-полусферу атмосферы над лидаром, углы возвышения обычно устанавливаются в диапазоне от 0 до 180°. В любом случае, указание на надир может быть использовано для начального положения устройства

Характеристики системы ориентации	*Примечания*
Угловая скорость	Угловая скорость — это скорость вращения устройства ориентации. Измерение может быть выполнено в процессе этого вращения. В этом случае информация о скорости ветра будет представлять собой среднее значение различных линий визирования в зондируемой области между начальным углом и углом остановки. В других сценариях измерения можно использовать так называемый метод «шага и взгляда» с фиксированным положением прибора в моменты измерения
Угловое ускорение	Определяет, как быстро изменяется угловая скорость. Используется для сложных траекторий с быстрыми изменениями в направлении. При высоком угловом ускорении могут наблюдаться угловые промахи (проскакивания)
Точность ориентации	Относительная точность ориентации — это стандартное отклонение угловой разницы между фактическим положением в пределах прямой видимости (азимут и высота) и положением цели (система отсчета прибора). Абсолютная точность ориентации требует предварительной калибровки с помощью угловых датчиков (тангаж, крен, направление) (система географической привязки)
Угловое разрешение	Минимальный шаг угла, на который может смещаться линия визирования. Он может быть ограничен за счет понижающего коэффициента двигателя, положения, датчика или механического трения

5.2 Связь между характеристиками системы и производительностью

5.2.1 *Показатель качества*

Показатель качества (ПК) помогает сравнивать диапазон дальности действия лидаров, которые имеют различные параметры. Пример, приведенный на рисунке 5.А.4, позволяет классифицировать чувствительность импульсного лидара независимо от параметров атмосферы. Показатель качества выводится из основного уравнения оптической локации (см. формулу 5.А.4) и пропорционален спектру скорости CNR, который определяется по отношению к усредненной спектральной плотности как интенсивность пика Доплера деленая на стандартное отклонение спектрального шума, которое считается постоянным (белый шум). N — это число усредненных импульсов.

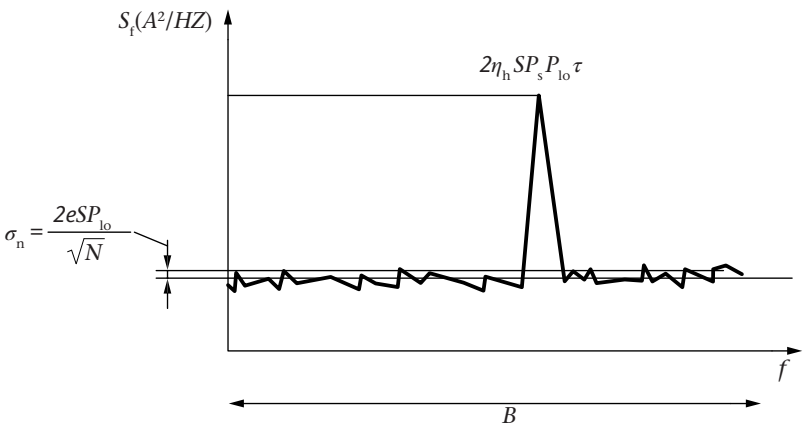


Рисунок 5.А.4. Пример показателя качества

ПК определяется для набора параметров лидара, как показано в формуле 5.A.17:

$$\text{FOM} = \eta_{\text{all}} \cdot E \cdot T_{\text{p}} \cdot D^2 \cdot \sqrt{t_i \cdot f_{\text{PRF}}} \qquad (5.A.17)$$

где:

η_{all} общая эффективность, принимая во внимание качество луча и изображения, общий коэффициент пропускания и усечения;

E энергия лазера на выходе из устройства (полученная энергия пропорциональна пиковой мощности и диаграмме направленности излучения;

T_{p} длительность импульса (этот термин применяется к узкой полосе пропускания, обратно пропорциональной T_{p});

D диаметр собирающего телескопа (для типичных применений с большим радиусом действия оптимальный размер составляет от 100 до 150 мм при длине волны, соответствующей ближней инфракрасной области спектра);

t_i время интегрирования для одной линии визирования;

f_{PRF} частота следования импульсов.

ПК пропорционален квадратному корню из числа N накопленных спектров: $N = t_i \cdot f_{\text{PRF}}$.

При сравнении двух лидаров на двух различных длинах волн следует учитывать спектральную зависимость от параметров атмосферы. ПК должен быть рассчитан с временем интегрирования, меньшим или равным 1 с, с целью избежания колебаний ветра или турбулентности больше, чем доплеровская спектральная ширина.

Лидар может увеличить свой ПК с более длительным временем аккумуляции в рамках этого временного предела в 1 с.

Учитывая возможности современных оптических компонентов с низкой аберрацией, η_{all} может быть оценена по результату передачи испускающего тракта и приемного тракта.

Следует отметить, что ПК для импульсного доплеровского лидара не может увеличиваться неограниченно за счет увеличения площади сбора D^2, поскольку фазовое искажение поперек пучка из-за турбулентности рефракционного индекса ухудшает эффективность гетеродина[3]. Практический предел для лидаров дальнего действия находится вблизи используемого диаметра D = 125 мм.

Поскольку спектр скорости CNR обратно пропорционален квадрату расстояния, то, если поглощением в атмосфере можно пренебречь, максимальная рабочая дальность действия приблизительно пропорциональна квадратному корню ПК. Когда ПК выражается в мДж·нс·м^2, максимальная рабочая дальность действия, выраженная в км, почти равна квадратному корню ПК.

В таблице 5.A.4 показаны вычисления ПК для типичных лидарных цифровых показателей и соответствующего им типичного диапазона измерений.

5.2.2 *Компромиссы в отношении ширины полосы временных частот*

Рекомендуемой практикой является согласование длительности импульса с требуемым стробом дальности (см. 4.6), чтобы пространственное разрешение в равной степени зависело от этих двух параметров. При таком условии пространственное разрешение пропорционально длительности импульса. Чем короче импульс, тем лучше разрешение. Разрешающая способность по скорости пропорциональна спектральной ширине

Таблица 5.A.4. Показатель качества для типичных лидарных цифровых показателей и соответствующего им типичного диапазона измерений

η	E (мДж)	T_p (нс)	D (м)	f_{PRF} (Гц)	t_i (с)	ПК (мДж·нс·м²)	Типичный диапазон измерений (км)
0,5	0,2	800	0,12	10 000	1	115	10
0,5	0,1	400	0,06	20 000	1	10	3
0,5	2	300	0,12	750	1	118	10

и увеличивается при узком спектре. Поскольку ширина спектра обратно пропорциональна длительности импульса, разрешение по расстоянию и разрешение по скорости также обратно пропорциональны.

5.3 Точность и доступность результатов измерений

5.3.1 *Точность измерения радиальной скорости*

Точность измерения радиальной скорости определяется (в соответствии с ISO 5725-1) имея в виду:

a) правильность (или систематическую погрешность) как статистическое среднее различие между большим количеством измерений и истинным значением;

b) прецизионность (или неопределенность) как статистическое стандартное отклонение серии независимых измерений. Это не имеет отношения к истинному значению.

Лидарные данные хорошего качества получаются, когда прецизионность измерений радиальной скорости выше целевого значения (например, 1 м/с) с предопределенной вероятностью возникновения (например, 95 %).

Значение погрешности (1σ) 0,5 м/с можно считать адекватным для типичных метеорологических применений и для измерений ветра с целью определения статистики категорий дисперсии в случае моделирования загрязнения воздуха[13]. Для применений, связанных с энергией ветра, требования могут быть выше (0,2 м/с).

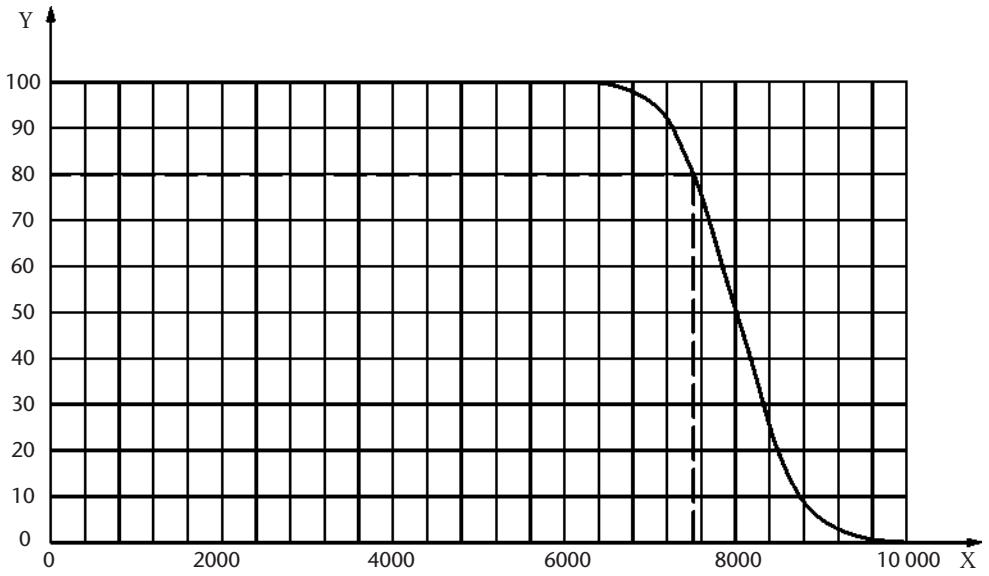
5.3.2 *Доступность данных*

Доступность данных определяется как отношение данных с прецизионностью P к общему количеству данных в течение периода измерения.

Доступность данных измерений, то есть определимость профиля ветра, является функцией, главным образом, концентрации аэрозоля и облаков. В зависимости от требуемой точности данных могут применяться другие критерии фильтрации. Например, данные, которые показывают существенно неоднородный поток вокруг диска сканирования, должны отбрасываться.

5.3.3 *Максимальная рабочая дальность действия*

Исходя из предположения о том, что лидарная линия визирования остается в планетарном пограничном слое (то есть отсутствие существенного изменения сигнала вдоль линии визирования), на рисунке 5.A.5 показана типичная доступность данных импульсного лидара в зависимости от расстояния.



Обозначения
X Дальность действия в метрах
Y Доступность в процентах

Рисунок 5.A.5. Пример максимальной рабочей дальности действия

В этом случае для 80 % доступности данных (P_{80}) дальность действия составляет 7 500 м.

Производительность, показанная на этой диаграмме, получена для стандартной атмосферы:

a) отсутствие облаков вдоль линии визирования;

b) отсутствие осадков;

c) видимость более 10 км (чистый воздух).

Эта производительность будет значительно изменяться в зависимости от местных климатических и эксплуатационных условий. Данные с больших расстояний следует обрабатывать с осторожностью в зависимости от применения.

Диапазон измерений должен соответствовать заданным критериям доступности. Недавнее исследование этой зависимости описано в ссылке [14].

Например, R_{50} соответствует максимальной дальности действия с доступностью более 50 %.

Если доступность не указана, максимальная рабочая дальность действия предполагается равной R_{80}, то есть максимальному расстоянию, при котором доступность превышает 80 %.

Для заданной доступности изменение прецизионности скорости приводит к изменению максимальной рабочей дальности действия.

5.4 Процедуры испытаний

5.4.1 *Общие замечания*

Чтобы верно оценить точность целевых переменных, производитель должен выполнить ряд валидационных испытаний применительно к дальности действия и скорости.

Некоторые испытания могут быть выполнены в лабораторных условиях. Определенные виды валидационных испытаний могут быть осуществлены только путем сравнения с другими эталонными приборами, такими как чашечные или звуковые анемометры.

5.4.2 *Валидация измерений радиальной скорости*

5.4.2.1 Общие замечания

В данном разделе описывается, как можно проверить и оценить качество измерений радиальной скорости.

5.4.2.2 Отражение от твердой мишени

Это испытание состоит в получении измерений ветра с помощью луча, направленного на стационарную (неподвижную) твердую мишень (любое строение в пределах дальности действия лидара), и проверке того, что данные измерения радиальной скорости, полученные с помощью лидара, составляют 0 м/с.

В результате этого испытания проверяется, что разность частот $f_t - f_{lo}$ между испускаемыми лазерными импульсами и гетеродином известна или определена с достаточной точностью (см. 4.5.3).

Длина строба дальности должна быть близка к длине лазерного импульса, а расстояния между стробами дальности должны быть выбраны таким образом, чтобы твердая мишень находилась точно в центре одного из стробов, в противном случае погрешность скорости может возникать в случае частотного дрейфа внутри импульса.

Измерение скорости с твердой мишенью должно проводиться как минимум в течение 10 мин. Испытание считается успешным, если среднее значение временного ряда радиальных скоростей, полученных с помощью твердой мишени, находится вблизи 0 м/с.

5.4.2.3 Самооценка прецизионности измерения радиальной скорости

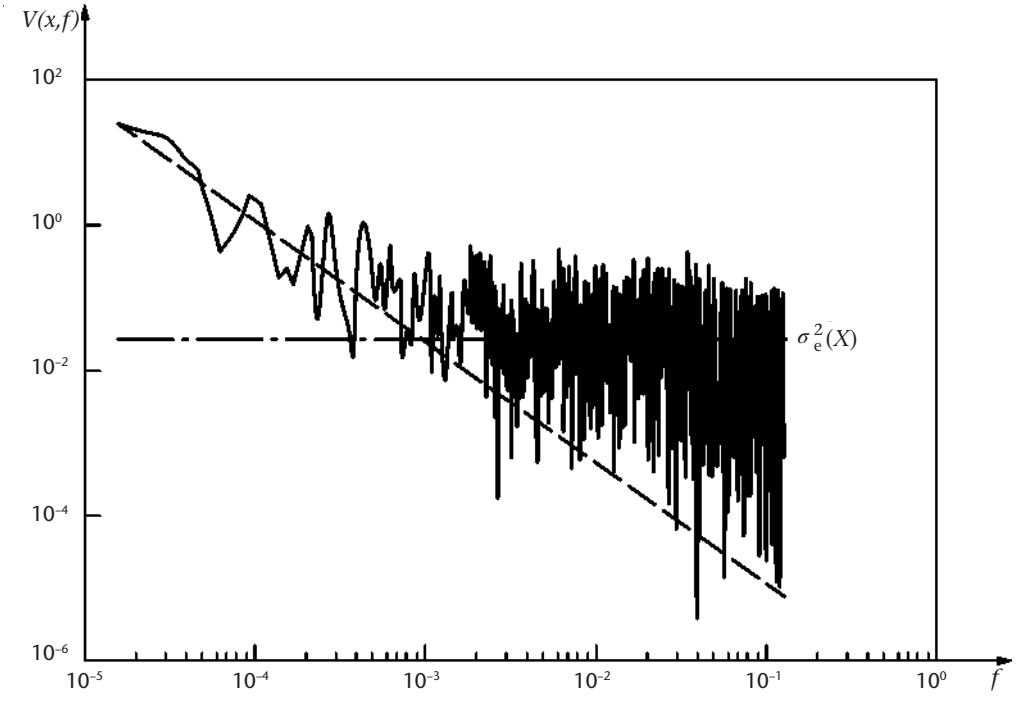
В данном испытании луч импульсного лидара направлен вертикально вверх, а данные измерения радиальной скорости собираются в течение по меньшей мере 20 мин с частотой не менее одного профиля радиальных скоростей в секунду. Обозначим через $v_r(x,k)$, $k = 1,\ldots,K$ временной ряд радиальных скоростей, измеренных на расстоянии x. Испытание состоит в формировании спектра мощности временного ряда, как показано в формуле 5.A.18:

$$V(x,f) = \frac{1}{K}\left|\sum_{k=1}^{K} v_r(x,k)\exp(-2j\pi fk\delta t)\right|^2 \qquad (5.A.18)$$

где δt — постоянный временной лаг между последовательными измерениями $v_r(x,k)$.

В среднем, спектр мощности $V(x, f)$ должен выглядеть так, как показано на рисунке 5.A.6. На низких частотах в спектре мощности преобладают естественные колебания ветра, и он будет подчиняться закону $f^{-5/3}$. На высоких частотах в спектре мощности преобладает ровный уровень ошибок измерения (белый шум). Уровень этой ровной части непосредственно дает дисперсию значений этих измерений $\sigma_e^2(x)$.

Примечание: испытание должно проводиться ночью, когда естественная изменчивость ветра слаба, то есть когда ветер считается близким к штилю. Погрешности измерений в отдельных случаях могут быть намного больше, чем естественные колебания ветра. В этом случае часть спектра мощности, подчиняющаяся закону $f^{-5/3}$, будет скрыта.



Обозначения

f Частота

$V(x,f)$ Спектр мощности

Рисунок 5.A.6. Спектр мощности измерений радиальной скорости

Данный метод, полное описание которого дано в ссылке [15], позволяет оценить прецизионность измерения лидара без каких-либо вспомогательных данных.

На рисунке 5.A.6 сплошная кривая — это $V(f)$. На низких частотах $V(f)$ должна быть пропорциональна $f^{5/3}$ (спектральное поведение естественной изменчивости ветра; штриховая линия). На высоких частотах спектр становится плоским (штрихпунктирная линия) на уровне, непосредственно равном дисперсии ошибок измерения $\sigma_e^2(x)$.

5.4.3 *Оценка точности путем взаимного сравнения с другими приборами*

5.4.3.1 Звуковой анемометр

Последнее испытание состоит в том, чтобы направлять лидарный луч очень близко к звуковому анемометру на мачте или платформе без вибрации и сравнивать радиальные скорости, полученные с помощью лидара, с проекцией трехмерных векторов ветра, полученных звуковым анемометром в направлении луча.

Данные лидара и звукового анемометра должны быть усреднены по одной минуте.

Направление лидарного луча должно определяться с высокой точностью (порядка 1° или точнее) и как можно ближе к горизонтальной плоскости. Лидарный луч должен находиться на высоте звукового анемометра (разность высот порядка 1 м или менее).

Среднеквадратическая разница между данными лидара и звукового анемометра должна быть меньше 0,1 м/с.

Мачта, скорее всего, вызовет возмущения вдоль ветрового потока после ее обтекания. Ветры с направлений, где звуковой анемометр находится в возмущенной зоне, не должны учитываться.

5.4.3.2 **Функциональные испытания с использованием мачты**

Мачта должна быть оснащена по крайней мере трехчашечными анемометрами, установленными горизонтально.

5.4.3.3 **Сравнение с доплеровскими метеорологическими радиолокаторами**

Одним из вариантов взаимосравнения доплеровского лидара и доплеровского метеорологического радиолокатора может быть совместное использование этих двух систем. Подробная информация об этом типе взаимного сравнения стала появляться по мере недавнего начала развертывания в аэропортах систем, объединяющих оба датчика для всепогодного дистанционного зондирования поля ветра, особенно для обнаружения сдвига ветра. Недавно были проведены соответствующие исследования[16]; [17]; [18]. Для обеспечения уверенности в репрезентативности взаимосравнений, оба датчика должны быть размещены рядом и зондировать один и тот же объем атмосферы.

Помимо данного требования к размещению очень важно, чтобы были выбраны такие погодные условия, при которых измерения целевых трассеров с обоих датчиков реально представляли бы воздушный поток. Доплеровский лидар лучше всего работает в сухих погодных условиях, в то время как радар в таких условиях чистого воздуха измеряет только рассеянные сигналы, отраженные от насекомых. Такие рассеянные сигналы, отраженные от насекомых, не дают точного представления о фактическом движении воздуха. Разница в показаниях с доплеровским лидаром обычно достигает нескольких метров в секунду. Таким образом, чтобы иметь возможность не учитывать сигналы, отраженные от насекомых, необходимо обеспечить классификацию эхосигналов в контексте радиолокационных целей. Это означает, что радар должен быть способен измерять при двух ортогональных линейных поляризациях. С другой стороны, во время осадков условия являются оптимальными для радара, тогда как у лидара дальность действия может быть значительно ограничена. В погодных же условиях с небольшим дождем или моросью из слоистых облаков ожидается, что как радарный, так и лидарный датчик обеспечит высококачественные данные. Таким образом, именно такие ситуации лучше всего подходят для данной процедуры валидации. Для того чтобы избавиться от любых отражений от неметеорологических образований, необходимо провести соответствующую фильтрацию радиолокационных данных на основе классификации целей с использованием значений двойной поляризации.

Если эти требования выполнены, перекрестное сравнение доплеровского метеорологического радиолокатора и доплеровского лидара может быть выполнено на основе профилей горизонтального ветра, полученных, например, с использованием методов обработки объемной скорости или индикатора «скорость-азимут». В этом случае необходимо учитывать геометрию сканирования. В идеальном случае геометрия сканирования для радара и лидара должна быть одинаковой применительно к углам возвышения. Другим вариантом, который еще предстоит оценить, может быть сравнение фактических радиальных скоростей ветра в каком-либо стробе дальности на основе стробов дальности лидарной и радарной систем.

5.4.3.4 **Сравнение с радиолокационными ветровыми профилометрами**

Сравнение с радиолокационными ветровыми профилометрами может быть выполнено, если две системы расположены рядом друг с другом. Погодные условия, при которых оба датчика работают оптимально, — это условия, которые не исключают друг друга (достаточные аэрозольные трассеры для лидара и достаточные турбулентные вихри в качестве мишеней для брэгговского рассеяния при профилировании ветра). Необходимо

обеспечить, чтобы оба датчика находились в оптимальных атмосферных условиях. Кроме того, необходимо обратить внимание на режим сканирования, используемый для получения вертикального профиля ветра, чтобы объем, зондируемый лидаром, соответствовал объему, исследуемому профилометром.

5.4.4 *Валидация максимальной рабочей дальности действия*

В условиях ясного неба атмосфера может быть описана посредством видимости V, концентрации аэрозоля и типа аэрозоля. Последние два могут быть надлежащим образом описаны с помощью двух оптических лидарных коэффициентов ослабления и обратного рассеяния. В отличие от типа аэрозоля и его распределения по размерам, видимость (см., например, ISO 28902-1) и влажность измеряются стандартными наземными метеорологическими локальными датчиками. Для простоты типы атмосферы могут быть классифицированы на несколько категорий, связанных с их лидарным отношением. Значения лидарного отношения в ближней инфракрасной области обычно ограничены в диапазоне от 30 до 50 стерадианов. $R_{\text{МахО}}$ не слишком сильно зависит от изменчивости аэрозолей на месте, за исключением условий с локальными источниками загрязнения.

Видимость является важным параметром для диапазона лидара. Основное уравнение оптической локации (см. формулу 5.A.4) указывает, что полученная мощность пропорциональна коэффициенту обратного рассеяния и экспоненциально убывает при затухании и соответственно возрастает с видимостью. Поскольку α (x) и β (x) пропорциональны, существует максимум функции $P_{\text{т}}(t)$ (см. основное уравнение оптической локации в формуле 5.A.4 и на рисунке 5.A.7) и следовательно для $R_{\text{МахО}}$.

Чтобы не учитывать неблагоприятные условия видимости для когерентных доплеровских ветровых лидаров (туман и исключительно высокая видимость), для измерений дальности выбираются только дымка и хорошая видимость. Современные лидары могут работать в условиях осадков, но подвержены ошибкам в определении вертикальной составляющей ветра; горизонтальная составляющая, как было установлено, определяется с высокой точностью (см. ссылку [18]).

Таблица 5.A.5. Номера кривых

Номер кривой	*1*	*2*	*3*	*4*	*5*
Типичный ПК для времени интеграции в 1 с (мДж·нс·м^2)	20	30	60	100	150

Поскольку обратное рассеяние быстро изменяется при высоких значениях относительной влажности, данные, соответствующие относительной влажности > 70 %, должны быть исключены из набора данных измерений. Таким образом, условия осадков (дождь, снег) не учитываются.

Кроме того, турбулентность индекса Cn^2 (зависит от температуры и высоты) может менять $R_{\text{МахО}}$ путем изменения волнового фронта пучка. Условия сильной турбулентности должны быть удалены из наборов данных (солнечные дни около полудня), и необходимо следовать экспериментальному протоколу.

Таким образом, валидация должна проводиться при следующих условиях:

a) лидар эксплуатируется в рабочем режиме (вертикальный — для профилировщиков, малая высота — для сканирующих лидаров);

b) полный диапазон измерений остается в пограничном слое;

c) видимость: более 10 и менее 50 км (на видимой длине волны, зависимость от длины волны приведена в ISO 28902-1);

d) отсутствие осадков;

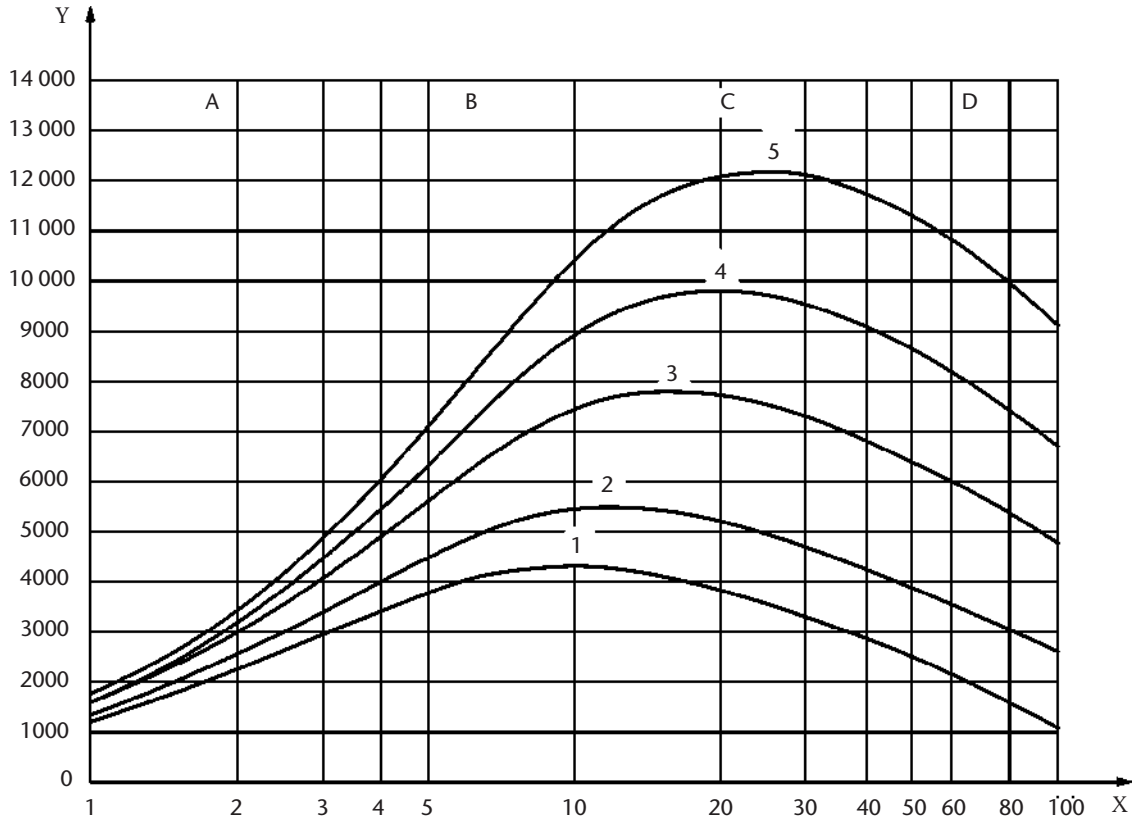
e) отсутствие облаков на линии визирования;

f) $Cn^2 < 10^{-14}$ м$^{-2/3}$ (1 м над уровнем земли).

Данные, не соответствующие этим условиям, при оценке максимальной рабочей дальности действия должны быть исключены.

a) Ситуационные условия регистрируются одновременно (температура, Cn^2, видимость, относительная влажность);

b) наборы данных создаются в соответствии с вышеуказанными атмосферными условиями. Для получения качественного статистического набора данных требуется как минимум 100 ч отфильтрованных данных. Это представляет собой около четырех дней кумулятивных измерений со временем аккумуляции в 1 с. В зависимости от атмосферных условий период оценки может длиться от четырех дней до одного месяца.



Обозначения

X Видимость в км
Y Максимальный диапазон в метрах
1–5 Различные значения показателя качества (см. таблицу 5.A.5)
A Туман
B Мгла
C Ясно
D Очень ясно

Рисунок 5.A.7. Зависимость максимальной дальности действия гетеродинного доплеровского сигнала от условий видимости

6. ИНСТРУКЦИИ ПО ПЛАНИРОВАНИЮ ИЗМЕРЕНИЙ И УСТАНОВКЕ ПРИБОРОВ

6.1 Требования к месту установки

Выбор места проведения измерений прежде всего определяется задачей измерения. Тщательный выбор места измерения необходим, в частности, для стационарных систем или для квазистационарного использования мобильных систем во время проведения долгосрочных измерительных мероприятий. При выборе места измерения необходимо учитывать следующие факторы:

a) свободный обзор: беспрепятственная видимость может быть ограничена застроенными участками, деревьями и зданиями вблизи места установки лидара. Если горизонтальный обзор ограничен зданиями, этого можно избежать, выбрав больший угол возвышения. В случае сканирования индикатора «скорость-азимут» измеренные сигналы, идущие не из свободной атмосферы, а от препятствий, должны быть исключены из оценки;

b) электромагнитное излучение: доплеровские лидарные системы должны быть надлежащим образом защищены от воздействий электромагнитных излучений (например, от радиолокационных устройств, сетей мобильной радиосвязи или сотовых телефонных сетей).

Рекомендуется проводить предварительный осмотр предполагаемого участка проведения измерений с участием экспертов (таких, как метеорологи).

Для получения оптимальной рабочей дальности действия лидар должен быть установлен на грунте с короткой травой, без расположенных поблизости сооружений, которые могут вызвать атмосферную турбулентность, влияющую на работу лидара и его производительность. Лидар должен быть установлен как минимум на высоте 3 м над землей, особенно если он расположен не на травяном грунте, а, например, на бетоне, асфальте или ровной металлической платформе, для избежания эффекта от турбулентности вблизи оптического выхода, который приведет к разрушению когерентности атмосферы и, таким образом, резко уменьшит эффективность работы лидара.

6.2 Ограничивающие условия применительно к общему функционированию

Факторы помех касательно доплеровских лидарных измерений включают в себя:

a) оптически плотные облака;

b) осадки любого типа (дождь, град, снег);

c) блокирующие эффекты (например, от зданий).

6.3 Техническое обслуживание и эксплуатационные испытания

6.3.1 *Общие замечания*

Чтобы обеспечить функционирование системы в соответствии с установленными требованиями и исключить отклонения и технические ошибки, такие как неправильные настройки[19], техническое обслуживание и эксплуатационные испытания должны

проводиться через регулярные промежутки времени. В дополнение к приведенной здесь информации типичные области применения и соответствующие требования описаны в дополнении D.

6.3.2 *Техническое обслуживание*

Техническое обслуживание, такое как регулярная очистка оптических компонентов, калибровка и т. п., должно осуществляться в качестве одного из базовых требований в рамках обеспечения качества. Процедуры технического обслуживания могут проводиться персоналом на месте с использованием автоматического программного обеспечения обнаружения уменьшения мощности сигнала, например за счет пылевых отложений, и внесением соответствующих корректировок в данные или сочетания этих мер. Обычная периодичность технического обслуживания составляет три месяца и зависит от условий окружающей среды.

6.3.3 *Эксплуатационные испытания*

Эксплуатационные испытания следует проводить каждые 6—36 месяцев. Такие испытания зависят от конкретной конструкции системы. Изготовитель прибора должен указать процедуры испытаний и предоставить необходимые для этого инструменты.

a) Выходную мощность и частоту лазерного источника следует измерять с периодичностью, указанной изготовителем;

b) сигнальный выход системы сбора данных, реагирующей на определенный световой импульс или определенную цель, должен измеряться с периодичностью, указанной изготовителем;

c) для систем сканирования или рулевого управления следует выполнить проверку выравнивания с помощью калиброванного прибора (например, буссоли или прибора, определяющего наклон).

6.3.4 *Неопределенность*

В таблице 5.A.6 указаны составляющие неопределенности в измеряемых переменных и скорости ветра по линии визирования. Факторы неопределенности измеряемых переменных влияют на качество данных, обеспечиваемых системой. Наиболее существенные неопределенности являются следствием:

a) процесса первичной калибровки системы изготовителем;

b) преобладающих условий окружающей среды.

Таблица 5.A.6. Факторы, приводящие к неопределенности

Измеряемые переменные	*Факторы, приводящие к неопределенности*
Отношение сигнал-шум	a) шум, включая шум детектора b) спекл-эффект (когда во время измерения усредняются только несколько импульсов) c) флуктуации мощности лазерного излучения или длительности импульса d) турбулентность рефракционного индекса (температура) e) угол запаздывания при высоких скоростях вращения

Измеряемые переменные	*Факторы, приводящие к неопределенности*
Частотный сдвиг, Δf	a) смещение и флуктуации частоты испускаемых импульсов по сравнению с частотой гетеродина b) длительность импульса c) отношение сигнал-шум d) количество усредненных импульсов e) качество алгоритма оценки
Целевая переменная	*Фактор неопределенности*
Скорость ветра по линии визирования (радиальная скорость ветра)	a) турбулентность ветра b) градиент ветра вдоль линии визирования c) твердые мишени, близкие к стробу дальности d) неоднозначность по дальности e) точность ориентации

ДОБАВЛЕНИЕ A. ДОПЛЕРОВСКИЙ ВЕТРОВОЙ ЛИДАР НЕПРЕРЫВНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

(Для информации)

Как указано в настоящем приложении, существует несколько методов, в рамках которых лидар может быть использован для измерения атмосферного ветра. Четыре наиболее распространенных из них включают использование когерентного доплеровского ветрового лидара импульсного или непрерывного действия, доплеровского ветрового лидара прямого обнаружения и резонансного доплеровского ветрового лидара (наиболее широко применяется для измерений в мезосферном натриевом слое).

В данном приложении описывается использование гетеродинных (когерентных) импульсных лидарных систем. Следует отметить, что в настоящее время также разрабатывается стандарт ISO 28902-3, в котором описывается применение когерентного доплеровского ветрового лидара непрерывного излучения для измерения атмосферного ветра. В стандарте ISO 28902-3 будут сформулированы требования и процедуры эксплуатационных испытаний для технологий доплеровских лидаров непрерывного излучения, а также будут представлены их преимущества и недостатки. Термин «доплеровский лидар непрерывного излучения» или «доплеровский ветровой лидар непрерывного излучения» используется в настоящем приложении применительно к лидарным системам, работающим в режиме незатухающей волны для измерения характеристик ветра на основе рассеяния лазерного излучения атмосферными аэрозолями в пограничном слое на малых высотах. Здесь представлено описание типичной геометрии измерений, способов обработки сигнала, технических требований и ограничений применительно к стандартным атмосферным условиям. Лидары непрерывного излучения применяются, в частности, с целью:

a) измерения энергии ветра;

b) оценки ветровых ресурсов;

c) верификации кривой мощности;

d) расчета коэффициента потерь при работе ветровой электростанции;

e) мониторинга опасных ветровых явлений для целей авиационной метеорологии;

f) оценки сдвига ветра;

g) определения требований в отношении обнаружения вихревых следов самолетов.

Стандарт ISO 28902-3 будет предназначен для производителей доплеровских ветровых лидаров непрерывного излучения, а также для органов, занимающихся вопросами испытаний и сертификации соответствия. В нем также будут содержаться рекомендации для пользователей по правильному, надлежащему применению этих приборов. Будет прилагаться и полный библиографический перечень независимых публикаций.

_____

ДОБАВЛЕНИЕ B. ВОССТАНОВЛЕНИЕ ВЕКТОРА ВЕТРА

(Для информации)

B.1 Общая информация

Ветер — это трехмерная векторная величина, где поле ветра представляет собой, как правило, функцию пространства и времени. Следовательно, для измерения мгновенного ветра в определенной точке всегда требуется определение трех компонент вектора. Посредством одного доплеровского лидара можно измерить лишь компоненту вектора ветра (или ее проекцию) вдоль оптической оси лазерного луча. Таким образом, для проведения точного местного измерения в какой-либо установленный срок потребуются три отдельные лидарные системы. При определенных допущениях можно осуществить оценку полного вектора ветра на основе данных единственного «моностатического» доплеровского лидара. Данный процесс называется восстановлением вектора ветра, поскольку точность оценки вектора ветра зависит от правильности допущений в отношении поля ветра.

B.2 Система координат

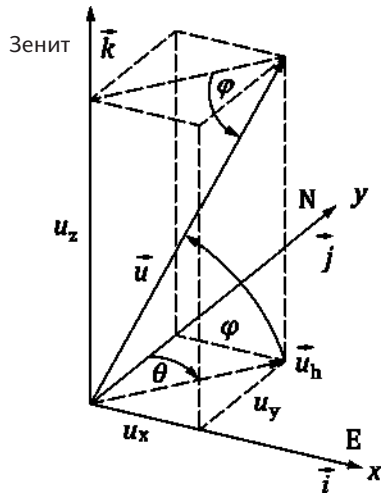
На рисунке ниже представлен вектор ветра $\vec{u}(\vec{r}, t)$ в декартовой системе координат с единичными векторами $\vec{i}$, $\vec{j}$, $\vec{k}$. Компоненты u_x, u_y, u_z являются скалярными функциями положения и времени, $\vec{r} = \vec{r}(x, y, z, t)$ — вектор положения или радиус-вектор воздушной частицы.

$$\vec{u} = \frac{d\vec{r}}{dt} = \begin{pmatrix} u_x \\ u_y \\ u_z \end{pmatrix} \tag{B.1}$$

или

$$\vec{u} = \left(u_x \cdot \vec{i} + u_y \cdot \vec{j} + u_z \cdot \vec{k}\right) \tag{B.2}$$

В системе координат на рисунке положительное направление оси x $(\vec{i})$ указывает на восток (E), положительное направление оси y $(\vec{j})$ — на север (N), а положительное направление оси z $(\vec{k})$ обращено к зениту.



Система координат и векторы ветра

С учетом значений углов θ и ϕ компоненты в декартовой системе координат определяются следующим образом:

$$\begin{aligned} u_{\mathrm{x}} &= U \cdot \cos\phi \cdot \sin\theta \\ u_{\mathrm{y}} &= U \cdot \cos\phi \cdot \cos\theta \\ u_{\mathrm{z}} &= U \cdot \sin\phi \end{aligned} \tag{B.3}$$

а трехмерный вектор ветра рассчитывается как:

$$\vec{u} = \begin{pmatrix} U \cdot \cos\phi \cdot \sin\theta \\ U \cdot \cos\phi \cdot \cos\theta \\ U \cdot \sin\phi \end{pmatrix} \tag{B.4}$$

Пример: горизонтальный западный ветер: $\theta = 90°$, $\varphi = 0°$

$$\Rightarrow u_{\mathrm{x}} = U,\ u_{\mathrm{y}} = u_{\mathrm{z}} = 0 \Rightarrow \vec{u} = (U, 0, 0)$$

B.3 Горизонтальный вектор ветра

Горизонтальный вектор ветра $\vec{u}_{\mathrm{h}}$ и горизонтальная проекция трехмерного вектора ветра $\vec{u}$ на рисунке определяются следующим образом:

$$\vec{u}_{\mathrm{h}} = \begin{pmatrix} u_{\mathrm{x}} \\ u_{\mathrm{y}} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} u_{\mathrm{h}} \cdot \sin\theta \\ u_{\mathrm{h}} \cdot \cos\theta \end{pmatrix} \tag{B.5}$$

или в системе обозначения компонент:

$$u_{\mathrm{h}} = \left|\vec{u}_{\mathrm{h}}\right| = U \cdot \cos\phi = \sqrt{u_{\mathrm{x}}^2 + u_{\mathrm{y}}^2} \tag{B.6}$$

Величина u_{h} обозначает горизонтальную скорость ветра, обычно именуемую скоростью ветра. Традиционно в метеорологии направление ветра определяется как направление, обратное вектору ветра $\vec{u}_{\mathrm{h}}$. Оно ориентировано по часовой стрелке с севера на восток, юг и запад (см. рисунок выше).

В случае, когда сканирование осуществляется лидаром на диск при фиксированном угле возвышения в условиях однородного потока ветра, отдельные точки, образующие кривую скорости по линии визирования, следуют косинусоиде как функции азимутального угла. Пики функции соответствуют азимутальному углу, расположенному параллельно или встречно-параллельно направлению ветра. Функция проходит через ноль, когда азимутальный угол перпендикулярен пеленгу ветра, поскольку компонента скорости по линии визирования отсутствует. Данные также наглядно представляются на графике в полярных координатах, который сразу дает информацию о скорости, направлении и вертикальной составляющей ветра. Стандартная процедура выравнивания методом наименьших квадратов позволяет получить наилучшие оценки величин трех неизвестных параметров (либо u, v и w, либо горизонтальной и вертикальной составляющих скорости ветра и пеленга ветра).

B.4 Радиальная скорость

В измерениях, получаемых с помощью лидара, компонента v_{r} вектора местного ветра $\vec{u}(\vec{r}, t)$ в направлении лазерного луча, т. е. радиальная скорость в любой произвольной точке $\vec{r}$, является прямой измеряемой величиной, определяемой с помощью доплеровского сдвига частоты (см. рисунок 5.A.5). Если вектор ветра $\vec{u}(\vec{r})$ задается в сферической системе координат $(\vec{e}_{\mathrm{r}}, \vec{e}_{\theta}, \vec{e}_{\phi})$ вместо декартовой системы координат $(\vec{i}, \vec{j}, \vec{k})$, то радиальная скорость v_{r} легко поддается определению (сравните с формулой B.2)[20]:

$$\vec{u}(\vec{r}) = \vec{u}(r, \theta, \phi) = \left(u_{\mathrm{r}} \cdot \vec{e}_{\mathrm{r}} + u_{\theta} \cdot \vec{e}_{\theta} + u_{\phi} \cdot \vec{e}_{\phi}\right) \tag{B.7}$$

где:

$\vec{e}_r$ единичный вектор в направлении луча;

$\vec{e}_\theta, \vec{e}_\phi$ единичные векторы в направлении азимута и угла возвышения;

u_r, u_θ, u_ϕ ортогональные составляющие вектора ветра системы координат, заданной в ходе сканирования.

Проекция вектора ветра $\vec{u}(\vec{r})$ на направление луча, т. е. скалярное произведение (∘), может быть получена с помощью формулы B.8:

$$\vec{u}(\vec{r}) \circ \vec{e}_r = u_r \equiv v_r \equiv -v_{LOS} \tag{B.8}$$

Обычно величина v_{LOS} равна отрицательному значению радиальной компоненты v_r вектора местного ветра в точке $\vec{r}$. Отрицательный знак v_{LOS} объясняется тем, что, по общему правилу, в лидарных системах скорость ветра считается положительной по отношению к лазеру.

С учетом известной формулы преобразования между сферическими и декартовыми координатами[19] величину v_r можно выразить посредством компонент ветра u_x, u_y, u_z в декартовой системе координат следующим образом:

$$v_{LOS} = -v_r = -\left(u_x \cdot \cos\phi \cdot \sin\theta + u_y \cdot \cos\phi \cdot \cos\theta + u_z \cdot \sin\phi\right) \tag{B.9}$$

B.5 Восстановление вектора ветра

Для определения (декартовых) компонент u_x, u_y, u_z вектора ветра посредством доплеровского ветрового лидара зондирование атмосферы должно производиться под разными углами.

Примечание: компоненты ветра u_x, u_y, u_z также часто обозначаются как u, v, w.

Однако все компоненты ветра, как правило, подвержены пространственным и временным колебаниям, поскольку поле ветра в целом не может рассматриваться как однородное и стационарное в силу различных мелкомасштабных атмосферных процессов, таких как гравитационные волны, конвекция, турбулентность или эффекты потока, вызванные орографическими факторами. Поэтому для того, чтобы получить оценку вектора ветра по радиальным компонентам, необходимо сделать допущения относительно однородности. Чем вернее допущение, тем в большей степени оценка соответствует фактическому полю ветра. Данная проблема подробно рассматривается в литературе и разъясняется в учебных пособиях как применительно к радиолокаторам, так и лидарам (см., например, ссылки [21] и [22]).

Таким образом, на основании того предположения, что поле ветра может считаться стационарным в течение периода измерения и горизонтально однородным в пределах объема выборки, т. е. если поле ветра является лишь функцией вертикальной координаты z, измерения радиальной составляющей ветра на фиксированной геометрической высоте задаются формулой B.10, простым матричным уравнением:

$$A \cdot u = v_r \tag{B.10}$$

Строки данной (n x 3) матрицы A состоят из единичных направляющих векторов, указывающих ориентацию лучей n. Вектор v_r также является n-мерным и включает радиальные составляющие ветра, полученные по направлениям ориентации n. Это ничто иное, как компактное обозначение n скалярных (внутренних) произведений, указанных в

формуле B.8. Для $n = 3$ существует обратная матрица A^{-1}, если A имеет ранг 3 (например, все векторы-строки являются линейно независимыми), и вектор ветра может быть получен непосредственно с помощью формулы B.11:

$$u = A^{-1} \cdot v_{\mathrm{r}} \tag{B.11}$$

Для $n > 3$ и ранга $(A) = 3$ линейная система является переопределенной и либо имеет одно решение, либо не имеет никакого (точного) решения. Однако может быть найдено приближенное решение, которое приводит к минимизации функции $\left\| A \cdot u - v_r \right\|^2$. Это решение по методу наименьших квадратов может быть выражено посредством псевдообратной матрицы $(A^{\mathrm{T}}A)^{-1} \cdot A^{\mathrm{T}}$ для матрицы A, как показано в формуле B.12:

$$u = \left(A^{\mathrm{T}} A \right)^{-1} \cdot A^{\mathrm{T}} \cdot v_{\mathrm{r}} \tag{B.12}$$

A^{T} обозначает транспонированнную матрицу A. Формула B.12 носит достаточно общий характер и описывает все возможные конфигурации сканирования по дискретным направлениям ориентации луча n. Для получения численно устойчивых результатов следует аккуратно использовать данную формулу на практике.

Двумя часто используемыми режимами сканирования для доплеровских лидаров являются метод доплеровского качания луча или методы сканирования индикатора «скорость-азимут».

В случае, когда используется метод доплеровского качания луча, измерения проводятся как минимум по трем линейно независимым направлениям. Этот метод дает возможность быстрой развертки, но может приводить к систематическим погрешностям в измерениях, если поле ветра неоднородно. Правильность допущений при восстановлении профиля (однородность и стационарность) может быть в определенной степени проверена, если использовать более трех направлений. Наглядный пример применения метода доплеровского качания луча со значениями $n = 3$ и $n = 4$ приводится в работе [23].

В случае, когда осуществляется сканирование индикатора «скорость-азимут», азимут направления луча изменяется в течение всего процесса непрерывного сканирования. Изменение азимутального угла в серии измерений приводит к получению набора различных проекций вектора местного ветра на направления измерений. Угол возвышения в процессе остается постоянным. Изначально метод индикатора «скорость-азимут» был предложен для горизонтально однородного поля ветра[24]. Позднее методология была расширена для включения дополнительной линейной вариации компонент вектора[25]. В случае, когда поле ветра однородно, результатом является синусоидальный профиль измеренной скорости v_{LOS}.

Если мощность лидара позволяет провести несколько сканирований по азимуту с различными углами возвышения в разумный срок, то можно объединить результаты сканирования, для того чтобы получить полнообъемное изображение. Это делает возможным использование более усовершенствованной модели поля ветра, которая может быть подстроена под вектор наблюдений за величиной v_{r}. Иными словами, по аналогии с формулой B.10, можно далее расширить ряд Тейлора, включив также сдвиг ветра, т. е. первые пространственные производные. Для доплеровских радиолокаторов данная процедура является стандартной, она широко известна как «объемная обработка скорости». Впервые данная методика была опубликована в издании, приводимом в работе [26]. Этот анализ приводит к формуле B.13 вместо формулы B.10:

$$\begin{aligned}
v_{\mathrm{r}} &= \sin\theta \cdot \cos\phi \cdot u_0 + \cos\theta \cdot \cos\phi \cdot v_0 + \sin\phi \cdot w_0 \\
&+ r \cdot \sin^2\theta \cdot \cos^2\phi \cdot u'_{\mathrm{x}} \\
&+ r \cdot \cos^2\theta \cdot \cos^2\phi \cdot v'_{\mathrm{y}} \\
&+ r \cdot \cos\theta \cdot \sin\theta \cdot \cos^2\phi \cdot \left(u'_{\mathrm{y}} + v'_{\mathrm{x}} \right) \\
&+ \sin\phi \cdot \left(r \cdot \sin\phi - z_0 \right) \cdot w'_{\mathrm{z}} \\
&+ \sin\theta \cdot \cos\phi \cdot \left(r \cdot \sin\phi - z_0 \right) \cdot \left(u'_{\mathrm{z}} + w'_{\mathrm{x}} \right) \\
&+ \cos\theta \cdot \cos\phi \cdot \left(r \cdot \sin\phi - z_0 \right) \cdot \left(v'_{\mathrm{z}} + w'_{\mathrm{y}} \right)
\end{aligned} \tag{B.13}$$

Следует отметить, что данная модель не позволяет получить информацию о горизонтальной завихренности, поскольку величины u'_y и v'_x представлены лишь в качестве суммы в формуле B.13. В публикации [16] описывается применение указанного метода к данным лидара и осуществлено сопоставление с данными, полученными посредством доплеровского метеорологического радиолокатора.

ДОБАВЛЕНИЕ C. ПРИМЕНЕНИЯ

(Для информации)

C.1 Ветроэнергетика

C.1.1 *Общая информация*

На сегодняшний день одна из основных проблем на рынке ветроэнергетики — это оптимальный расчет будущей выработки электроэнергии ветряной электростанцией. В настоящее время процедура расчета заключается в том, чтобы получить наилучшую возможную оценку потенциала энергии ветра на определенном участке, наилучшую оценку энергии, которую может вырабатывать ветряная турбина за счет поступающего свободного потока ветра, и оценить надлежащим образом общие производственные потери, которые могут возникать при работе ветряной электростанции. Некоторые из этих потерь могут быть вызваны турбулентными следами, потерей производительности ветряной турбины, простоем в связи с оперативным и профилактическим техническим обслуживанием ветроэнергетической установки, а также другими параметрами, которые могут влиять на общую работу ветряной электростанции. На сегодняшний день когерентный доплеровский лидар наземного базирования является целесообразным инструментом для использования на всех этапах работы ветроэлектростанции: от стадии разработки до ввода в эксплуатацию, функционирования и переоснащения старых электростанций.

C.1.2 *Оценка ветровых ресурсов*

В настоящее время наземные лидары для измерения вертикального профиля (как импульсные, так и непрерывного излучения) широко используются на рынке ветроэнергетики всеми крупными проектировщиками с целью обеспечения высокоточных данных о скорости ветра и сокращения неопределенности горизонтальных и вертикальных составляющих во время операций по оценке ветровых ресурсов. В настоящее время когерентный доплеровский лидар наземного базирования может использоваться в рамках подобных операций без каких-либо мачт, а получаемые в результате данные считаются пригодными для удовлетворяющих критериям банковского финансирования проектов. Учитывая размер ветряной турбины и высоту, которой она может достигать, лидар позволяет провести надлежащую оценку вертикального профиля ветра, имеющую принципиально важное значение при проектировании ветряной турбины. Двумя основными параметрами, которые следует учитывать как факторы, которые могут влиять на годовое производство энергии ветряной электростанцией, являются вертикальный сдвиг ветра (изменение скорости ветра по вертикальной оси) и правое вращение ветра по вертикали (изменение направления ветра по вертикальной оси).

Появляется все больше оффшорных ветроэлектростанций, и сегодня наземные лидары, работающие в режиме импульсного сканирования, могут использоваться для оценки ресурсов ветра, при которой анализ шельфовых ветров осуществляется с берега. Это позволяет сократить горизонтальную неопределенность в операциях по оценке ветровых ресурсов с гораздо меньшими затратами, чем в случае использования стандартной метеорологической мачты в открытом море. Кроме того, для валидации некоторых моделей смены ветра с морского на береговой можно использовать корреляцию ветра, измеренного с помощью сканирующего лидара.

C.1.3 *Верификация кривой мощности*

C.1.3.1 Общая информация

В настоящее время в стандарте 61400-12-1[27] Международной электротехнической комиссии (МЭК) указывается, что для верификации кривой мощности ветряной турбины следует использовать метеорологическую мачту. Однако в связи с полным развитием методологии применения лидара наземного базирования для оценки ресурсов ветра стандарт МЭК 61400-12-1 претерпевает изменения и в будущем будет содержать упоминание наземного лидара для измерения вертикального профиля как средства верификации кривой мощности.

Стандарт верификации кривой мощности включает также новый метод измерения с использованием эквивалентной кривой мощности ветроколеса. В этом случае рассматривается и используется полный профиль ветра по диаметру ротора для оценки общего объема поступающего ветра на плоскости, а не только на уровне высоты оси ветровой турбины.

В дополнение к прибору для определения вертикального профиля, в случае, когда расстояние до ветряной турбины превышает 2,5D (где D — это диаметр ротора) свободного потока ветра ветряной турбины, сканирующий наземный лидар может также использоваться для верификации кривой мощности посредством сканирования с поверхности земли по направлению к ветряной турбине.

C.1.3.2 Фактор потерь в работе ветроэлектростанции

Анализируя в целом работу ветроэлектростанции, проектировщики ветроэнергетических установок используют в расчетах годового производства электроэнергии ряд коэффициентов потерь, и чем точнее эти показатели, тем основательнее проект и проще привлечь финансирование.

Наземный лидар используется в различных программах для валидации коэффициента потерь, вызванных турбулентными следами. Крупнейшие разработчики/владельцы ветряных электростанций располагают своим собственным инструментом моделирования ветрового потока, позволяющим оптимизировать конструкцию и расположение ветроэлектростанции, а наземный лидар сегодня является целесообразным средством, используемым для валидации их модели, благодаря получаемым посредством лидара данным. В рамках оптимизации работы ветряной электростанции широко используются также лидары, установленные на гондоле, в целях управления турбиной, контроля рассогласования ориентации на ветер или калибровки анемометра, установленного на гондоле.

C.2 Мониторинг опасных ветровых явлений для целей авиационной метеорологии

C.2.1 *Общая информация*

В настоящее время в условиях современного уровня развития и роста воздушного движения в мире осуществляется ряд проектов, направленных на модернизацию и совершенствование правил организации воздушного движения (ОрВД), таких как исследовательский проект ОрВД в Европе в рамках концепции «единого европейского воздушного пространства»[28] и проект NextGen в Соединенных Штатах Америки. В сфере авиационной метеорологии были выделены две основные прикладные области: измерения сдвигов ветра и вихревых следов. В контексте этих двух применений

когерентные доплеровские лидары считаются на сегодняшний день хорошо приспособленными и мощными датчиками для улучшения наблюдений за ветром в целях повышения безопасности и оптимизации воздушного движения.

C.2.2 *Сдвиг ветра*

Под сдвигами ветра понимают значительные изменения встречного или попутного ветра вдоль траектории взлета или захода на посадку, которые могут оказывать воздействие на воздушные суда[29]. Эти быстрые изменения скорости воздушного потока не могут быть компенсированы за счет ускорения или замедления движения по причине действия сил инерции. Таким образом, происходят изменения в подъемной силе, силе лобового сопротивления, и, как следствие, в траектории полета. Упомянутые выше воздействия сдвига ветра являются особенно опасными, когда они происходят вблизи земли, то есть во время взлета или посадки, поскольку они могут стать причиной тяжелых авиационных происшествий. Именно поэтому со времени Чикагской конференции в стандартах Международной организации гражданской авиации (ИКАО) уделяется внимание угрозе, которую представляет сдвиг ветра для гражданского воздушного движения. Так, сдвиг ветра упоминается в Приложении 3 к Конвенции о международной гражданской авиации — *Метеорологическое обеспечение международной аэронавигации*[29], и подготовлено *Руководство по сдвигу ветра на малых высотах* ИКАО (Doc. 9817)[30]. В Приложении 3 ИКАО проводится различие между двумя аспектами, касающимися сдвига ветра: оповещениями о сдвиге ветра и предупреждениями о сдвиге ветра.

a) Оповещения о сдвиге ветра представляют собой автоматические оповещения об интенсивности сдвига ветра, зафиксированного наземными приборами дистанционного зондирования. Оповещения выпускаются, когда сдвиг ветра превышает 15 уз (7,5 м/с) применительно к изменениям встречного/попутного ветра. Как подробно изложено в ссылке [30], опасность сдвигов ветра связана главным образом с сильными горизонтальными потоками, которые вызывают резкие изменения встречного и попутного ветра, значимые для воздушных судов;

b) предупреждения о сдвиге ветра должны содержать краткую информацию о наблюдаемых или ожидаемых сдвигах ветра, которые могут оказать неблагоприятное воздействие на воздушное судно. В них уделяется внимание условиям на высоте, не превышающей 500 м, и вдоль траекторий взлета и захода на посадку. Предупреждения составляются метеорологическим органом, отвечающим за метеорологические наблюдения в данном аэропорту. Предупреждения о сдвиге ветра готовятся «вручную» на основе всех доступных наблюдений (наземных, бортовых) и прогнозов погоды.

В соответствии с примерами передовой практики, описанными в публикации [30], когерентные доплеровские лидары представляют собой перспективное технологическое решение для обеспечения оповещений и/или предупреждений о сдвиге ветра в связи со следующим:

a) участки, представляющие интерес, включают траектории взлета и захода на посадку, которые могут зондироваться посредством сканирующего когерентного доплеровского лидара с индикатором кругового обзора (как правило, с углом возвышения 3°), сканированием глиссады[31] или линиями визирования вдоль глиссады;

b) участок, зондируемый для оповещения о сдвиге ветра, охватывает две расширенные зоны в 3 морские мили от взлетно-посадочной полосы, т. е. диапазон измерений составляет как минимум 7 км. Диапазон измерений при соответствующих атмосферных условиях (описанных в разделе 5) должен составлять по меньшей мере 7 км;

c) оповещения о сдвиге ветра составляются по трем ячейкам (в 1 морскую милю), которые образуют расширенные зоны с каждой стороны взлетно-посадочной полосы,

обычно именуемые ARENA (Area Noted for Attention — контрольный участок). Для расчета разностей параметров встречного или попутного ветра требуется наличие по меньшей мере двух точек. Это соответствует расчетному требуемому разрешению, которое должно превышать 1,852 км. Однако для того, чтобы выпускать точные оповещения о сдвиге ветра и быть в состоянии выявлять все виды сдвига ветра, особенно самые незначительные , которые представляют собой микропорывы (> 1,5 км), как правило, используются лидары и радиолокаторы с разрешением по дальности 200 м;

d) в документах ИКАО указывается типичная частота оповещений, которая подходит для обнаружения сдвигов ветра. Согласно передовой мировой практике эта частота варьируется от 1 до 3 минут;

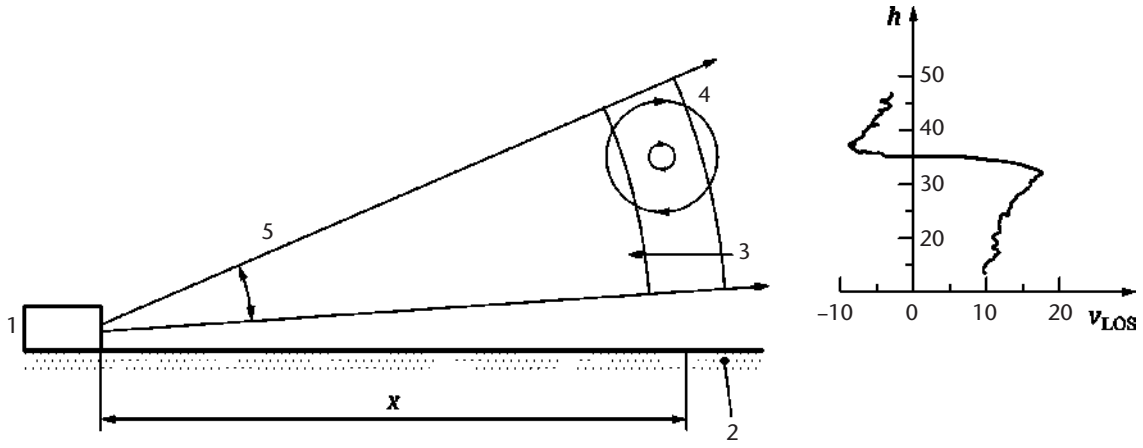
e) очень важно отметить, что конфигурации (в частности, время накопления, скорость сканирования, частота оповещения, форма участка зондирования, дальность зондирования) оборудования, такого как лидар, предназначенного для целей обеспечения оповещений или предупреждений о сдвиге ветра, должны быть адаптированы к местным требованиям (типичные местные явления сдвига ветра и потребности пользователей, таких как авиадиспетчеры).

Более того, доплеровские лидарные системы, соответствующие требованиям, указанным в добавлении D ниже, следует рассматривать в качестве ценного дополнения к наблюдениям, производимым посредством доплеровских метеорологических радиолокаторов, поскольку они обладают дополнительными функциями, касающимися осадков. Доплеровские лидары наиболее эффективно работают в условиях ясного неба, когда доплеровский радиолокатор получает лишь слабые сигналы, и наоборот, когда осадки ограничивают наблюдения доплеровского лидара, доплеровский радиолокатор функционирует оптимально. Пример с описанием конфигурации оборудования, включая доплеровский лидар, в международном аэропорту Гонконга приводится в ссылке [31].

C.2.3 ***Требования в отношении обнаружения спутных вихревых следов самолетов***

Изучение вихревых следов представляет большой интерес для лиц, занимающихся управлением воздушным движением, поскольку интенсивность вихревых следов (обычно выраженная через их циркуляцию) определяет минимальный интервал эшелонирования воздушных судов для обеспечения безопасности. Спутные вихри состоят из двух мощных горизонтальных вихревых потоков, которые тянутся от каждой из законцовок крыла. Они формируются за счет подъемной силы воздушного судна, которая приводит к возникновению потока воздуха, движущегося из-под крыла самолета вокруг законцовок в область над крылом. Спутные вихри весьма устойчивы по сравнению с турбулентностью и могут сохраняться до 3 минут при стабильных атмосферных условиях. Их циркуляция определяется весом воздушного судна, скоростью воздушного потока и размахом крыла. Размер спутных вихрей составляет порядка 20 метров, но они могут быть исключительно опасными на этапах взлета и посадки воздушного судна.

Именно поэтому с 1960-х гг. ИКАО разрабатывает правила для определения интервалов эшелонирования воздушных судов по трем категориям. С увеличением мирового объема воздушных перевозок и развитием сверхтяжелых воздушных судов появился ряд проектов, направленных на модернизацию правил управления воздушным движением, и в особенности положений, определяющих интервалы эшелонирования. Так, с 1990-х гг. были предприняты многочисленные исследования спутных вихрей с использованием вычислительных гидродинамических моделей и технологии когерентных доплеровских лидаров в целях оптимизации интервалов эшелонирования при обеспечении безопасности[32]; [33]. Для измерения таких вихрей особенно подходят сканирующие когерентные доплеровские лидары, так как они позволяют производить измерения спутных вихрей, создаваемых воздушным судном на высоте менее 500 метров, с высокой разрешающей способностью (менее 10 метров) и высокой частотой (до 5 секунд) для наблюдений за их поведением вне зоны влияния земли и в условиях ее влияния.



Обозначения

1 Лидар
2 Взлетно-посадочная полоса
3 Боковой ветер
4 Вихрь
5 Сканирование под углом

Принцип измерения для определения спутных вихревых следов воздушного судна с помощью доплеровского ветрового лидара

Как правило, измерения спутных вихрей проводятся вблизи взлетно-посадочных полос посредством сканирования с индикатором «дальность-высота» под острым углом (в среднем от 10 до 40°) и последующим картированием по вертикали движения спутных вихрей.

Лидарные измерения можно также подвергнуть последующей обработке для того, чтобы рассчитать характеристики спутных вихрей, такие как вероятность обнаружения, локализация вихревых ядер и циркуляция (интенсивность) вихрей[34]; [35].

С.2.4 *Ограничения в связи с выбором места*

Поскольку доплеровский лидар позволяет измерить лишь радиальную скорость ветра, размещение прибора имеет принципиально важное значение: ориентированный на взлетно-посадочную полосу вектор ветра должен иметь выраженную проекцию на линию визирования лидара. В целом величина и, следовательно, качество проекции составляющей ветра в направлении взлетно-посадочной полосы на линии визирования снижаются в соответствии с $\cos^2\theta$, где θ — угол между направлением луча и взлетно-посадочной полосой[6].

Другой аспект заключается в том, что в идеале следует проводить сканирование глиссады с углом наклона в 3°. Наиболее целесообразным для этого представляется сканирование с одним индикатором кругового обзора в случае, если лидар расположен на пороге взлетно-посадочной полосы. Если необходимо вести наблюдение на нескольких порогах взлетно-посадочной полосы посредством одного прибора, то следование глиссаде с углом наклона 3° невозможно, а описанные выше временные ограничения, как правило, не позволяют проведение сканирования с более чем одним углом возвышения. Тем не менее сканирование, производимое под углом 3° с центром в фактическом месте размещения лидара, все равно эффективнее системы оповещения о сдвиге ветра на малых высотах, в которой используются анемометры, в плане обнаружения сдвига ветра на участках глиссады.

ДОБАВЛЕНИЕ D. ТИПИЧНЫЕ ОБЛАСТИ ПРИМЕНЕНИЯ И СООТВЕТСТВУЮЩИЕ ТРЕБОВАНИЯ

(Для информации)

В соответствии с потребностями основных областей применения (см. таблицу ниже) выделяют три класса точности для измерения скорости ветра. Эти классы определяются в зависимости от конкретного пространственного и временного разрешения. Требования к точности измерений скорости ветра должны соблюдаться во всех областях применения.

a) Класс A: $x \leq 0{,}1$ м/с (например, для целей ветроэнергетики);

b) класс B: $0{,}1 < x \leq 0{,}5$ м/с (например, для метеорологический применений)[13];

c) класс C: $0{,}5 < x \leq 1{,}0$ м/с (например, для прогнозов текущей погоды)[13].

Типичные области применения и соответствующие требования

Применение	*Требуемый параметр*	*Ссылка*	*Типичная дальность зондирования (м)*	*Разрешение по дальности (м)*	*Разрешение по времени (мин)*	*Точность измерения скорости (м/с)*	*Точность измерения направления ветра (°)*	*Минимальная доступность данных (%)*
Картирование радиальной скорости	Радиальная скорость по линии визирования	Формула 5.A.5	200—10 000	25—100	1—10	0,5	Неприменимо	50—99[a]
Энергия ветра: например, оценка участка, кривая мощности, профиль ветра	Профиль горизонтального вектора ветра вдоль вертикальной оси	Например, [36]	40—200	25	10	0,5	2	85
Численный прогноз погоды с высоким разрешением	Профиль горизонтального вектора ветра вдоль вертикальной оси	[13]	> 50	25	10	0,5	2	80
Загрязнение воздуха: например, моделирование дисперсии, менеджмент рисков	Профиль горизонтального вектора ветра вдоль вертикальной оси	—	40—200	25	10	0,5	—	90
Авиация: сдвиг ветра	Радиальная составляющая ветра вдоль траектории взлета, захода на посадку и взлетно-посадочной полосы (ВПП)	[29]; [36]	7 000—8 000 (5 500 + 1/2 ВПП)	200	1	0,5	5	80

Применение	*Требуемый параметр*	*Ссылка*	*Типичная дальность зондирования (м)*	*Разрешение по дальности (м)*	*Разрешение по времени (мин)*	*Точность измерения скорости (м/с)*	*Точность измерения направления ветра (°)*	*Минимальная доступность данных (%)*
Авиация: мониторинг вихрей (наземные системы)	Радиальная скорость ветра на плоскостях, перпендикулярных ВПП	—	Расстояние до ВПП + 300—500 с каждой стороны	25 (5 с наложением)	0,1	1	—	< 50
Метеорологические применения: например, прогноз текущей погоды	Профиль горизонтального вектора ветра вдоль вертикальной оси	[13]	0—4 000	100	15	1	5	80

а В зависимости от области применения.

БИБЛИОГРАФИЯ

[1] Henderson, S.W., P. Gatt, D. Rees and R.M.N. Huffaker, 2005: Wind lidar. In: *Laser Remote Sensing* (T. Fujii and T. Fukuchi, eds.). 469–722, CRC Press, ISBN-10: 8247-4256-7.

[2] Measures, R.M., 1992: *Laser Remote Sensing: Fundamentals and Applications*. Krieger Publishing, 524 pp., ISBN-10: 8946-4619-2.

[3] Frehlich, R. and M. Kavaya, 1991: Coherent laser radar performance for general atmospheric refractive turbulence. *Appl. Opt.*, 30:5325–5352.

[4] Belmonte, A., 2003: Analyzing the efficiency of a practical heterodyne lidar in the turbulent atmosphere: telescope parameters. *Opt. Express.*, 11:2041–2046.

[5] Frehlich, R., S. Hannon and S. Henderson, 1997: Coherent Doppler lidar measurements of winds in the weak signal regime. *Appl. Opt.*, 36:3491–3499.

[6] Banakh, V.A. and I.N. Smalikho, 1997: Estimation of the turbulence eddy dissipation rate from the pulsed Doppler lidar data. *Atmos. Oceanic Opt.*, 10(12).

[7] Frehlich, R., 1996: Simulation of coherent Doppler lidar performance in the weak signal regime. *J. Atmos. Ocean. Technol.*, 13:646–658.

[8] Dabas, A., P. Drobinski and P. Flamant, 2000: Velocity biases of adaptive filters in heterodyne doppler lidar measurements. *J. Atmos. Ocean. Technol.*, 17:1189–1202.

[9] Dabas, A., 1999: Semi empirical model for the reliability of a matched filter frequency estimator for Doppler lidar. *J. Atmos. Ocean. Technol.*, 16:19–28.

[10] Goodman, J.W., 1975: Statistical properties of laser speckle patterns. In: *Laser Speckle* (J.C. Dainty, ed.). Springer.

[11] American National Standards Institute (ANSI) Z136.1-2014: *American National Standard for Safe Use of Lasers*. ISBN: 978-1-940168-00-5.

[12] IEC 60825-1:2014: *Safety of Laser Products – Part 1: Equipment Classification and Requirement*.

[13] Всемирная метеорологическая организация: http://www.wmo-sat.info/oscar/requirements.

[14] Boquet, M., P. Royer, J.P. Cariou, M. Machta and M. Valla, 2016: Simulation of doppler lidar measurement range and data availability. *J. Atmos. Ocean. Technol.*, paper accepted, DOI: 10.1175/JTECH-D-15-0057.1.

[15] Frehlich, R., 2001: Estimation of velocity error for doppler lidar measurements. *J. Atmos. Ocean. Technol.*, 18:1628–1639.

[16] Ernsdorf, T., B. Stiller, B.R. Beckmann, A. Weipert, S. Kauczok and R. Hannesen, 2014: Inter-comparison of X-band radar and lidar low-level wind measurement for air traffic control (ATC). Eighth Europ. Conf. on Radar in Meteorol. and Hydrol., Garmisch-Partenkirchen, Germany.

[17] Hannesen, R., S. Kauczok and A. Weipert, 2014: Quality of clear-air radar radial velocity data: do insects matter? Eighth Europ. Conf. on Radar in Meteorol. and Hydrol., Garmisch-Partenkirchen, Germany.

[18] Weipert, A., S. Kauczok, R. Hannesen, T. Ernsdorf and B. Stiller, 2014: Wind shear detection using radar and lidar at Frankfurt and Munich airports. Eighth Europ. Conf. on Radar in Meteorol. and Hydrol., Garmisch-Partenkirchen, Germany.

[19] Jörgensen, H., T. Mikkelsen, J. Streicher, H. Herrmann, C. Werner and E. Lyck, 1997: Lidar calibration experiment. *Appl. Phys. B.*, 64:355–361.

[20] Bronstein, I.N., K.A. Semendjajew, G. Musiol and H. Mühlig, 1993: *Taschenbuch der Mathematik*. Harri Deutsch.

[21] Fukao, S. and K. Hamazu, 2013: *Radar for Meteorological and Atmospheric Observations*. Springer.

[22] Banakh, V.A. and I.N. Smalikho, 2013: *Coherent Doppler Wind Lidars in a Turbulent Atmosphere.* Artech House.

[23] Srinivaso, R.I., V.K. Anandan and R.R. Narasimha, 2008: Evaluation of DBS wind measurement technique in different beam configurations for a VHF wind profiler. *J. Atmos. Ocean. Technol.*, 25(12):2304–2312.

[24] Lhermite, R.M., 1962: Note on wind variability with Doppler radar. *J. Atmos. Sci.*, 19(4):343–346.

[25] Browning, K.A. and R. Wexler, 1968: The determination of kinematic properties of a wind field using Doppler radar. *J. Appl. Meteorol.*, 7(1):105–113.

[26] Waldteufel, P. and H. Corbin, 1979: On the analysis of single Doppler radar data. *J. Appl. Meteor.*, 18:532–542.

[27] IEC 61400-12-1:2005: *Wind Turbines – Part 12-1: Power Performance Measurements of Electricity Producing Wind Turbines*.

[28] European ATM Master Plan, 2009: https://www.atmmasterplan.eu/.

[29] Международная организация гражданской авиации, 2016: Метеорологическое обеспечение международной аэронавигации, Дополнение 3 к Конвенции о международной гражданской авиации.
[30] Международная организация гражданской авиации, 2005: Руководство по сдвигу ветра на малых высотах, Док. 9817, AN/449.
[31] Shun, C.M. and P.W. Chan, 2008: Applications of an infrared doppler lidar in detection of wind shear. *J. Atmos. Ocean. Technol.*, 25(5):637–655.
[32] Wakenet-Eu: http://www.wakenet.eu/.
[33] Lang, S. and W. Bryant, 2006: *Vortex Research in the USA (WakeNet-USA).* Air Traffic Organization, Federal Aviation Administration.
[34] Holzäpfel, F., T. Gerz, F. Köpp, E. Stumpf, M. Harris, R.I. Young and A. Dolfi-Bouteyre, 2003: Strategies for circulation evaluation of aircraft wake vortices measured by lidar. *J. Atmos. Ocean. Technol.*, 20(8):1183–1195.
[35] Dolfi-Bouteyre, A., B. Augere, M. Valla, D. Goular, D. Fleury and G. Canat, 2009: 1,55 μm pulsed fiber lidar for wake vortex detection (axial or transverse). Wakenet-Eu Workshop.
[36] Hasager, C.B., D. Stein, M. Courtney, A. Pena, T. Mikkelsen, M. Stickland and A. Oldroyd, 2013: Hub height ocean winds over the North Sea observed by the NORSEWInD lidar array: measuring techniques, quality control and data management. *Remote Sens.*, 5:4280–4303.
[37] ISO 28902-1: *Air Quality – Environmental Meteorology – Part 1: Ground-based Remote Sensing of Visual Range by Lidar.*
[38] ISO 28902-3: *Air Quality – Environmental Meteorology – Part 3: Ground-based Remote Sensing of Wind by Continuous-wave Doppler Lidar.*

СПРАВОЧНАЯ И ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ЛИТЕРАТУРА

Adachi, A., T. Kobayashi, K.S. Gage, D.A. Carter, L.M. Hartten, W.L. Clark and M. Fukuda, 2005: Evaluation of three-beam and four-beam profiler wind measurement techniques using a five-beam wind profiler and collocated meteorological tower. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 22:1167–1180.

Angevine, W.M., W.L. Ecklund, D.A. Carter, K.S. Gage and K.P. Moran, 1994: Improved radio acoustic sounding techniques. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 11(1):42–49.

Bianco, L., D. Gottas and J.M. Wilczak, 2013: Implementation of a Gabor transform data quality-control algorithm for UHF wind profiling radars. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, 30(12):2697–2703.

Bevis, M., S. Businger, S. Chiswell, T.A. Herring, R.A. Anthes, C. Rocken and R.H. Ware, 1994: GPS meteorology: Mapping zenith wet delays onto precipitable water. *Journal of Applied Meteorology*, 33:379–386.

Brown, E.H. and F.F. Hall, 1978: Advances in atmospheric acoustics. *Reviews of Geophysics and Space Physics*, 16:47–109.

Cadeddu, M.P., G.E. Peckham and C. Gaffard, 2002: The vertical resolution of ground-based microwave radiometers analysed through a multiresolution wavelet technique. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 40(3):531–540.

Candlish, L.M., R.L. Raddatz, M.G. Asplin and D.G. Barber, 2012: Atmospheric temperature and absolute humidity profiles over the Beaufort Sea and Amundsen Gulf from a microwave radiometer. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 29:1182–1201.

Chan, P.W., 2009: Performance and application of a multi-wavelength, ground-based microwave radiometer in intense convective weather. *Meteorologische Zeitschrift*, 18:253–265.

Chan, P.W. and Y.F. Lee, 2013: Application of brightness temperature data from a ground-based microwave radiometer to issue low-level windshear alert over Hong Kong International Airport. *Mausam* 64(3):457–466.

Chan, W.S. and J.C.W. Lee, 2015: Vertical profile retrievals with warm-rain microphysics using the ground-based microwave radiometer operated by the Hong Kong Observatory. *Atmospheric Research*, 161–162:125–133.

Chakraborty, R., S. Das and A. Maitra, 2016: Prediction of convective events using multi-frequency radiometric observations at Kolkata. *Atmospheric Research*, 169:24–31.

Davis, J.L., T.A. Herring, I.I. Shapiro, A.E.E. Rogers and G. Elgered, 1985: Geodesy by radio interferometry: Effects of atmospheric modeling errors on estimates of baseline length. *Radio Science*, 20(6):1593–1607.

Derr, V.E., 1972: *Remote Sensing of the Troposphere*. United States National Oceanic and Atmospheric Administration, WPL, Boulder, Colorado.

Dolman, B. K. and I.M. Reid, 2014: Bias correction and overall performance of a VHF spaced antenna boundary layer profiler for operational weather forecasting. Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics, 118:16–24.

Doviak, R. J. and D.S. Zrnić, 2014: Doppler Radar and Weather Observations. Academic Press.

Elgered, G., H.-P. Plag, S. Barlag and J. Nash, 2004: *COST716 Final Report*, European Union.

Fernández-González, S., F. Valero, J.L. Sanchez, E. Gascón, L. López, E. García-Ortega, and A. Merino, 2014: Observation of a freezing drizzle episode: A case study. *Atmospheric Research*, 149:244-254.

Fukao, S., K. Hamazu and R.J. Doviak, 2014: *Radar for Meteorological and Atmospheric Observations*. Springer Japan.

Gaffard, C. and T. Hewison, 2003: Radiometrics MP3000 microwave radiometer trial report. *Technical Report –TR26*, Met Office, Workingham, Berkshire, UK.

Gaynor, J.E., C.B. Baker and J.C. Kaimal, 1990: The international sodar intercomparison experiment. *Proceedings of the Fifth International Symposium on Acoustic Remote Sensing*. McGraw-Hill, New York, 67–74.

Gossard, E.E. and R.G. Strauch, 1983: *Radar Observations of Clear Air and Clouds*. Elsevier, Scientific Publishing Co., Amsterdam.

Güldner, J. and D. Spänkuch, 2001: Remote sensing of the thermodynamic state of the atmospheric boundary layer by ground-based microwave radiometry. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 18:925–933.

Hinkley, E.D., 1976: *Laser Monitoring of the Atmosphere: Topics in Applied Physics*. Volume 14, Springer Verlag, New York.

Hocking, W.K., 2011: A review of mesosphere–stratosphere–troposphere (MST) radar developments and studies, circa 1997–2008. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 73(9):848–882.

Hocking, W.K., J. Röttger, R.D. Palmer, T. Sato and P B. Chilson (2016): *Atmospheric Radar: Application and Science of MST Radars in the Earth's Mesosphere, Stratosphere, Troposphere, and Weakly Ionized Regions*. Cambridge University Press.

Hogg, D.C., M.T. Decker, F.O. Guiraud, K.B. Earnshaw, D.A. Merritt, K.P. Moran, W.B. Sweezy, R.G. Strauch, E.R. Westwater and C.G. Little, 1983: An automatic profiler of the temperature, wind and humidity in the troposphere. *Journal of Climate and Applied Meteorology*, 22:807–831.

Illingworth, A. J., D. Cimini, C. Gaffard, M. Haeffelin, V. Lehmann, U. Löhnert and D. Ruffieux, 2015: Exploiting existing ground-based remote sensing networks to improve high-resolution weather forecasts. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 96(12):2107–2125.

Kadygrov, E.N., E.A. Miller and A.V. Troitsky, 2013: Study of atmospheric boundary layer thermodynamics during total solar eclipses. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 51(9):4672–4677.

Kadygrov, E.N. and D.R. Pick, 1998: The potential for temperature retrieval from an angular-scanning single-channel microwave radiometer and some comparisons with in situ observations. *Meteorological Applications*, 5:393–404.

Kadygrov, E.N., G.N. Shur and A.S. Viazankin, 2003: Investigation of atmospheric boundary layer temperature, turbulence, and wind parameters on the basis of passive microwave remote sensing. *Radio Science*, 38(3):13.1–13.12.

Lataitis, R.J., 1992*a*: Signal power for radio acoustic sounding of temperature: The effects of horizontal winds, turbulence and vertical temperature gradients. *Radio Science*, 27:369–385.

———, 1992*b*: *Theory and Application of a Radio-acoustic Sounding System*. NOAA Technical Memorandum ERL WPL-230.

Liljegren, J.C., S.A. Boukabara, K. Cady-Pereira and S.A. Clough, 2005: The Effect of the half-width of the 22-GHz water vapor line on retrievals of temperature and water vapor profiles with a 12-channel radiometer. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 43(5):1102–1108.

Madhulatha, A., M. Rajeevan, M.V. Ratnam, J. Bhate and C.V. Naidu, 2013: Nowcasting severe convective activity over southeast India using ground-based microwave radiometer observations. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 118(1):1–13.

Martner, B.E., D.B. Wuertz, B.B. Stankov, R.G. Strauch, E.R. Westwater, K.S. Gage, W.L. Ecklund, C.L. Martin and W.F. Dabberdt, 1993: An evaluation of wind profiler, RASS and microwave radiometer performance. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 74(4):599–613.

May, P.T., R.G. Strauch, K.P. Moran and W.L. Eckund, 1990: Temperature sounding by RASS, with wind profiler radars: A preliminary study. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 28(1):19–28.

Muschinski, A., V. Lehmann, L. Justen and G. Teschke, 2005; Advanced radar wind profiling. *Meteorologische Zeitschrift*, 14(5):609–625.

Navas-Guzman, F., O. Stahli and N. Kampfer, 2013: Study of cloud effect on the tropospheric temperature retrievals. In: *URSI Commission F Microwave Signatures 2013: Specialist Symposium on Microwave Remote Sensing of the Earth, Oceans, and Atmosphere*, October 2013, Finland, p.136.

Neff, W.D. and R.L. Coulter, 1986: Acoustic remote sounding. In: *Probing the Atmospheric Boundary Layer* (Lenschow, D.H., ed.). American Meteorological Society, 201–236.

Panofsky, H.A., 1973: Tower micrometeorology. In: *Workshop on Micrometeorology* (Haugen, D.A., ed.), Chapter 4, American Meteorological Society.

Saastamoinen, J., 1972: Atmospheric correction for the troposphere and stratosphere in radio ranging of satellites. *Geophysical Monograph Series: The Use of Artificial Satellites for Geodesy*, 15:247–251.

Singal, S.P., 1990: Current status of air quality related boundary layer meteorological studies using sodar. *Proceedings of the Fifth International Symposium on Acoustic Remote Sensing*, McGraw-Hill, New York, 453–476.

Smith, E.K. and S. Weintraub, 1953: The constants in the equation for atmospheric refractive index at radio frequencies. *Proceedings of the IRE*, 41(8):1035–1037.

Solheim, F., J.R. Godwin, E.R. Westwater, Y. Han, S.J. Keihm, K. Marsh, R. Ware, 1998: Radiometric profiling of temperature, water vapor, and cloud liquid water using various inversion methods. *Radio Science*, 33:393–404.

Syed, I. and E.V. Browell, 1994: Recent Lidar technology developments and their influence on measurements of tropospheric water vapor. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 11(1):76–84.

Teschke, G. and V. Lehmann, 2017: Mean wind vector estimation using the velocity–azimuth-display (VAD) method: An explicit algebraic solution. *Atmospheric Measurement Techniques Discussions*, 10:3265–3271.

Thayer, G.D., 1974: An improved equation for the radio refractive index of air. *Radio Science*, 9(10):803–807.

Thomas, L., 1991: Lidar probing of the atmosphere. *Indian Journal of Radio and Space Physics*, 20:368–380.

Thompson, A.R., J.M. Moran and G.W. Swenson, 1986: *Interferometry and Synthesis in Radio Astronomy*. John Wiley and Sons, New York.

Thompson, N., 1980: Tethered balloons. In: *Air-sea Interaction: Instruments and Methods* (F. Dobson, L. Hasse and R. Davis, eds.) Chapter 31, Plenum Press, New York.

Wakasugi, K. and S. Fukao, 1985: Sidelobe properties of a complementary code used in MST radar observations. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 23(1):57–59.

Ware, R., R. Carpenter, J. Güldner, J. Liljegren, T. Nehrkorn, F. Solheim and F. Vandenberghe, 2003: A multi-channel radiometric profiler of temperature, humidity and cloud liquid. *Radio Science*, 38:8079–8092.

Ware, R., D. Cimini, E. Campos, G. Giuliani, S. Albers, M. Nelson, S.E. Koch, P. Joe and S. Cober, 2013: Thermodynamic and liquid profiling during the 2010 Winter Olympics. *Atmospheric Research*, 132–133:278–290.

Weber, B.L. and D.B. Wuertz, 1990: Comparison of rawinsonde and wind profiler radar measurements. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 7(1):157–174.

Weber, B.L., D.B. Wuertz, R.G. Strauch, D.A. Merritt, K.P. Moran, D.C. Law, D. van de Kamp, R.B. Chadwick, M.H. Ackley, M.F. Barth, N.L. Abshire, P.A. Miller and T.W. Schlatter, 1990: Preliminary evaluation of the first NOAA demonstration network wind profiler. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 7(6):909–918.

Westwater, E., S. Crewell, C. Mätzler and D. Cimini, 2005: Principles of surface-based microwave and millimetre wave radiometric remote sensing of the troposphere. *Quaderni Della Società Italiana di Elettromagnetismo*, 1(3).

Westwater, E.R., Y. Han, V.G. Irisov, V. Leuskiy, E.N. Kadygrov and S.A. Viazankin, 1999: Remote sensing of boundary layer temperature profiles by a scanning 5-mm microwave radiometer and RASS: Comparison experiments. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 16:805–818.

Westwater, E.R., J.B. Snider and M.J. Falls, 1990: Ground-based radiometric observations of atmospheric emission and attenuation at 20.6, 31.65, and 90.0 GHz: A comparison of measurements and theory. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 38(10):1569–1580.

Wilczak, J. M., E.E. Gossard, W.D. Neff and W.L. Eberhard, 1996: Ground-based remote sensing of the atmospheric boundary layer: 25 years of progress. In: *Boundary-Layer Meteorology 25th Anniversary Volume, 1970–1995*, 321–349. Dordrecht, Springer.

Woods, C.P., M.T. Stoelinga, J.D. Locatelli and P.V. Hobbs, 2005: Microphysical processes and synergistic interaction between frontal and orographic forcing of precipitation during the 13 December 2001 IMPROVE-2 event over the Oregon Cascades. *Journal of Atmospheric Science*, 62(10):3493–3519.

World Meteorological Organization, 1980: *Lower Tropospheric Data Compatibility: Low-level Intercomparison Experiment* (Boulder, United States, 1979). Instruments and Observing Methods Report No. 3. Geneva.

———, 1982: *Indirect Sensing: Meteorological Observations by Laser Indirect Sensing Techniques* (A.O. Van Gysegem). Instruments and Observing Methods Report No. 12. Geneva.

———, 1994: Comparison of windprofiler and rawinsonde measurements (J. Neisser, V. Görsdorf and H. Steinhagen). *Papers 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.

———, 2006*a*: *Operational Aspects of Different Ground-Based Remote Sensing Observing Techniques for Vertical Profiling of Temperature, Wind, Humidity and Cloud Structure: A Review* (E.N. Kadygrov). Instruments and Observing Methods Report No. 89 (WMO/TD-No. 1309). Geneva.

———, 2006*b*: *National/Regional Operational Procedures of GPS Water Vapour Networks and Agreed International Procedures* (S. de Haan). Instruments and Observing Methods Report No. 92 (WMO/TD-No. 1340). Geneva.

Xu, G., R. Ware, W. Zhang and G. Feng, 2014: Effect of the off-zenith observation on reducing the impact of precipitation on ground-based microwave radiometer measurement accuracy in Wuhan. *Atmospheric Research,* 140–141:85–94.

ГЛАВА 6. ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ МЕТОДЫ ОБНАРУЖЕНИЯ МОЛНИЙ

6.1 ВВЕДЕНИЕ

Во вспышках молнии в облаке и по направлению от облака к земле происходит много отдельных физических процессов. Каждый из этих процессов связан с характерными электрическими и магнитными полями. Известно, что молния излучает значительную электромагнитную энергию в диапазоне радиочастот от менее 1 Гц до почти 300 МГц при пике в частотном спектре примерно от 5 до 10 КГц для молний на расстоянии более 50 км или около этого. Стоит отметить, что электромагнитное излучение, создаваемое молниями, может быть обнаружено даже на более высоких частотах, например, в микроволновом диапазоне (от 300 МГц до 300 ГГц) и, безусловно, в видимой части спектра излучения (приблизительно от 10^{14} до 10^{15} Гц). В диапазоне частот выше пика спектра спектральная амплитуда изменяется примерно обратно пропорционально частоте до 10 МГц или около этого и обратно пропорциональна квадратному корню от частоты, примерно от 10 МГц до 10 ГГц. Также известно, что молния порождает рентгеновские лучи (до 10^{20} Гц или более), хотя на уровне земли они обычно не регистрируются на расстоянии больше километра от источника. В целом, любой наблюдаемый электромагнитный сигнал от источника молнии может использоваться для обнаружения и определения местоположения процесса развития молнии, который вызвал его. В дополнение к электромагнитному излучению молния порождает акустическое излучение, которое также может использоваться для определения места развития молнии. Акустические методы определения местоположения, время поступления акустического сигнала и отслеживание акустического луча в настоящей главе далее не рассматриваются.

6.2 РАЗРЯД МОЛНИИ

Молния может определяться в качестве кратковременного сильноточного (обычно десятки килоампер) электрического воздушного разряда, длина которого измеряется в километрах. Как и для любого разряда в воздухе, канал молнии состоит из ионизированного газа, т. е. плазмы, максимальная температура которого обычно составляет 30 000 K, что примерно в пять раз выше температуры поверхности Солнца. Молния присутствовала на Земле задолго до развития человеческой жизни на Земле и, возможно, сыграла решающую роль в эволюции жизни на нашей планете. Глобальная частота вспышек молнии составляет от нескольких десятков до сотни в секунду или что-то около этого. Каждый год, примерно 25 миллионов разрядов молнии, направленных по направлению от облака к земле (необходимо отметить, что, в среднем, около 3/4 разрядов молнии ограничены облаками, иначе говоря, не связаны с землей), происходят только в США, убивая больше людей, чем торнадо и ураганы. Молния служит причиной многих лесных пожаров, и более 30 % всех аварий электросетей связано с молниями; молния попадает в каждое воздушное коммерческое судно в среднем один раз в год. Удар молнии в незащищенный объект или систему может иметь катастрофические последствия.

6.2.1 Типы молний, процессы и параметры

Примерно более 90 % глобальных молний по направлению от облака к земле объясняются отрицательно заряженной (отрицательный заряд эффективно переносится к земле) нисходящей (начальный процесс начинается в облаке и развивается вниз) молнией. Другие типы молнии в направлении от облака к земле включают положительные нисходящие, отрицательные восходящие и положительные восходящие разряды. Существуют также биполярные разряды молний, последовательно передающих как положительные, так и отрицательные заряды в течение одной и той же вспышки. Основными элементами отрицательного разряда нисходящей молнии являются так называемые компонентные удары или просто удары. Каждый разряд (или вспышка)

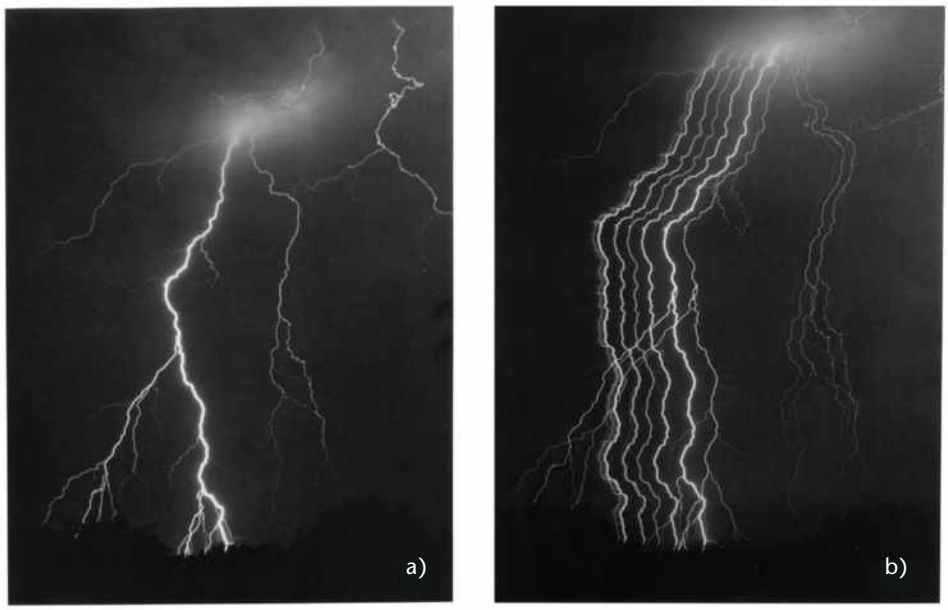


Рисунок 6.1. Вспышка молнии, которая имеет, по меньшей мере, 7 (возможно до 10) отдельных точек удара в землю. Изображение (a) является статичной фотографией, а изображение (b) — фотография камеры с временной разверткой. Некоторые из точек удара связаны с тем же ударом, имеющим отдельные ветвления, касающиеся поверхности земли, тогда как другие связаны с разными ударами, имеющими другой путь к земле. (Взято из работы Hendry, 1993).

обычно содержит от 3 до 5 ударов при наблюдавшемся диапазоне от 1 до 26. Примерно половина всех разрядов молнии к поверхности Земли попадает более чем в одну точку, при этом пространственное разделение между закрытиями канала составляет многие километры. Два основных процесса молнии, составляющих удар, называются лидером и возвратным ударом, которые происходят в виде последовательности с лидером, предшествующим возвратному удару. В дискуссии, представленной ниже, разряды молний рассматриваются более подробно. В работе Rakov и Uman (2003) и содержащихся в ней ссылках представлено больше дополнительной информации.

На рисунках 6.1(a) и 6.1(b) показаны две фотографии отрицательного разряда по направлению от облака к земле. Снимок на рисунке 6.1(a) был получен с использованием стационарной камеры, тогда как снимок на рисунке 6.1(b) был сделан отдельной камерой, которая двигалась горизонтально во время вспышки. В результате, второй снимок имеет временную развертку, показывая семь четких светящихся каналов между облаком и землей. Темные интервалы между этими каналами обычно составляют порядка десяти миллисекунд и объясняют причину, почему молнии часто представляются глазу человека «мерцающими». Каждый светящийся канал соответствует отдельному удару, при этом первый удар является крайним справа (временные опережения справа налево). Первые два удара имеют ветвистый вид, и направление ветвлений вниз означает, что это вспышка нисходящей молнии.

Схематические рисунки фотографических изображений и снимков с временной разверткой изображения вспышки молнии с тремя ударами представлены соответственно на рисунках 6.2(a) и 6.2(b). На рисунке 6.2(c) показано схематическое изображение соответствующего тока в основании канала. На рисунке 6.2(b) временные опережения слева направо и временной масштаб не являются непрерывными. Каждый из трех ударов на рисунке 6.2(b), представленный свечением, как функции высоты над землей и времени, состоит из процесса движения вниз, называемого лидером, и процесса движения вверх, называемого возвратным ударом. Лидер создает токопроводящую дорожку между областью источника заряда в облаке и землей, и распределяет отрицательный заряд из области источника в облаке вдоль этой дорожки, и возвратный

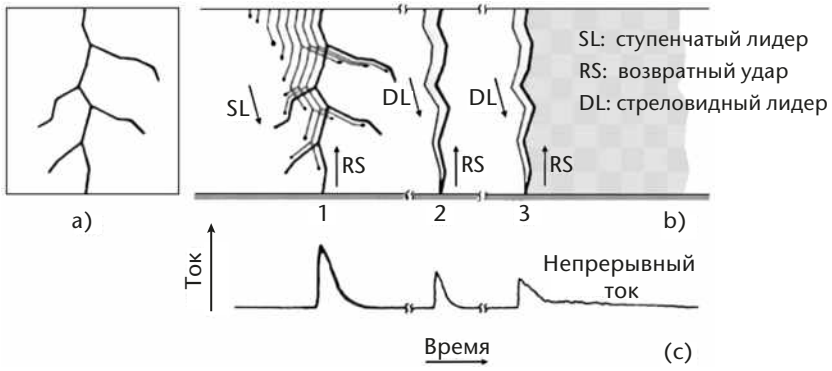


Рисунок 6.2. Схема, показывающая свечение вспышки из трех ударов у поверхности земли и соответствующую силу тока у основания канала. Изображение (a) — это снимок статичной камеры; (b) — это снимок камеры с временной разверткой и (c) — это ток у основания канала.

удар проходит этот путь, двигаясь от поверхности земли к области источника заряда в облаке, и нейтрализует отрицательный заряд лидера. Таким образом, процессы лидера и возвратного удара служат в качестве эффективного переноса отрицательного заряда от облака к земле. Как можно видеть на рисунке 6.2(b), лидер, инициирующий первый возвратный удар, отличается от лидеров, инициирующих два последующих удара (все удары, кроме первого, называются последующими ударами). В частности, первый удар-лидер представляется оптически прерывистым процессом, и называемый, поэтому ступенчатым лидером, тогда как конец лидера последующего удара представляется непрерывно движущимся. Постоянно движущийся конец лидера последующего удара представляется на фотографиях с временной разверткой как движущаяся вниз «стрела», и поэтому используется термин стреловидный лидер. Очевидное различие между двумя типами лидеров связано с тем, что ступенчатый лидер развивается в невозмущенном воздухе, тогда как стреловидный лидер следует по «заранее обусловленному» пути предшествующего удара или ударов. Иногда последующий лидер демонстрирует ступенчатое смещение при распространении в ранее образованном канале; в этом случае он называется стреловидно-ступенчатый лидер. Существуют также так называемые хаотичные лидеры последующего удара. Все типы лидеров вызывают выбросы рентгеновского излучения, энергия которого обычно составляет до 250 кэВ (в два раза больше энергии рентгенографии грудной клетки) (Dwyer, 2005).

Разность электрического потенциала между концом движущегося вниз ступенчатого лидера и землей составляет, вероятно, несколько десятков мегавольт, что сравнимо или составляет значительную часть между источником заряда в облаке и землей. Величина разности потенциала между двумя точками, одна из которых находится у источника заряда в облаке, а другая на земле, является линейным интегралом интенсивности электрического поля между этими точками. Верхний и нижний пределы разности потенциала между нижней границей области основного отрицательного заряда и землей можно оценить, умножив соответственно обычное наблюдаемое электрическое поле в облаке, 10^5 В/м, и ожидаемое электрическое поле у земли под грозовым облаком непосредственно до зарождения молнии, 10^4 В/м, на высоту нижней границы центра отрицательного заряда над землей, примерно 5 км. Полученный диапазон составляет от 50 до 500 МВ.

Когда нисходящий ступенчатый лидер достигает поверхности земли, начинается первый возвратный удар. Ток первого возвратного удара, измеренный у земли, повышается до начальной пиковой величины примерно 30 кА в течение нескольких микросекунд, и падает до половины пикового значения в течение нескольких десятков микросекунд. Возвратный удар эффективным образом опускает к поверхности земли несколько кулонов заряда, первоначально отложенного в канале ступенчатого лидера, включая все ветвления, а также любой дополнительный заряд в облаке, который может войти в канал возвратного удара.

Как только нижняя часть канала стреловидного лидера достигает земной поверхности, вверх запускается волна второго (или любого последующего) возвратного удара, который снова используется для нейтрализации заряда лидера. Сила тока последующего возвратного удара у земли обычно повышается до максимального значения от 10 до 15 кА за менее, чем микросекунду, и падает до половины максимального значения в течение нескольких десятков микросекунд.

Волна высокотокового возвратного удара разогревает канал до максимальной температуры примерно 30 000 К и выше и создает давление в канале около или более 1 МПа, приводя к расширению канала, интенсивной оптической радиации и распространяющейся наружу ударной волне, которая в конечном счете становится громом (звуковая волна), который мы слышим на расстоянии.

За импульсным компонентом тока в возвратном ударе (обычно последовательном) часто следует постоянный ток, который имеет величину от десятков до сотен ампер и продолжительность до сотен миллисекунд. Непрерывные токи с продолжительностью, превышающей 40 мс, обычно называются длительными непрерывными токами. От 30 % до 50 % всех отрицательных вспышек от облака к земле содержат длительный непрерывный ток. Импульсы тока, наложенные на непрерывные токи, а также соответствующее повышение свечения канала молнии называются М-компонентами.

Существует особый тип молнии, который считается наиболее интенсивным естественным генератором ВЧ/ОВЧ (3—300 МГц) излучения на Земле. Он называется компактным внутриоблачным разрядом (CID). О компактных внутриоблачных разрядах впервые было сообщено Le Vine (1980), получивших свое название (Smith et al., 1999) вследствие относительно небольшой (сотни метров) пространственной протяженности. Они происходят на больших высотах (в основном выше 10 км), по-видимому, связаны с сильной конвекцией (однако даже самая мощная конвекция не всегда порождает CID), производят меньше света, чем другие типы разрядов молний и вызывают единичные импульсы биполярных электрический полей (короткие биполярные импульсы или NBP), имея типичную полную ширину от 10 до 30 мкс и амплитуды порядка 10 В/м на 100 км, что сравнимо или выше, чем для возвратных ударов во вспышках от облака к земле. В качестве иллюстрации отличительной черты широкополосных электромагнитных CID, 48 CID, детально исследованные Nag et al. (2010), были зарегистрированы 4-мя из 22-х (в среднем 11) станций Национальной сети обнаружения молний США (NLDN), средняя базисная линия которой составляет 300—350 км.

6.2.2 Электромагнитные характерные признаки молнии

Разряды молнии по направлению от облака в землю и внутри облака состоят из ряда процессов, которые образуют характерные признаки электромагнитного поля. Ниже вкратце рассматриваются ярко выраженные характеристики измеренных электрических и магнитных полей, образованных различными процессами молний от десятков до сотен километров. Особое внимание уделяется тем процессам, которые вызывают значительные изменения поля в масштабе микросекунды и долей микросекунды.

В таблице ниже обобщаются, главным образом, все определяемые отличительные черты поля излучения молнии, регистрируемые на земле. Следует отметить, что очевидно не существует характерного признака поля в масштабе микросекунды, связанного с процессами К- и М-молнии. Кроме того, возвратные удары (первый ряд) и компактные внутриоблачные разряды (последний ряд), импульсы, вызываемые процессами развития молнии, представленные в таблице, происходят сериями с интервалами между импульсами порядка долей миллисекунды. Импульсы лидера (второй и третий ряды), предположительно испускаемые нижней частью канала на землю перед самым началом возвратного удара, будучи оба начальными импульсами пробоя (четвертый и пятый ряды) и регулярными пакетами импульсов (шестой ряд), вызываются процессами молнии, происходящими внутри облака. Характеристика, приведенная ниже, относится и к общим последовательностям импульсов и к отдельным импульсам.

Характеристики импульсов электрического поля в масштабе микросекунды, связанные с различными процессами молнии (по материалам работы Rakov, 1999)

Тип импульсов	*Преобладающая полярность (правило знаков атмосферного электричества)*	*Типичная общая продолжительность импульса (мкс)*	*Типичный временной интервал между импульсами (мкс)*	*Комментарии*
Возвратный удар в отрицательных наземных вспышках	Положительная	30—90 (время пересечения нулевого уровня)	60×10^3	3—5 импульсов на вспышку
Ступенчатый лидер в отрицательных наземных вспышках	Положительная	1—2	15—25	В пределах 200 мкс непосредственно перед возвратным ударом
Стреловидный лидер в отрицательных наземных вспышках	Положительная	1—2	6—8	В пределах 200 мкс непосредственно перед возвратным ударом
Начальный пробой в отрицательных наземных вспышках	Положительная	20—40	70—130	От нескольких миллисекунд до нескольких десятков миллисекунд перед первым возвратным ударом
Начальный пробой во вспышках в облаке	Отрицательная	50—80	600—800	Самые большие импульсы во вспышке
Регулярный пакет импульсов во вспышках, как в облаке, так и в отрицательных наземных вспышках	Обе полярности примерно равной вероятности	1—2	5—7	Происходят позднее во вспышке; 20—40 импульсов на пакет
Компактный внутриоблачный разряд (короткое биполярное явление)	Имеют место обе полярности, при этом отрицательная имеет место более часто	10—30	—	Обычно в пределах сотен миллисекунд какой-либо другой процесс молнии не предшествует разряду и не следует за ним

Примечания:

a Полярность начальной половины цикла в случае биполярных импульсов.

b В соответствии с обозначением знака атмосферного электричества, предполагается, что направленный вниз вектор электрического поля положительный.

Отрицательные наземные вспышки

Обычная структура импульса в масштабе микросекунды естественно происходящих отрицательных наземных разрядов, наблюдающихся у земли, включает начальную серию импульсов (обычно называемых начальными или предварительными импульсами пробоя), за которыми обычно следуют через несколько миллисекунд или нескольких десятков миллисекунд 3—5 относительно больших импульсов возвратного удара с интервалом несколько десятков миллисекунд. Продолжительность начальной последовательности импульсов обычно несколько миллисекунд. На рисунке 6.3(a) показаны формы волны отдельного импульса, характерные для предварительного пробоя в отрицательных вспышках у земли. Начальная полярность предварительных импульсов пробоя обычно такая же, как и импульса последующего возвратного удара. Первоначальные импульсы пробоя могут иметь амплитуды, сравнимые или даже превышающие амплитуды соответствующих импульсов возвратного удара. Непосредственно перед импульсом первого возвратного удара и до импульсов некоторых последующих возвратных ударов наблюдаются последовательности импульсов, связанные в первом случае с процессом ступенчатого лидера и в последнем случае со стреловидно-ступенчатым (ряд регулярных импульсов) или хаотичным (ряд нерегулярных импульсов) процессом лидера. Эти

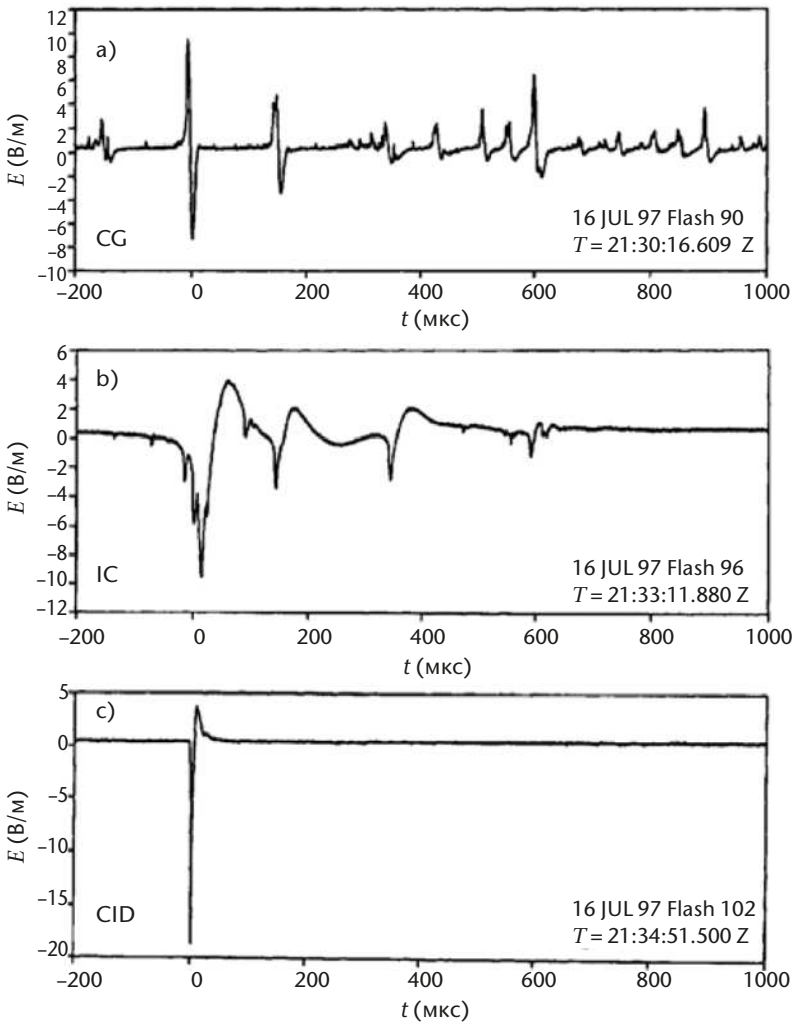


Рисунок 6.3. Примеры волновых форм импульсов электрического поля (E), характерных для a) начального пробоя в отрицательных наземных вспышках по направлению от облака к земле (CG), b) начального пробоя во вспышках внутри облака (IC) и c) компактных внутриоблачных разрядов (CIDs). Положительно заряженное электрическое поле (правило знаков атмосферного электричества) отклоняется вверх. (Заимствовано из работы Rakov, 1999).

последовательности импульсов наблюдались в течение нескольких десятков сотен микросекунд, и амплитуды импульсов от одного до двух порядков величины меньше, чем соответствующая амплитуда импульса возвратного удара. Импульсы ступенчатого лидера видны непосредственно до импульса возвратного удара на рисунке 6.4(a), до $t = 0$. Довольно нерегулярный ряд импульсов, указывающий на хаотичного лидера, виден до импульса последующего возвратного удара (до $t = 0$) на рисунке 6.4(b). Обычно имеется относительно спокойный промежуток в масштабе миллисекунды между предварительной последовательностью импульсов пробоя и началом выраженных импульсов ступенчатого лидера. Интервалы между импульсами возвратного удара и временной интервал несколько десятков миллисекунд или около того, следующий за импульсом последнего возвратного удара, содержат регулярные пачки импульсов относительно небольшой амплитуды и некоторую другую обычно нерегулярную активность импульсов. Пики импульсов в регулярных вспышках импульсов примерно на два порядка величины меньше, чем пики начального поля возвратного удара в той же вспышке. Как можно видеть в таблице, регулярные вспышки импульсов очень похожи по своим характеристикам на серии импульсов, связанных со стреловидно-ступенчатыми лидерами. Среднее геометрическое начального пика электрического поля, нормализованного к 100 км для отрицательных первых ударов, примерно 6 В/м, что почти в 2 раза больше, чем для отрицательных последующих ударов, примерно 3 В/м. Геометрическое среднее для интервала времени между возвратными ударами составляет 60 мс.

Положительные наземные вспышки

Положительные вспышки обычно содержат единственный возвратный удар (хотя наблюдалось до четырех ударов на вспышку), чьи волновые формы электрического и магнитного поля в масштабе микросекунды подобны характеристикам отрицательных первых возвратных ударов, за исключением начальной полярности. Пример волновой формы электрического поля положительного возвратного удара приводится на рисунке 6.4(c). Небольшие импульсы, видимые до $t = 0$ на рисунке 6.4(c) указывают на процесс ступенчатого лидера. В отличие от отрицательных первых ударов, эти импульсы обнаруживаются примерно только в одной трети волновых форм поля. Средний начальный пик электрического поля, нормализованный к 100 км для положительных первых ударов, примерно в два раза больше, чем для отрицательных первых ударов. Положительные удары в землю могут инициироваться подобным же образом, как инициируются отрицательные вспышки молнии (см. выше), или они могут быть побочными продуктами протяженных облачных разрядов.

Облачные вспышки

Структура обычного импульса, который наблюдается в происходящих естественным образом разрядах в облаках, включает начальную последовательность (или последовательности) импульсов относительно большой амплитуды, разделенных промежутком в несколько сотен микросекунд и происходящих в течение первых нескольких, до десятков миллисекунд, за которыми следует ряд вспышек регулярных импульсов значительно меньшей амплитуды. Импульсы во вспышке имеют интервал нескольких микросекунд, при этом каждая вспышка длится в течение нескольких сотен микросекунд. Волновые формы отдельных импульсов, характерные для начального пробоя во вспышках в облаке, представлены на рисунке 6.3(b). Начальная полярность этих импульсов имеет тенденцию к противоположной полярности первоначальных импульсов пробоя в отрицательных вспышках, идущих к земле. Имеются также импульсы микросекундного масштаба с амплитудами значительно ниже по сравнению с амплитудами начальных импульсов пробоя, которые рассредоточены, в отличие от кластеризации в пакетах, по всей вспышке. Некоторые из этих небольших и часто нерегулярных импульсов связаны со ступенчатыми изменениями K (характерные признаки поля K-процессов). Изменения K обычно происходят на последней стадии облачной вспышки и отделены многими десятками миллисекунд.

Компактные внутриоблачные разряды

На рисунке 6.3(c) приведен пример характерного признака электрического поля компактных внутриоблачных разрядов (также называемых короткими биполярными событиями). Эти импульсы имеют пики и пиковые временные производные, сравнимые с пиками возвратных ударов в наземных вспышках.

6.2.3 Глоссарий терминов

Правило знаков атмосферного электричества: правило знаков электрического поля, в соответствии с которым направленный вниз вектор поля определяется как положительный.

Биполярная молния: разряды молнии, последовательно передающие как положительные, так и отрицательные заряды к земле во время одной и той же вспышки.

Облачная вспышка: вспышка, которая не соприкасается с землей.

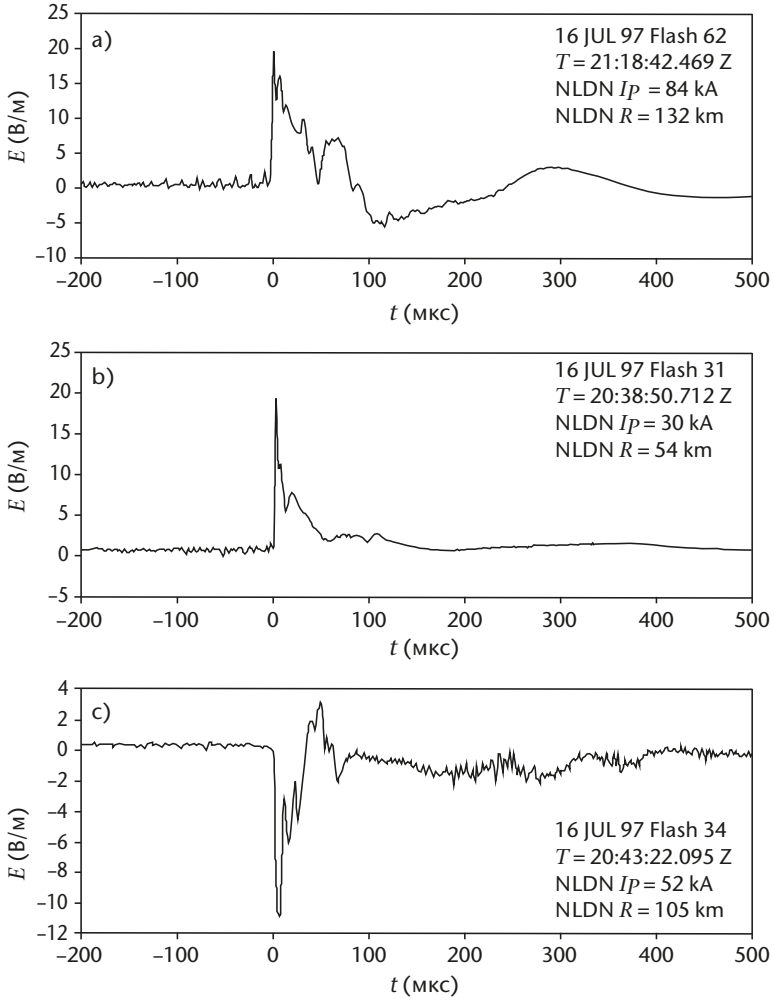


Рисунок 6.4. Примеры волновых форм импульсов электрического поля для a) отрицательного первого удара, b) отрицательного последующего удара и c) положительного первого удара. Все три явления были обнаружены Национальной сетью обнаружения молний США (NLDN); и их сообщенные характеристики (оцениваемый максимальный ток I_p, и расстояние R) представлены на графиках. См. также надпись к рисунку 6.3. (Заимствовано из работы Rakov, 1999).

Вспышка от облака к земле (CG), наземная вспышка: вспышка, которая содержит, по меньшей мере, один возвратный удар.

Облачная молния: разряды молнии, которые не вовлекают поверхность земли.

Компактный внутриоблачный разряд (CID): разряд молнии небольшого пространственного масштаба (обычно сотни метров) в облаке, который считается наиболее интенсивным природным генератором излучения ВЧ/ОВЧ (3–300 МГц) на Земле.

Непрерывный ток: устойчивый ток, немедленно следующий за некоторыми импульсами тока возвратного удара.

Разряд: часто используется, как синоним вспышки.

Молния, идущая вниз от облака к земле*:* разряды молнии в землю, инициированные нисходящими лидерами из облака.

Событие: конкретная часть вспышки, обычно любой изолированный сигнал, измеренный во время вспышки.

Вспышка, вспышка молнии: процесс полной нейтрализации, который включает много событий (лидеры, удары, процессы K, непрерывные токи и т. д.) в пределах временного интервала около 1 с; относится к облачной вспышке или наземной вспышке.

Плотность наземной вспышки: количество наземных вспышек на единицу площади за единицу времени (обычно на квадратный километр в год).

Процессы K: переходные процессы, происходящие в ранее созданном канале молнии, который не связан (или утратил свою связь) с землей. Они могут происходить, как в наземных вспышках, так и во внутриоблачных.

Лидер: процесс развития молнии, который создает токопроводящий путь между областью источника заряда облака и землей (в случае нисходящей молнии по направлению от облака к земле) и распределяет заряд из области источника в облаке вдоль этого пути.

Молния или вспышка молнии: она может определяться как кратковременный высокотоковый (обычно десятки килоампер) электрический разряд в атмосфере, длина которого чаще всего измеряется в километрах.

Компоненты-M: переходные процессы, происходящие в заземленном канале молнии при прохождении непрерывного тока.

Отрицательная молния: разряды молнии, которые эффективно понижают отрицательный заряд по направлению от облака к земле.

Положительная молния: разряды молнии, которые эффективно понижают положительный заряд по направлению от облака к земле.

Возвратный удар, удар по направлению от облака к земле, удар: процесс развития молнии, который проходит по ранее созданному каналу лидера по направлению от земли к области источника заряда облака и нейтрализует заряд лидера.

Спровоцированные ракетами (триггерные) молнии: разряды молнии, искусственно вызванные из природных грозовых облаков, используя метод запуска ракеты с тросом.

Сферик или атмосферик: электромагнитный сигнал от разряда молнии, который перемещается на большие расстояния.

Удар: см. возвратный удар.

Грозовой очаг: конвективная ячейка, обычно несколько километров в диаметре, характеризующаяся относительно мощными восходящими потоками (>10 м/с). Срок жизни обычного очага составляет порядка 1 ч.

Восходящая молния от облака к земле: разряды молнии в землю, инициированные восходящими лидерами от заземленных объектов.

6.3 ПРИНЦИПЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ МЕСТОПОЛОЖЕНИЯ МОЛНИИ

6.3.1 Общие сведения

Для трех наиболее общих электромагнитных радиочастотных методов определения местоположения с многих станций — магнитная система радиопеленгации (MDF), время поступления сигнала (TOA) и интерферометрия — вид полученной информации о местоположении зависит от частоты f (или от длины волны $\lambda = c/f$, где c — скорость света) обнаруженного излучения (Rakov и Uman, 2003). Для обнаруженных сигналов, длины волн которых очень короткие по сравнению с длиной излучающего канала молнии, например, диапазона очень высокой частоты (ОВЧ), где f = 30—300 МГц и λ = 10—1 м, весь канал молнии может быть в принципе изображен в двух- или трехмерном измерении. Для длин волн, которые превышают или составляют значительную часть длины канала молнии, например, диапазон очень низкой частоты (ОНЧ), где f = 3—30 кГц и λ = 100—10 км и диапазон низкой частоты (НЧ), где f = 30—300 кГц и λ = 10—1 км, в целом можно с пользой определить только одно или несколько местоположений для каждого канала молнии. В случае определения единичного местоположения возвратного удара от облака к земле, оно обычно интерпретируется с некоторой аппроксимацией до точки удара в землю. Наилучшие электромагнитные методы отображения канала при ОВЧ и наилучшие методы локализации точки удара в землю при ОНЧ и НЧ имеют точность (фактически ошибки или неопределенности локализации) порядка сотен метров. С другой стороны шкалы точности системы ОНЧ большого радиуса действия, которые работают в узком диапазоне частот, обычно где-то между 5 и 10 кГц и определяют местоположение молнии на расстояниях до тысяч километров, имеют неопределенности в локализации отдельных вспышек молнии порядка 10 км и более. Эти последние системы часто называют грозовыми локаторами.

Для тех электромагнитных методов определения местоположения, включающих измерение амплитуд изменения поля на многих станциях, ширина полосы измерений не связана напрямую с точностью локализации. Достаточно иметь систему измерений, которая может точно воспроизвести изменения поля процесса, представляющего интерес. Таким образом, например, с помощью измерения изменения электростатического поля в диапазоне частот от доли герца до нескольких герц на многих станциях, можно определить «среднее» местоположение источника заряда полной вспышки от облака к земле; а с помощью узкополосной системы разрешить изменения электростатического поля в миллисекундном масштабе времени, и тем самым определить местоположение источников заряда для отдельных импульсов во вспышке, а также для непрерывного тока. Локализация молнии, используя пики электрического или магнитного поля возвратного удара, подобно локализации с помощью изменения электростатического поля, требует только, чтобы система точно воспроизводила эти пики. Методы локализации молнии с амплитудой электромагнитного поля в настоящей главе не рассматриваются.

В точных системах определения местоположения молний, отображают ли они весь молниевый канал или определяют только точки удара в поверхность земли или центры заряда в облачности, обязательно используются многочисленные датчики. Датчики одной наземной станции, такие как счетчики вспышек молнии, фиксируют явление молнии, но не могут быть использованы для его локализации на основе отдельной вспышки. В их

конструкциях это не предусмотрено из-за широкого диапазона амплитуд и форм волн, связанных с отдельными явлениями. Тем не менее, с помощью датчиков одной станции можно распределить группы вспышек по примерным радиусам дальности, в случае если были собраны и осреднены данные за некоторый период времени. Существует много относительно простых и коммерчески доступных устройств единичной станции, которые предназначены для определения местоположения молнии. Большинство функционируют как радиоприемники АМ-сигналов с амплитудной модуляцией на постоянной частоте, которая используется для замера расстояния до отдельных вспышек молнии методом, который по своей природе характеризуется большими ошибками. Кроме полевых амплитудных детекторов, некоторые коммерческие устройства единичной станции используют оптические детекторы, магнитные радиопеленгаторы и/или характеристики волновых форм молнии для оценки расстояния возвратных ударов от облака к земле до датчика.

Оптические датчики единичной станции на орбитальных спутниках Земли обнаруживают свет молнии, рассеянный скоплением облачности, порождающей молнию, и поэтому не могут выполнить локализацию лучше, чем около 10 км, что составляет примерно диаметр небольшого облака. Кроме того, спутниковые датчики не могут различать облачные и наземные разряды. Запланировано, что серия следующего поколения геостационарных оперативных спутников для исследования окружающей среды (GOES-R) будет иметь на борту геостационарный картограф молний (ГКМ), для проведения постоянного мониторинга молний с широкой зоной обзора. Запуск первого спутника серии GOES-R запланирован на 2015 г.

В нижеследующих подразделах обсуждается, как отдельные датчики, измеряющие разные свойства электромагнитного излучения молнии, были объединены в системы для обеспечения практического определения местоположения молнии. Более подробная информация представлена в обзорах Rakov и Uman (2003) и Cummis и Murphy (2009) и в справочной литературе.

6.3.2 **Пеленгация магнитного поля**

Для получения направления к источнику могут быть использованы две вертикальные и прямоугольные рамки с плоскостями, ориентированными в направлении север-юг и восток-запад, каждая измеряющая магнитное поле с данного вертикального излучателя. Это так, потому что выходное напряжение данной рамки по закону Фарадея пропорционально косинусу угла между вектором магнитного поля и нормальным вектором к плоскости рамки. Для вертикального излучателя линии магнитного поля являются коаксиальными кругами в отношении источника. Таким образом, например, рамка, плоскость которой ориентирована в направлении север-юг получает максимальный сигнал, если источник расположен к северу или югу от антенны, тогда как прямоугольная рамка восток-запад не получает сигнала. В общем, соотношение двух сигналов от рамок пропорционально тангенсу угла между севером и источником, если смотреть со стороны антенны.

Пеленгаторы магнитного поля с пересекающимися рамками (DFs), используемые для обнаружения молнии можно разделить на два общих типа: узкополосные (настроенные) пеленгаторы и стробируемые широкополосные пеленгаторы. В обоих случаях метод пеленгации включает неявное предположение, что излучаемое электрическое поле имеет вертикальную ориентацию и связанное с ним магнитное поле ориентировано горизонтально и перпендикулярно к пути распространения.

Узкополосные пеленгаторы использовались для обнаружения отдаленных молний с 1920-х гг. Они обычно работают в узкой полосе частот с центральной частотой в диапазоне от 5 до 10 кГц, где ослабление в волноотводе земля-ионосфера относительно низкое, а энергия сигнала молнии относительно высокая. До разработки метеорологических радиолокаторов в 1940-х гг. системы локализации молний были основным средством идентификации и картирования гроз в среднем и длинном диапазонах.

Основной недостаток узкополосных пеленгаторов состоит в том, что для молний в диапазонах менее, чем примерно 200 км, эти пеленгаторы имеют присущие им азимутальные ошибки, называемые ошибками поляризации порядка 10°. Эти ошибки вызываются обнаружением компонентов магнитного поля не из вертикальных участков канала, линии магнитного поля которых образуют круги в плоскости, перпендикулярной не вертикальному участку канала, и также ионосферными отражениями, пространственными волнами, магнитные поля которых подобным образом неправильно ориентированы для пеленгации точки попадания на поверхности земли.

Для решения проблемы больших ошибок определения поляризации в узких диапазонах, присущих работе узкополосных пеленгаторов, в начале 1970-х гг. были разработаны стробируемые широкополосные пеленгаторы. Пеленгация осуществляется отбором (стробированием) компонентов север-юг и восток-запад начального пика магнитного поля возвратного удара, причем этот пик излучается от дна молниевого канала на расстоянии около ста метров в первые микросекунды возвратного удара. Поскольку дно канала разряда стремится к прямому и вертикальному направлению, а магнитное поле в основном горизонтальное. Кроме того, стробируемый пеленгатор не регистрирует ионосферные отражения, так как эти отражения прибывают намного позже после отбора начального пика магнитного поля. Рабочая ширина полосы стробируемого широкополосного пеленгатора обычно составляет от нескольких килогерц до примерно 500 кГц. Интересно, что, хотя необходима высокочастотная характеристика, составляющая многие мегагерцы для обеспечения точного воспроизведения пика поля приходящего излучения, особенно, если распространение осуществляется над соленой водой, применяемым на практике пеленгаторам достаточна только высокочастотная характеристика в несколько сотен килогерц для получения азимутальной ошибки, примерно 1°. Это обусловлено тем, что отношение пиковых сигналов в двух рамках не чувствительно к одинаковому искажению, вызываемому идентичным соответствием электронных цепей двух рамок. Подобным же образом, при правильной калибровке и поправке на эффекты распространения, используемым на практике пеленгаторам необходима только высокочастотная характеристика в несколько сотен килогерц для получения ошибки оценки максимального тока в 15—20 %. Таким образом, стробируемый широкополосный пеленгатор может работать на частотах ниже полосы АМ-сигналов и ниже частот некоторых самолетных навигационных передатчиков, что может, в противном случае, вызвать нежелательные направленные помехи.

Стробируемые широкополосные пеленгаторы, а также и узкополосные пеленгаторы подвержены ошибкам, связанным с рельефом местности. Ошибки, связанные с рельефом местности, являются систематической функцией направления, но в целом, они не зависят от времени. Эти ошибки вызываются присутствием нежелательных магнитных полей вследствие неровности пересеченной местности, присутствия рядом с ними электропроводящих объектов, таких как подземные и воздушные силовые линии и конструкции, которые начинают излучать ток при возбуждении полями приходящих молний. Для полного исключения ошибок, связанных с рельефом местности, район, окружающий пеленгатор, должен быть плоским и однородным без существенных электропроводящих объектов, включая заглубленные объекты, находящиеся рядом. Эти требования обычно трудновыполнимы, поэтому гораздо легче измерить ошибки пеленгатора, связанные с рельефом, и компенсировать их, чем искать место, характеризующееся приемлемыми небольшими ошибками, связанными с рельефом. По сообщениям (используя независимые оптические данные), после внесения поправок, остаточные ошибки обычно составляют менее 2°—3°.

Так как изначально неизвестно, уменьшит ли удар в землю положительный или отрицательный заряд, имеется погрешность в 180° азимута удара из измерения только ортогональных магнитных полей. Эта погрешность разрешается во всех системах широкополосных пеленгаторов посредством измерения соответственного электрического поля, полярность которого указывает на знак заряда, переданного в землю.

6.3.3 Метод регистрации времени поступления сигнала

Единичный датчик регистрации времени поступления сигналов дает срок наблюдения, в который некоторая часть сигнала электромагнитного поля поступает на антенну определения направления. Системы регистрации времени поступления сигнала, использующиеся для определения координат молнии можно разделить на три общих типа: (i) очень короткая базисная линия (от десятков до сотен метров), (ii) короткая базисная линия (десятки километров), и (iii) длинная базисная линия (от сотен до тысяч километров). Системы с короткой и очень короткой базисной линией обычно работают в диапазоне ОВЧ, т. е. на частотах от 30 до примерно 300 МГц, тогда как системы с длинной базисной линией обычно работают на частотах ОНЧ и НЧ от 3 до 300 кГц. В целом считается, что излучение ОВЧ связано с процессами пробоя в воздухе, тогда как сигналы ОНЧ вызываются электрическим током в проведенных молниевых каналах. Системы с короткой базисной линией обычно предназначаются для представления изображений молниевых каналов и для исследования пространственного и временного развития разрядов. Системы с длинной базисной линией обычно используются для определения мест удара в землю и явлений молнии в облачности преимущественно в вертикальных каналах, или среднего местоположения вспышки.

Система с очень короткой базисной линией (от десятков до сотен метров) состоит из двух или более ОВЧ приемных устройств регистрации времени поступления сигнала (ВП), расстояние между которыми таково, что временная разница между временем поступления отдельного ОВЧ-импульса от молнии на этих приемниках небольшая по сравнению с временем между импульсами, длительность которых составляет от нескольких микросекунд до сотен микросекунд. Местоположение всех точек источника, способного вызвать данную временную разницу между двумя приемниками, в целом является гиперболоидом, но если промежуток между приемниками очень небольшой, то гиперболоид вырождается в этом пределе в плоскость, на которой обнаруживается источник. Две временные разницы от трех очень близко расположенных приемных устройств дают две плоскости, пересечение которых дает направление к источнику, т. е. его азимут и высоту. Для обнаружения местоположения источника по сравнению с определением направления к источнику, необходимо использовать два или более наборов близко расположенных приемных устройств, при этом наборы разделяются десятками километров и более. Каждый набор приемных устройств является по существу пеленгатором ВП, а пересечение двух и более векторов дает местоположение.

Системы ВП с короткой базисной линией обычно представляют сети от 5 до 15 станций, которые используют информацию о времени поступления сигнала для трехмерного (3D) картирования каналов молнии. Портативный вариант такой системы был разработан исследователями Института горного дела и технологии штата Нью-Мексико. Эта система в настоящее время называется системой картирования по грозопоражаемости (LMA) и стала недавно основным инструментом, как для исследований молний, так и для оперативного применения. Системы ВП ОВЧ с короткой базисной линией предоставляют электромагнитные снимки развивающихся каналов любого типа вспышки молнии.

Первые системы ВП с длинной базисной линией (от сотен до тысяч километров) работали на частотах ОНЧ/НЧ. Например, одна из них использовала пару приемных станций в Массачусетсе с шириной полосы 4—45 кГц, разделенных расстоянием более 100 км (вся сеть состояла из четырех станций), для сравнения разности времени получения сигналов на каждой станции, и таким образом, для определения направлений случившегося в западной Европе разряда молнии. Система из двух станций была, по сути, пеленгатором, подобным системам с очень короткой базисной линией, описанным выше, но работающих на более коротких частотах и с более длинной базисной линией. Полученные в результате направления имели хорошее соответствие с координатами, полученными сетью станций узкополосных пеленгаторов Метеобюро СК, которая была оперативной в это время. Для объяснения распространения по поверхности Земли использовалась сферическая геометрия при определении местоположения точек для постоянного измерения разности времени поступления сигнала между приемными устройствами.

Другая система ВП с длинной базисной линией, называемая разностно-дальномерной системой определения местоположения молнии (LPATS), была разработана в 1980-х гг. В системе LPATS, работающей на НЧ/ОНЧ частотах, использовались штыревые антенны электрического поля на станциях, разнесенных на 200—400 км для определения местоположения посредством измерения разности времени поступления сигнала на станциях. В используемой полосе частот волновые формы удара были, в общем, самыми большими и поэтому наиболее легко определяемыми. В принципе, для однозначного определения местоположения необходимы ответные реакции четырех станций (три разницы во времени), так как гиперболы на поверхности Земли только от двух разностей во времени могут, в общем, пересекаться в двух разных точках. Для молнии, направленной от облака к земле вблизи или в пределах сети, имеется часто только одно решение, так что в этом случае достаточным будет решение в форме трех станций.

6.3.4 **Интерферометрия**

В дополнение к излучающим изолированным импульсам, молния также вызывает шумоподобные всплески электромагнитного излучения, длительностью от десятков до сотен микросекунд. Местоположение этих всплесков трудно определить, используя методы ВП из-за трудности идентификации отдельных импульсов. В случае интерферометрии, идентификация отдельных импульсов не требуется, так как интерферометр измеряет фазовую разницу между узкополосным сигналами, соответствующими этим шумоподобным всплескам, получаемым двумя или более близкорасположенными датчиками. Самый простой интерферометр молнии состоит из двух антенн на расстоянии нескольких метров, при этом каждая антенна соединена через узкополосный фильтр с приемником. Антенны, фильтры и приемники идентичны. Выходные сигналы двух приемников посылаются в фазовый детектор, который создает напряжение, пропорциональное фазовой разнице между двумя квази-синусоидальными сигналами. Фазовая разница определяет, как и разность во времени в системах ВП с очень короткой базисной линией, плоскость, на которой расположен источник, т. е. однонаправленный угол к источнику ОВЧ. Для определения азимута и высоты источника необходимы, как минимум, три приемных антенны с двумя прямоугольными ортогональными базисными линиями. Для определения источника в трех измерениях требуются два или более синхронизированных интерферометра, эффективно действующих как пеленгатор и разделенных расстоянием порядка 10 км и более. Принципы интерферометрического определения местоположения молнии описаны подробно в работе Lojou et al. (2008).

Большинство интерферометрических систем работают в очень узких частотных полосах (от нескольких сотен килогерц до нескольких мегагерц в полосах ОВЧ/УВЧ), поскольку это позволяет системе иметь высокую чувствительность в конкретной «спокойной» полосе работы. Однако это также делает эффективность системы подверженной локальной широкополосной интерференции и может не обеспечить самое высокое по возможности отношение сигнала-шума, а также накладывает конкретное ограничение на пространство между элементами расположения антенны во избежание погрешности во времени (фазе) поступления сигнала. В последнее время появилась тенденция использования широкополосной интерферометрии (Shao et al., 1966; Mardiana и Kawasaki, 2000; Morimoto et al., 2004). Эта тенденция сделала возможным приход допустимых широкополосных радиочастот и электронных средств обработки цифрового сигнала.

6.4 ХАРАКТЕРИСТИКИ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ

В целом, ожидается, что современная система ОНЧ-СЧ определения местоположения молнии регистрирует (в отдельных категориях) и определяет по конкретному району все удары от облака к земле любой полярности, а также облачные разряды. Также предполагается измерение интенсивности каждого разряда, обычно в форме максимального тока, полученного из измеренных электрических или магнитных полей. Соответственно можно оценить эффективность работы системы, используя следующие характеристики:

a) эффективность обнаружения вспышек от облака к земле;

b) эффективность обнаружения удара от облака к земле;

c) эффективность обнаружения облачной вспышки;

d) процент неправильно классифицированных событий (в особенности, облачные разряды, отнесенные к категории положительных или отрицательных ударов от облака к земле CG);

e) точность определения местоположения (или ошибка локализации);

f) ошибка оценки максимального тока.

В целом, эффективность обнаружения представляет дробную часть (обычно выражается в процентах) всех произошедших событий, обнаруженных системой, и идеально равна 100 %. Несмотря на то, что эффективность обнаружение удара от облака к земле (CG) можно легко определить (так как эти удары связаны с уникальной особенностью, которую можно наблюдать — светящийся канал до земли — и общее количество имевших место событий можно определить), концепция эффективности обнаружения облачной вспышки довольно неопределенна. Фактически, имеется много процессов облачных разрядов (некоторые из них плохо понятны), происходящих в различных пространственных и временных масштабах и явно непоказывающих каких-либо уникальных и легко наблюдаемых особенностей. В результате, общее количество произошедших событий в целом неизвестно. На практике, если принять все явления разрядов в облаке как «отсчеты», то количество обнаруженных разрядов в облаке может в основном определяться локальным уровнем помех и ограничением скорости передачи сигнала системы.

При определении распределения плотности наземных вспышек (CG) по данным локационных систем регистрации наземных разрядов молний для оценки их эффективности используется, вероятно, наиболее важный эксплуатационный показатель — вспышка, которая считается зарегистрированной, если, по меньшей мере, обнаружена хотя бы одна разрядная вспышка. Подобный подход может быть применен и для облачных вспышек, хотя необходимо определить, является ли единичный «отсчет» отдельной вспышкой, и как распределить множество отсчетов по отдельным вспышкам.

Погрешность определения местоположения оценивается расстоянием между реальным местоположением и сообщенным системой. В общем, погрешность определения местонахождения включает случайный и систематический компоненты. Второй компонент в некоторых случаях можно принимать во внимание (например ошибки, связанные с рельефом местности в системах МП).

Ошибка оценки максимального тока — разница между величиной фактического максимума тока и величиной, сообщенной системой, обычно выраженная в процентах от фактического максимума тока. Максимальные токи оцениваются системами обнаружения молнии, используя либо эмпирическое или основанное на модели уравнение преобразования поля в ток. Имеются обоснованные уравнения преобразования поля в ток для ударов от облака к земле (CG), но не для процессов облачных разрядов.

Для оценки рабочих характеристик, перечисленных выше, необходимы независимые данные (наземный контроль данных). Например, разряды, происходящие в точно известном месте, оборудованном устройством для измерения тока (высокая башня или средство, провоцирующее молнию) могут использоваться для оценки точности определения местонахождения и ошибки оценки максимального тока. Эффективность обнаружения и процент неправильно классифицированных явлений обычно оценивается на основе временного разрешения оптических данных. Иногда для оценки ошибок в определении местонахождения используется связанный с молнией ущерб, нанесенный различным объектам (здания, деревья и т. д.), хотя воздействие именно молнии при этом подходе не является однозначным вследствие недостаточной точности определения промежутка времени (обычно хуже, чем в пределах минуты). Менее определенные оценки рабочих характеристик системы обнаружения молнии возможны посредством моделирования или сравнения с более точной системой, работающей в том же районе. По состоянию на сегодняшний день выполнялось ограниченное количество исследований с привязкой, в особенности для первых ударов в отрицательных вспышках от облака к земле (CG), в положительных вспышках от облака к земле (CG) и в облачных разрядах.

В некоторых применениях (например, отслеживание грозовых очагов) возможность отслеживания может быть более важной, чем обнаружение отдельных разрядов молнии. Функционирование систем для таких применений часто проверяется путем сравнения с радиолокационными или инфракрасными спутниковыми изображениями при хорошем соответствии обнаруженной молнии и районами с высокой радиолокационной отражательной способностью или низких температур верхней границы облачности, причем само сравнение рассматривается в качестве критерия обоснованности системы. Для раннего предупреждения способность обнаружения первой молнии является, вероятно, наиболее важной эксплуатационной характеристикой.

Неясно, как определять эксплуатационные характеристики для систем формирования ОВЧ-изображения канала молнии. Безусловно, они не могут обнаруживать все источники ОВЧ в облачности. Ограничения чувствительности не позволяют этим системам регулярно обнаруживать и картировать положительных лидеров. Таким образом, получающиеся в результате снимки ОВЧ неизбежно являются частичными. Далее обычно необходима вспомогательная информация о возвратных импульсах для проведения надежного различия между облачными и наземными вспышками, так как излучение ОВЧ непосредственно связанное с последующими возвратными ударами, ограничено, и его трудно обнаружить. Также оценки максимального тока невозможны. Тем не менее, системы формирования ОВЧ изображения канала молнии представляют очень ценный инструмент для изучения детальной морфологии и эволюции молнии, в особенности внутри облака, и часто используются в тестировании других типов систем локализации молний.

6.5 ПРИМЕРЫ СОВРЕМЕННЫХ СИСТЕМ ОПРЕДЕЛЕНИЯ МЕСТОПОЛОЖЕНИЯ МОЛНИЙ

В этом разделе в качестве репрезентативных примеров современных систем определения местоположений молний вкратце рассматривается система ОВЧ формирования изображения канала молнии (LMA); три системы ОНЧ/НЧ (NLDN, LINET и USPLN); система КВЧ/ОНЧ/СЧ/ВЧ (ENTLN) и три системы ОНЧ (WWLLN, GLD360 и ATDnet). Рассмотренные здесь системы были выбраны, так как они являются хорошими примерами каждого типа систем, но их включение не должно подразумевать, что они лучше других систем или что они рекомендуются для использования по сравнению с другими системами, не обсуждаемыми здесь. Информацию об этих и других системах можно найти в работах Rakov и Uman (2003), Cummis и Murphy (2009), Betz et al. (2009) и в представленной справочной литературе. Существует более 60 сетей определения местоположения молний по всему миру, работающих в диапазоне ОНЧ/НЧ.

Кроме общей характеристики каждой системы, в имеющейся информации об ее рабочих характеристиках особое внимание уделяется тем характеристикам, которые основаны

на официальных исследованиях контроля качества, опубликованных в рецензируемой литературе. В целом, количество такой информации о старых системах больше, чем о более современных системах.

6.5.1 Система картирования грозопоражаемости, 60—66 МГц

Сети системы картирования грозопоражаемости обычно состоят из 10—15 станций, расположенных с интервалом по 15-20 км и соединенных каналами беспроводной связи с центральным пунктом (Thomas et al., 2004). Каждая станция принимает сигналы от молнии (как от облачных вспышек, так и от наземных (CG)) в неиспользуемом местном телевизионном канале (обычно TV-канал 3, 60—66 МГц). Обычное временное разрешение (фиксированный временной промежуток) составляет 80—100 мкс. Больший временной промежуток, обычно 400 мкс, используется для обработки и отображения в реальном времени.

Точность определения местоположения сети LMA в Нью-Мексико исследовалась экспериментально с использованием шара-зонда с передатчиком ОВЧ, инверсионных следов воздушного судна и наблюдений за отдаленными бурями (Thomas et al., 2004). Также были разработаны простые геометрические модели для оценки неопределенности местоположения источников, как над сетью, так и вне сети. Было обнаружено, что результаты моделей являются хорошим способом оценки наблюдавшихся ошибок. Источники над сетью на высотах в диапазоне 6—12 км были обнаружены со среднеквадратической неопределенностью 6—12 м по горизонтали и 20—30 м по вертикали, что приводило к ошибке 3D менее чем 100 м для большинства обнаруженных источников. За пределами сети погрешности в определении местоположения возрастают с расстоянием.

6.5.2 Национальная сеть обнаружения молний США, 400 Гц — 400 кГц

Национальная сеть обнаружения молний состоит из более чем 100 станций, расположенных обычно с интервалом 300—350 км и охватывает смежные районы США (см. Cummins и Murphy, 2009). Применяется комбинация методов обнаружения времени поступления сигнала (ВП) и магнитного пеленгования (МП). Сообщается о разрядах молний в облаке и от облака к земле. Классификация выполнялась с помощью критериев волновой формы поля. Максимальные токи оцениваются из измеренных полей, используя эмпирические формулы на основе данных о молниях, спровоцированных ракетами. При этом выполняется корректировка пиков поля для объяснения эффектов распространения (более сильная, чем обратно пропорциональная зависимость от расстояния). Дальнейшая информация о развитии сети NLDN, соответствующей методике и применении данных NLDN изложена в работах Rakov и Uman (2003, глава 17), Orville (2008), Cummins и Murphy (2009) в соответствующих приведенных здесь справочных материалах.

Удары от облака к земле и эффективность определения местоположения вспышки исследовались с использованием видеокамер в Южной Аризоне, Оклахоме и Техасе (Biagi et al., 2007). Согласно оценкам, эффективность обнаружения ударов в Южной Аризоне составила 76 % (N = 3 620), а в Техасе/Оклахома она была 85 % (N = 885). Соответствующая эффективность обнаружения вспышки составила 93 % (N = 1 097) и 92 % (N = 367). Кроме того, в данном исследовании проводилась классификация явлений молнии в виде облачных или наземных разрядов, а также в подобном же исследовании (но дополнительно с использованием независимых измерений формы волны электрического поля) в районе Колорадо/Канзас/Небраска (Fleenor et al., 2009).

Эффективность обнаружения удара от облака в землю и вспышки также исследовалась, используя в качестве контроля данные о молнии, спровоцированной ракетой, в районе Флориды (Jerauld et al., 2005; Nag et al., 2011). По результатам самого последнего (2004—2009 гг.) исследования эффективность обнаружения удара от облака в землю и вспышки составила соответственно 76 % (N = 139) и 92 % (N = 37). Разряды во вспышках, спровоцированных ракетами, подобны регулярным последующим импульсам (следующих

по ранее сформированным каналам) в природной молнии, и поэтому 76 % эффективности обнаружения разряда применимо только к регулярным отрицательным последующим импульсам в природной молнии. Предполагается, что эффективность обнаружения вспышки, полученная при использовании молнии, спровоцированной ракетой, является недооценкой истинной величины для природных отрицательных вспышек молнии, так как первые импульсы обычно имеют большие максимальные токи, чем последующие.

Nag и Rakov (2012) исследовали волновые формы электрического поля, вызванного 45 положительными вспышками, которые содержали 53 импульса. Из этих 53 импульсов сеть NLDN определила местоположение 51 (96 %), из которых 48 (91 %) были правильно идентифицированы, а 3 возвратных разряда (импульса) были неправильно классифицированы, как облачные разряды.

В соответствии с работой Cummins и Murphy (2009) эффективность обнаружения облачной вспышки сетью NLDN (вспышка считалась обнаруженной, если был обнаружен, по меньшей мере, один импульс ОНЧ/НЧ, вызванный вспышкой) находится в диапазоне 10—20 % в зависимости от локальных различий в расстояниях между станциями. Nag et al. (2010) исследовали широкополосные электрические поля, производные электрических и магнитных полей и узкополосные ОВЧ (36 МГц) всплески излучения, вызванные 157 компактными внутриоблачными разрядами. Сетью NLDN было определено местоположение 150 (96 %) этих CID и правильно идентифицировано 149 (95 %) из них, как облачные разряды.

По оценкам Nag et al. (2011), сравнившим данные о местонахождениях развития молний по сообщениям NLDN с точно известными местами нахождения пусковых ракетных установок, которые были приняты в качестве достоверных наземных точек поражения молнией, медианная абсолютная погрешность местонахождения составляет 308 м, при этом самая большая погрешность равна 4,2 км (N = 105). Ошибки определения максимального тока оценивались по результатам сравнения максимальных токов из сообщений NLDN с непосредственно измеренными токами у основания канала триггерной молнии. Медианная абсолютная ошибка величины тока составила 13 % (N = 96). Ошибки величины тока никогда не превышали 129 % по абсолютной величине (60 %, при условии исключения двух выбросов). Эти результаты применимы только к регулярным отрицательным последующим ударам в молнии в природных условиях.

6.5.3 Сеть определения местоположения молнии, 1—200 кГц

Основным методом определения местонахождения, используемым в сети определения местоположения молнии (LINET), является ВП, хотя датчики магнитного поля предоставляют информацию об угле поступления сигнала, которая используется для проверки достоверности данных компьютерного расчета местоположения. Информация о высоте, определяемая по времени поступления сигнала на ближайший передающий датчик, используется как дополнение для классификации процессов в облачных вспышках и процессов, происходящих внутри облака (например, предварительный пробой) при наземных вспышках (CG), с одной стороны, и в наземных ударах (CG) с другой стороны (предполагается, что расположение вблизи земли связано с ударами по направлению от облака к земле, а на высоте со всеми другими процессами). Установлено, что надежное разделение возвратных ударов и импульсов в облаке может быть достигнуто, пока ближайший датчик находится в радиусе 100 км от разряда молнии, что требует базисных линий 200—250 км или меньше. Особое внимание уделяется обнаружению сигналов низкой амплитуды, как для внутриоблачных молний, так и по направлению от облака к земле. Максимальные токи для процессов внутриоблачных вспышек и для процессов внутри облака (например предварительный пробой) в наземных вспышках (CG), и наземные удары (CG) оцениваются, предполагая прямую пропорциональность между пиковым током и пиковым магнитным (или электрическим) полем и обратную пропорциональность для расстояния до пика поля. Больше информации о системе LINET можно найти в работе Betz et al. (2009) и цитируемой справочной литературе.

Подобно системам, формирующим изображение в канале ОВЧ, неясно, как определить эффективность обнаружения для сети LINET, которая в известной мере также отображает эволюцию каналов молнии, хотя и со значительно меньшим числом обнаруженных источников на вспышку. Кроме того, процессы в облаке (например предварительный пробой) для вспышек при наземных разрядах определяются по категории чисто облачных молний, которые явно не соответствуют традиционным определениям облачной вспышки, как разряда молнии без удара в землю (CG), и вспышек при наземном разряде, обусловленных как процессами внутри облака, так и влиянием ударов по направлению от облака к земле (CG). Это вероятно не играет никакой роли для таких применений, как слежение за очагом и распознование явлений суровой погоды.

Считается, что случайная ошибка определения местонахождения составляет примерно 150 м, но наличие систематических ошибок подтверждается. Betz et al. (2009) продемонстрировали пример с 58 обнаруженными ударами, очевидно завершившимися на инструментальной башне со средней ошибкой определения местонахождения менее, чем 100 м, после компенсации систематических ошибок, что привело к отклонению местоположения на 200 м.

Погрешности оценки максимальных токов для сети LINET неизвестны (на сегодняшний день сравнений с наземными контрольными данными не проводилось).

6.5.4 Сеть точного обнаружения молний США, 1,*5*—400 кГц

Сеть точного обнаружения молний США (USPLN) использует метод ВП ОНЧ/НЧ и состоит из 100 датчиков электрического поля, охватывающих континентальную часть США и другие районы Северной Америки. Не сообщалось о каких-либо формальных исследованиях по тестированию рабочих характеристик, касающихся этой системы, однако операторы системы утверждают, очевидно, по результатам анализа с использованием моделирования системы, об эффективности обнаружения разрядов 95 % и типовой ошибке определения местонахождения в 250 м на большей части Северной Америки (> 80 % эффективность обнаружения и < 1 км ошибка определения местонахождения для основных районов установки в других регионах мира). Различие между процессами внутри облака и по направлению от облака к земле, по всей видимости, установлено за счет изучения частотного спектра и амплитуды полученных сигналов. Процедура преобразования поля в ток не была формально описана, а также отсутствует какая-либо информация о проверке ее обоснованности.

6.5.5 Мировая сеть грозового оповещения, 1 Гц — 12 МГц

Датчики мировой сети грозового оповещения (ENTLN) работают в диапазоне частот от 1 Гц до 12 МГц (охватывая диапазоны КНЧ, ОНЧ, НЧ, СЧ и ВЧ). Метод ВП использовался этой сетью с более чем 700 датчиками с 2013 г. Регистрируются разряды молний, как внутриоблачные, так и наземные (CG).

Согласно работе Heckman и Liu (2010) полные сигналы волнового электрического поля передаются датчиком в блок обработки данных и используются как для обнаружения молниевых событий, так и для различения внутриоблачных процессов и процессов по направлению от облака к земле. Удары (или отдельные явления в облаке) концентрируются во вспышку, если они в пределах 700 мс и 10 км первого обнаруженного удара (или облачного события). Вспышка, которая содержит, по меньшей мере, один возвратный удар классифицируется как вспышка по направлению от облака к земле, иначе она классифицируется как облачная вспышка. При отслеживании очага и подготовке оповещения о грозе, используются только вспышки (которые с меньшей вероятностью будут пропущены системой, чем удары).

В отношении этой системы не сообщалось о каких-либо формальных исследованиях тестирования рабочих характеристик в рецензированной литературе, однако операторы системы утверждают, что по результатам исследования по тестированию рабочих

характеристик сеть ENTLN достигает эффективности обнаружения облачных вспышек молний 40—50 % на большей части США и до 95 % на Среднем Западе и в восточной части США (Heckman и Liu, 2010). Максимизирование эффективности обнаружения облачных вспышек молнии, по-видимому, является основной целью этой системы. Расширяя диапазон частот обнаружения до спектров СЧ и ВЧ, сеть ENTLN ставит целью обнаруживать и сообщать о более слабых импульсах на больших расстояниях, чем другие системы ОНЧ/НЧ с подобными базисными линиями.

Процедура преобразования поля в ток не была формально описана на сегодняшний день, а также пока еще отсутствует какая-либо информация о тестировании ее обоснованности.

6.5.6 Мировая сеть определения местоположения молний, 6—18 кГц

В Мировой сети определения местоположения молний (WWLLN) используется метод регистрации времени получения группы сигналов (ВПГ) для определения местонахождения ударов молнии. Этот метод основан на том, что сигналы ОНЧ-молнии (сферики), распространяясь в волноводном канале ионосферы Земли, подвергаются дисперсии, которая заключается в том, что более высокочастотные компоненты прибывают раньше, чем низкочастотные компоненты. ВПГ — величина, которая может быть получена из измеренной волновой формы сферика, связана с расстоянием, пройденным сфериком. По состоянию на март 2012 г., в сети WWLLN использовалось 57 датчиков, расположенных на всех континентах, хотя, в соответствии с работой Dowden et al. (2002), глобальный охват может обеспечиваться в принципе лишь 10 датчиками. Расстояние между датчиками составляет порядка тысяч километров. В настоящее время только те молниевые события, которые были зарегистрированы, по меньшей мере, пятью датчиками и которые имеют остаточные явления (неопределенность времени удара) менее или равные 30 мкс, считаются обнаруженными с допустимой точностью.

В последнем исследовании рабочих характеристик сети WWLLN в работе Abarca et al. (2010) использовались данные сети NLDN в качестве контрольных. Было определено, что эффективность обнаружения вспышки по направлению от облака к земле возросла примерно с 3,9 % в 2006-2007 гг. до 10,3 % в 2008-2009 гг., так как количество датчиков увеличилось с 28 в 2006 г. до 38 в 2009 г. Для явлений с максимальными токами 130 кА и выше, по сообщениям NLDN, эффективность обнаружения составляла 35 %. Средняя погрешность локализации оценивалась в 4—5 км.

Взаимодействие сигналов молнии с ионосферой спектрально искажает полученную волновую форму, поэтому вывести максимальное значение тока и даже полярность молнии не так просто. Тем не менее, Hutchins et al. (2012) разработали метод преобразования излучаемой мощности удара в полосе 6—18 кГц в максимальный ток. Погрешности, связанные с таким преобразованием, в настоящее время неизвестны.

6.5.7 Глобальный набор данных по молниям, ОНЧ

Глобальный набор данных по молниям (GLD360), на который также ссылаются как на Глобальную сеть обнаружения молний (GLDN), использует точно не установленное число датчиков ОНЧ, которые, следуя определенной стратегии, расположены по всему миру. Информацию о местоположениях получают, используя одновременно методы ВП и МП вместе с алгоритмом распознавания волновой формы сигнала от молнии. Последний основан на банке канонических волновых форм, соответствующих расстояниям распространения порядка тысяч километров (Said et al., 2010).

Согласно операторам сети, ожидаемая эффективность обнаружения вспышки по направлению от облака к земле (CG) составляет 60—70 %, а медианная ошибка определения местонахождения составляет 5—10 км. Demetriades et al. (2010) выполнили оценку рабочих характеристик GLD360, используя данные сети NLDN в качестве наземных контрольных данных, и обнаружили, что эффективность обнаружения вспышки по направлению от облака к земле составляла от 86 % до 92 %, а медианная ошибка

определения местонахождения была 10,8 км. По результатам подобного исследования, но с использованием Бразильской сети обнаружения молнии, Naccarato et al. (2010) сообщили, что эффективность обнаружения вспышки по направлению от облака к земле составляла 16 %, а средняя ошибка определения местонахождения была 12,5 км. Используя синхронизированные измерения электрического поля и скоростную съемку видеокамерой молнии от облака к земле в качестве привязки, в Бельгии было обнаружено (Poelman et al., 2013), что эффективность обнаружения вспышки и удара по направлению от облака к земле согласно GLD360 составляет соответственно 96 % и 70 % при медианной ошибке определения местонахождения 900 м. Используя данные сети NLDN в качестве привязки, Said et al. (2013) сообщают об эффективности обнаружения вспышки от облака к земле 57 % и медианной ошибке определения местонахождения 2,5 км.

Набор GLD360 также содержит данные о максимальных токах и полярности. Относительно сети NLDN, Said et al. (2013) обнаружили, что арифметическая и геометрическая средняя ошибка магнитуды максимального тока для GLD360 составляет соответственно 21 % и 6 %. По сообщениям GLD360, такая же полярность регистрировалась для 96 % совпадающих ударов, что и в сообщениях NLDN.

6.5.8 Система обнаружения молний, фиксирующая разницу во времени наступления события

Система обнаружения молний, фиксирующая разницу во времени наступления события (ATDnet) обнаружения молний на большом расстоянии (LLS), является самой последней версией ОНЧ LLS МетеоБюро СК, которая работает с 1987 г. Система в настоящее время состоит из 10 датчиков, расположенных по всей Европе, которые вносят вклад в основную сеть, и дополнительных датчиков в Европе и за ее пределами для развития и тестирования. Сеть спроектирована для локализации молний в Европе, но способна обнаруживать молнии в Африке и Южной Америке на регулярной основе. Датчики, на которые ссылаются как на удаленные, обнаруживают волновые формы сигнала (сферика) ОНЧ и передают данные о волновой форме в центральный процессор в МетеоБюро СК, где используется метод корреляции волновой формы для определения разницы во времени поступления волновой формы по сети. Эти данные по разнице времени поступления используются для локализации молнии.

Poelman et al. (2013) обнаружили, что случайная ошибка сети ATDnet определения местоположения составляет порядка 1 км при эффективности обнаружения вспышки от облака к земле 88 %. Фактическая медианная погрешность определения местоположения вспышек по направлению от облака к земле (CG) в Европе, вероятно, порядка 2—5 км, хотя это требует верификации в рецензируемой литературе. Сеть ATDnet в настоящее время не предоставляет информации о полярности удара, типе (по направлению от облака к земле/внутриоблачная) (CG/IC) или о мощности/максимальном токе.

6.6 ИСПОЛЬЗОВАНИЕ СИСТЕМ ЛОКАЛИЗАЦИИ МОЛНИЙ МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИМИ СЛУЖБАМИ

Данные о молниях могут применяться в различных областях, имеющих значение для государственных и частных организаций по предоставлению метеорологического обслуживания. Как правило, национальные метеорологические учреждения используют данные системы LLS в целях содействия выполнению своих национальных обязанностей по защите жизни и собственности, а коммерческие организации используют данные о молниях для предоставления улучшенных предупреждений о явлениях суровой погоды, прогнозов и руководящих указаний пользователям для специализированных видов применения, включая авиацию, сельское хозяйство, энергетику и средства массовой информации.

6.6.1 Распознавание бурь и оповещения о явлениях суровой погоды

Одна из важных обязанностей метеорологических служб заключается в предоставлении надежных предупреждений об условиях суровой погоды. Как правило, самая высокая оправдываемость прогнозов явлений суровой погоды и наиболее низкие показатели сигналов ложной тревоги достигаются при использовании нескольких источников данных, но так как грозовые бури, по большей части, сопровождаются возрастанием молний в облаке (IC), данные LLS сами по себе могут обычно служить в качестве очень четкого индикатора силы и протяженности грозовых очагов. Это указывает на важность сетей обнаружения всех молний, таких, которые обнаруживаются в диапазонах частот НЧ/СЧ/ВЧ, так как обнаружение только молний по направлению от облака к земле не является достаточным для этого применения.

Хотя сигнал тревоги может быть подан сразу при ударе поблизости от района с измерительным прибором, более надежная процедура включает определение грозового очага и его отслеживание по мере его продвижения внутрь района, представляющего интерес или по направлению к нему. Некоторые системы LLS позволяют выполнить краткосрочную экстраполяцию (текущая погода) смещений очагов порядка 1 час или около этого. Посредством мониторинга полной частоты вспышек и ее изменений, можно определить очаги молний потенциального формирования явлений суровой погоды. При определении очага и когда общий показатель молнии превышает данную пороговую величину, можно подавать сигнал тревоги.

За исключением определенных грозовых систем, образующихся вдоль фронтальных границ, прогнозирование на сроки большей длительности с допустимой оправдываемостью требует использования численных моделей прогноза погоды. Наконец, можно отметить, что молния наряду с прослеживанием очага грозы не только указывает на инициирование сильной грозовой деятельности, но также дает сигнал о прекращении угрозы в данном районе.

Несмотря на то, что сообщения наблюдателей о грозе на земной поверхности или в атмосфере являются неоценимым источником информации во время явлений суровой погоды, информация, полученная дистанционными методами (включая обнаружение молний), постоянно приобретает все большее значение. В настоящее время можно использовать радиолокационное отражение, снимки облачности, пассивные микроволновые яркостные температуры и данные о молниях (по отдельности или в комбинации) для определения грозовой деятельности с большей точностью и надежностью даже в отдаленных районах. Из всех этих методов, глобальные и/или локальные сети систем LLS и автономные детекторы на земле или на воздушном судне явно являются наиболее оптимальными для идентификации значительной грозовой деятельности по причинам, рассмотренным выше. Хотя простое обнаружение грозы можно осуществить с помощью любой системы LLS, более полные измерения требуют продвинутых систем и методов, которые способны обеспечить заблаговременное обнаружение и идентификацию грозовой деятельности на ранней стадии, сокращая в то же время сигналы ложных тревог до приемлемого уровня.

6.6.2 Текущая погода, прогнозирование и производная продукция

Прогнозирование текущей погоды представляет широко используемый метод для задач сверхкраткосрочного прогнозирования. Прогноз текущей погоды начинается с информации о текущем состоянии (метеорологических условияй) атмосферы, выраженном одним или несколькими наблюдаемыми параметрами, а затем используется оценка их изменения для предсказания их местонахождения и протяженности через короткое время в будущем. Точность прогноза текущей погоды зависит от обоснованности предположения, что погода, связанная с наблюдавшимся (наблюдавшимися) параметром(ами), будет продолжаться в течение этого периода без существенного изменения. Безусловно, определенные параметры молнии указывают на фазу жизненного цикла гроз, и это также может использоваться для прогнозирования текущей погоды. Это вышеупомянутое предположение обоснованно для кратких (~1 ч) периодов, но

его обоснованность уменьшается со временем. В результате, экстраполяции на более длительные периоды, чем около 1 ч, требуют использования методов усвоения данных и численного прогнозирования погоды.

Качественные оценки данных LLS обычно связаны с предоставлением данных о молниях на картах (вместе с другой информацией или без нее) в реальном или близком к реальному масштабах времени. Эта продукция может использоваться для многих целей, таких как локализация или ограничение района, который будет, вероятно, затронут грозой, и помощь в принятии решения о выпуске предупреждения об опасности. Кроме качественной оценки, высококачественные данные LLS хорошо поддаются количественной обработке, включая статистические оценки частоты ударов для определения силы грозы, которые могут существенно повысить их практическую ценность.

В настоящее время выполняется ряд проектов, направленных на развитие автоматических процедур слежения за очагом грозы и оценки молниевых параметров в этих районах. Усовершенствованные интерпретации, анализ и анимационное представление результатов слежения за очагом должны, в значительной мере, повысить потенциал данных LLS в отношении прогнозирования текущей погоды. Сочетание слежения за очагом, включая, как молнию, так и радиолокатор, представляет другой тип потенциально полезной производной продукции.

В заключение, данные о молниях, так же, как и другие наблюдения, такие как радиолокационная отражаемость, могут использоваться для создания статистики выходной продукции модели в целях объективного прогнозирования (Glahn и Lowry, 1972; Knupffer, 1996), подходящей для использования в вероятностных методах последующей обработки, подобно методам, описанным для почасовой модели быстрого обновления данных численного прогноза погоды (ЧПП) Рапида Рефреша, разработанной Лабораторией по исследованиям системы Земля НУОА, США (Weygandt et al., 2008).

6.6.3 **Молнии и климат**

В последних исследованиях климата отмечается связь между молниями и изменением климата (Wiiliams 2005; Price, 2006, 2009). По мере повышения температуры у земной поверхности и в нижней тропосфере, прогнозируется увеличение частоты молний в диапазоне 10—100 % для каждого градуса потепления поверхности в зависимости от использованной модели и предположений. Имеется также явная связь между температурой, водяным паром и молниевой активностью; грозы могут переносить большое количество водяного пара в верхние слои тропосферы и нижние слои стратосферы, а это, в свою очередь, влияет на парниковый эффект, затрагивая климат Земли. Кроме того, разряды молнии образуют окиси азота, которые влияют на образование парникового газа озона. Следует, однако, признать, что даже несмотря на то, что лежащие в основе механизмы, связывающие изменение климата с молниями, хорошо поняты, различные процессы могут доминировать непредвиденным образом. Например, моделирование климата, выполненное Grewe (2008), позволяет предположить, что глобальное потепление может фактически привести повсеместно к уменьшению количества случаев конвективных явлений, но к событиям более интенсивным. В итоге, частота молний уменьшается в общей повторяемости вспышек, однако прогнозируется, что отдельные грозы вызовут большее количество молний.

В любом случае грозовая активность является одним из факторов, который следует принимать во внимание в любой подробной климатической модели или предсказаниях изменения климата. Соответственно поэтому важно проводить мониторинг грозовой активности в различных масштабах на огромных территориях и создать или расширить базу данных о молниевых явлениях в течение длительных временных периодов. Также следует изучать взаимосвязи для коротких временных масштабов в диапазонах ежедневных и суточных изменений, 5-суточных волн, внутрисезонных, полугодовых и годовых до более длительных периодов. Для достижения этой цели, необходимо расширить локальные высокоточные системы LLS, завершить создание глобальных LLS, внедрить и осуществить стандарты по обнаружению молний.

6.6.4 Проверка наземного ущерба, вызванного молниями

Ранняя мотивация развития системы LLS вынуждена была иметь объективный способ проверки причины ущерба, вызванного молниями, в юридических спорах, и большинство страховых компаний используют данные о молниях для проверки или отклонения претензий в отношении ущерба, нанесенного молнией. Для того, чтобы быть полезной в этом отношении, система LLS должна продемонстрировать, как прекрасную эффективность обнаружения, так и точность локализации на всех пороговых уровнях. Точность локализации должна быть лучше, чем ~1 км, с тем, чтобы можно было продемонстрировать хорошую корреляцию между молнией и повреждениями, и должны обнаруживаться относительно слабые удары, так как даже удар 5 кА может вызвать значительное повреждение или бросок напряжения. Необходима даже более высокая точность локализации для энергетической промышленности для того, чтобы определить мог бы быть обрыв высоковольтной линии электропередачи вызван ударом молнии. Поскольку сильные грозы могут вызывать высокую частоту ударов, а вспышки молнии могут состоять из многих ударов с различными точками их попадания, желательна точность 100—200 м для определения надежной пространственной корреляции. Безусловно, это требование является не таким строгим при наличии информации о точном сроке явления, как в отношении сбоя в электроснабжении, так и времени ударов, и в настоящее время средства для автоматического признания этих событий доступны на коммерческой основе.

СПРАВОЧНАЯ И ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ЛИТЕРАТУРА

Abarca, S.F., K.L. Corbosiero and T.J. Galarneau Jr., 2010: An evaluation of the Worldwide Lightning Location Network (WWLLN) using the National Lightning Detection Network (NLDN) as ground truth. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 115(D18).

Betz, H.D., K. Schmidt and W.P. Oettinger, 2009: LINET – An international VLF/LF lightning detection network in Europe. In: *Lightning: Principles, Instruments and Applications* (H.D. Betz, U. Schumann and P. Laroche, eds.). Dordrecht, NL, Springer-Verlag.

Biagi, C.J., K.L. Cummins, K.E. Kehoe and E.P. Krider, 2007: National Lightning Detection Network (NLDN) performance in southern Arizona, Texas and Oklahoma in 2003–2004. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 112(D5).

Cummins, K.L. and M.J. Murphy, 2009: An overview of lightning locating systems: History, techniques, and data uses, with an in-depth look at the U.S. NLDN. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 51(3):499–518.

Demetriades, N.W.S., M.J. Murphy and J.A. Cramer, 2010: Validation of Vaisala's Global Lightning Dataset (GLD360) over the continental United States. *Preprints*, Twenty-ninth Conference on Hurricanes and Tropical Meteorology (10–14 May 2010), Tucson, AZ.

Dowden, R.L., J.B. Brundell and C.J. Rodger, 2002: VLF lightning location by time of group arrival (TOGA) at multiple sites. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 64(7):817–830.

Dwyer, J.R., 2005: A bolt out of the blue. *Scientific American*, 292(5):64–71.

Fleenor, S.A., C.J. Biagi, K.L. Cummins, E.P. Krider and X.-M. Shao, 2009: Characteristics of cloud-to-ground lightning in warm-season thunderstorms in the Central Great Plains. *Atmospheric Research*, 91:333–352.

Glahn, H.R., and D.A. Lowry, 1972: The use of model output statistics (MOS) in objective weather forecasting. *Journal of Applied Meteorology*, 11:1203–1211.

Grewe, V., 2008: Impact of lightning on air chemistry and climate. In: *Lightning: Principles, Instruments and Applications* (H.D. Betz, U. Schumann and P. Laroche, eds.). Dordrecht, NL, Springer-Verlag.

Heckman, S. and C. Liu, 2010: The application of total lightning detection and cell tracking for severe weather prediction. In: *Proceedings of the International Conference on Grounding and Earthing (GROUND'2010) and Fourth International Conference on Lightning Physics and Effects (LPE)* (November 2010), Salvador, Brazil.

Hendry, J., 1993: Panning for lightning (including comments on the photos by M.A. Uman). *Weatherwise*, 45(6):19.

Hutchins, M.L., R.H. Holzworth, C.J. Rodger and J.B. Brundell, 2012: Far-field power of lightning strokes as measured by the World Wide Lightning Location Network. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 29:1102–1110.

Jerauld, J., V.A. Rakov, M.A. Uman, K.J. Rambo, D.M. Jordan, K.L. Cummins and J.A. Cramer, 2005: An evaluation of the performance characteristics of the U.S. National Lightning Detection Network in Florida using rocket-triggered lightning. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 110(D19).

Knüpffer, K., 1996: Methodical and predictability aspects of MOS systems. *Preprints of the Thirteenth Conference on Probability and Statistics in the Atmospheric Sciences* (21–23 February 1996), San Francisco, CA. American Meteorological Society, 190–197.

Le Vine, D.M., 1980: Sources of the strongest RF radiation from lightning, *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 85(C7):4091–4095.

Lojou, J.-Y., M.J. Murphy, R.L. Holle and N.W.S. Demetriades, 2008: Nowcasting of thunderstorms using VHF measurements. In: *Lightning: Principles, Instruments and Applications* (H.D. Betz, U. Schumann and P. Laroche, eds.). Dordrecht, NL, Springer-Verlag.

Mardiana, R. and Z-I. Kawasaki, 2000: Broadband radio interferometer utilizing a sequential triggering technique for locating fast-moving electromagnetic sources emitted from lightning. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 49(2):376–381.

Morimoto, T., A. Hirata, Z. Kawasaki, T. Ushio, A. Matsumoto and J.H. Lee, 2004: An operational VHF broadband digital interferometer for lightning monitoring, *IEEJ Transactions on Fundamentals and Materials*, 124(12):1232–1238.

Naccarato, K.P., O. Pinto Jr., S.A.M. Garcia, M. Murphy, N. Demetriades and J. Cramer, 2010: *Validation of the new GLD360 dataset in Brazil: First results*. Twenty-first International Lightning Detection Conference (19–22 July 2010), Orlando, Florida.

Nag, A., S. Mallick, V.A. Rakov, J.S. Howard, C.J. Biagi, J.D. Hill, M.A. Uman, D.M. Jordan, K.J. Rambo, J.E. Jerauld, B.A. DeCarlo, K.L. Cummins and J.A. Cramer, 2011: Evaluation of U.S. National Lightning Detection Network performance characteristics using rocket-triggered lightning data acquired in 2004–2009. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 116(D2).

Nag, A. and V.A. Rakov, 2012: Positive lightning: An overview, new observations, and inferences. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 117(D8).

Nag, A., V.A. Rakov, D. Tsalikis and J.A. Cramer, 2010: On phenomenology of compact intracloud lightning discharges. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 115(D14).

Orville, R.E., 2008: Development of the National Lightning Detection Network, *Bulletin of the American Meteorological Society*, 89(2):180–190.

Poelman, D.R., W. Schulz and C. Vergeiner, 2013: Performance characteristics of distinct lightning detection networks covering Belgium. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 30(5):942–951.

Price, C., 2006: Global thunderstorm activity. In: *Sprites, Elves and Intense Lightning Discharges* (M. Fullekrug, E. Mareev and M. Rycroft, eds.). Springer, Amsterdam, 85–99.

Price, C., 2009: Will a drier climate result in more lightning? *Atmospheric Research*, 91(2):479–484.

Rakov, V.A., 1999: Lightning electric and magnetic fields. In: *Proceedings of the Thirteenth International Zurich Symposium on Electromagnetic Compatibility* (16–18 February 1999), Zurich, Switzerland.

Rakov, V.A. and M.A. Uman, 2003: *Lightning: Physics and Effects*, Cambridge University Press.

Said, R.K., M.B. Cohen and U.S. Inan, 2013: Highly intense lightning over the oceans: Estimated peak currents from global GLD360 observations. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 118(13) (available from http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/jgrd.50508/pdf).

Said, R.K., U.S. Inan and K.L. Cummins, 2010: Long-range lightning geolocation using a VLF radio atmospheric waveform bank. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 115(D23).

Shao, X.M., D.N. Holden and P.R. Krehbiel, 1996: Broadband radio interferometry for lightning observation. *Geophysical Research Letters*, 23:1917–1920.

Smith, D.A., X.M. Shao, D.N. Holden, C.T. Rhodes, M. Brook, P.R. Krehbiel, M. Stanley, W. Rison and R.J. Thomas, 1999: A distinct class of isolated intracloud discharges and their associated radio emissions. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 104(D4): 4189–4212.

Thomas, R.J., P.R. Krehbiel, W. Rison, S.J. Hunyady, W.P. Winn, T. Hamlin and J. Harlin, 2004: Accuracy of the Lightning Mapping Array. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 109(D14).

Weygandt, S.S., M. Hu, S.G. Benjamin, T.G. Smirnova, K.J. Brundage and J.M. Brown, 2008: *Assimilation of lightning data using a diabatic digital filter within the Rapid Update Cycle*. Twentieth International Lightning Detection Conference (21–23 April 2008), Tucson, AZ.

Williams, E., 2005: Lightning and climate: A review. *Atmospheric Research*, 76:272–287.

ГЛАВА 7. РАДИОЛОКАЦИОННЫЕ ИЗМЕРЕНИЯ

7.1 ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

Данная глава содержит общее описание метеорологических радиолокаторов. Особое внимание в ней уделяется техническим и оперативным характеристикам, которые должны учитываться при планировании, разработке и эксплуатации отдельных радиолокаторов и радиолокационных сетей, используемых в поддержку метеорологических и гидрологических служб. Это связано с использованием и применением данных метеорологических радиолокаторов. Радиолокаторы, используемые для получения вертикальных профилей ветра, рассматриваются в, главе 5 настоящего тома.

7.1.1 Метеорологический радиолокатор

Метеорологические радиолокаторы предназначены, в первую очередь, для обнаружения осадков и связанных с ними метеорологических явлений. В то же время, метеорологический радар может обнаруживать другие объекты, такие как насекомые, птицы, самолеты, песок и пыль, отраженные сигналы от наземных объектов и даже колебания показателя преломления в атмосфере, которые образуются в результате локальных колебаний температуры или влажности.

В этой главе речь идет о радиолокаторах, предназначенных для обычного оперативного или близкого к оперативному использования во всем мире. Метеорологические радиолокаторы с характеристиками, которые наилучшим образом подходят для наблюдений и исследований атмосферы, излучают электромагнитные импульсы в диапазоне частот 3—10 ГГц (длина волны 3—10 см, соответственно). Эксплуатационные характеристики и работа их системы также более подробно описаны в приложении 7.A. В первую очередь, метеорологические радиолокаторы предназначены для обнаружения и составления карт зон осадков, измерения их интенсивности и направления перемещения, а также определения их типа. Радиолокационные эхосигналы от птиц, насекомых или в результате отражения Брэгга (турбулентные колебания), могут также давать данные о радиальной скорости ветра с помощью доплеровского радиолокатора. Их распределения интенсивности могут выявлять расположение нижних слоев атмосферы, которые показывают области нижнего уровня конвергенции, где может произойти образование или развитие гроз.

Более высокие частоты (35 и 94 ГГц) используются для обнаружения гидрометеоров меньшего размера, таких как облако, туман, морось, слабый снег и осадки; эти частоты становятся преобладающими в научно-исследовательском сообществе. Эти частоты, как правило, не используются в оперативном прогнозировании из-за сильного ослабления радиолокационного сигнала средой, в которой он проходит, и их относительно малого радиуса действия, особенно в доплеровском режиме.

На более низких частотах (915—1 440 МГц, ~400—440 МГц и ~50 МГц) радиолокаторы способны обнаруживать неоднородности показателя преломления в безоблачной атмосфере, и используются для получения вертикальных профилей скорости ветра. Несмотря на то, что они могут обнаруживать осадки, их возможности сканирования ограничены размером и типом антенны, и они обычно показывают вертикальные или почти вертикальные профили скорости ветра.

Обратный сигнал, поступающий после отражения излучаемого импульса от любой цели, именуемый эхосигналом, имеет амплитуду, фазу и поляризацию. Амплитуда связана с распределением частиц по размеру и с их количеством в (импульсном) объеме, облучаемым радиолокационным лучом. Данная амплитуда используется для определения коэффициента отражения (Z), который используется для оценки интенсивности осадков с помощью эмпирических соотношений. Важнейшим применением является мгновенное обнаружение, составление карт и оценка осадков на уровне земной поверхности в практически непрерывном режиме и над большими территориями.

Доплеровские радиолокаторы позволяют определять разность фаз между переданным и принятым импульсом, что является мерой средней радиальной скорости частиц. Это является отражаемостью, средневзвешенной по радиальным компонентам скоростей перемещения гидрометеоров в импульсном объеме. Ширина доплеровского спектра является мерой пространственной изменчивости доплеровских скоростей и обеспечивает измерение вариации радиальной скорости, которая интерпретируется в показатели сдвига ветра и турбулентности. Важной характеристикой доплеровского радиолокатора является его способность распознавать при обработке сигналов эхосигналы, образовавшиеся в результате отражения от наземных целей.

Современное поколение радиолокаторов обладает функцией поляризации. В процессе работы импульсы излучаются одновременно с горизонтальной и вертикальной поляризацией. В прошлом импульсы излучались последовательно, но требовали мощного переключателя поляризации, который был подвержен сбоям в работе. Два приемных устройства (физические или виртуальные) используются для измерения горизонтального и вертикального компонентов обратного сигнала. Главными выгодами являются более высокое качество данных благодаря способности идентифицировать характеристики цели (птицы, насекомые, осадки и их тип, радиолокационные помехи), классификация гидрометеоров и оценка осадков. Что касается прогностических применений, то благодаря двойной поляризации можно идентифицировать границу града и дождя-снега. Высокая интенсивность осадков затрагивает горизонтальную и вертикальную фазу излученных и принятых импульсов, и это можно использовать для оценки осадков даже при частично заблокированных лучах или ослабленных сигналах. Калибровку двойной поляризации можно осуществлять посредством независимо согласованных соотношений между параметрами.

Метеорологические радиолокаторы не функционируют более в автономном режиме. Учитывая существующие возможности в области телекоммуникации, осуществляется обмен данными, результатом чего является наличие сетей метеорологических радиолокаторов. Это позволило расширить сферу их использования для локальных применений (например, предупреждения о суровой погоде и прогнозирование текущей погоды), региональных применений (например, ассимиляция данных, оценка осадков) и глобальных применений (например, обнаружение изменения климата).

Современные метеорологические радиолокаторы должны иметь характеристики, ориентированные для получения наилучших данных для оперативных потребностей. Они являются самыми сложными из всех эксплуатируемых метеорологических измерительных средств и требуют специальной подготовки и обширных познаний об этом инструменте. Расположение радиолокатора является исключительно важным для удовлетворения потребностей, связанных с проведением наблюдений и обнаружения. Имеется широкий спектр вариантов конфигурации для подготовки радиолокатора к эксплуатации; компоненты должны быть должным образом установлены и контролироваться в плане их износа и сбоя в работе. Таким образом, для того чтобы этот прибор был постоянно полезным, требуется программа технического обслуживания и поддержки.

7.1.2 Характеристики радиолокаторов, термины и единицы измерения

Выбор характеристик радиолокатора определяется метеорологическими применениями (Таблицы 7.1, 7.2 и 7.3).

Таблица 7.1. Радиолокационные частотные диапазоны

Радиолокационный диапазон	*Частота*	*Длина волны*	*Номинальная длина волны*
UHF	300—1 000 МГц	1—0,3 м	70 см
L	1 000—2 000 МГц	0,3—0,15 м	20 см
S	2 000—4 000 МГц	15—7,5 см	10 см
C	4 000—8 000 МГц	7,5—3,75 см	5 см
X	8 000—12 500 МГц	3,75—2,4 см	3 см
K_u	12,5—18 ГГц	2,4—1,66 см	1,50 см
K	18—26,5 ГГц	1,66—1,13 см	1,25 см
K_a	26,5—40 ГГц	1,13—0,75 см	0,86 см
W	94 ГГц	0,30 см	0,30 см

Таблица 7.2. Некоторые параметры и единицы измерения, используемые метеорологическими радиолокаторами

Условное обозначение	*Параметр*	*Единицы измерения*
Z_e	Эквивалентный или эффективный коэффициент радиолокационной отражаемости	$мм^6 \cdot м^{-3}$ или дБZ
V_r	Средняя радиальная скорость	$м \cdot с^{-1}$
σ_v	Ширина спектра	$м \cdot с^{-1}$
Z_{DR}	Дифференциальная отражаемость	дБ
K_{DP}, φ_{DP}	Специальная дифференциальная фаза, дифференциальная фаза	Градус/км, градус
ρ_{HV}	Коэффициент корреляции	
LDR	Степень линейной деполяризации	дБ

7.1.3 Требования к точности измерений радиолокаторов

Количественное использование данных радиолокаторов в применениях конечного пользователя зависит от точности и прецизионности радиолокационных наблюдений. Современные радиолокаторы, установленные должным образом, откалиброванные и регулярно обслуживаемые, являются относительно стабильными и не дают значительных погрешностей измерений благодаря стабильности приборного оборудования. В то же время, техническое обслуживание и калибровка радиолокатора до сих пор представляют собой существенную проблему и требуют наличия высококвалифицированного персонала. Погрешности измерений по-прежнему существуют и требуются инженерные и научные специальные знания для мониторинга, диагностики и уменьшения систематических ошибок.

Такие внешние факторы, как эффекты отражения от наземных объектов, аномальное распространение, эффекты ослабления и прохождения, влияние параметров луча, состав цели, особенно ее вариации и изменения по вертикали, неадекватности соотношения

между интенсивностью и отражаемостью дождя, а также метеорологическая ситуация, вносят постороннюю информацию в данные, которая должна быть устранена во время обработки научных данных для их использования в количественных применениях. С учетом ошибок, относимых только на счет радиолокационной системы, измеряемые радиолокационные параметры можно определить с допустимой точностью (таблица 7.4).

Таблица 7.3. Физические радиолокационные параметры и единицы измерения

Условное обозначение	*Параметр*	*Единицы измерения*
c	Скорость света	м·с$^{-1}$
f	Излучаемая частота	Гц
f_d	Доплеровский сдвиг частоты	Гц
P_r	Принимаемая мощность	мВт или дБм
P_t	Излучаемая мощность	кВт
ЧПИ	Частота повторения импульсов	Гц
T	Период повторения импульсов (= 1/ЧПИ)	мс
Ω	Скорость вращения антенны	градус/с или об/мин
λ	Длина излучаемой волны	см
φ	Азимутальный угол	градус
θ	Ширина диаграммы направленности на уровне половины мощности	градус
τ	Длительность импульса	мкс
γ	Угол места	градус

Таблица 7.4. Требования к точности

Параметр	*Определение*	*Допустимая точность*[a]
φ	Азимут	0,1°
γ	Угол места	0,1°
V_r	Средняя доплеровская скорость	1,0 м·с$^{-1}$
Z	Коэффициент отражаемости	1 дБZ
σ_v	Ширина доплеровского спектра	1 м·с$^{-1}$
Z_{DR}	Дифференциальная отражательная способность	0,2 дБ
K_{DP}	Специальная дифференциальная фаза	< 0,5 град·км$^{-1}$
ρ_{HV}	Корреляция перекрестной поляризации	0,001

Примечание:

а Данные значения определены по отношению к нормальному гауссову спектру со стандартным отклонением менее 4 м·с$^{-1}$. Точность измерения скорости снижается при увеличении ширины спектра, а точность определения отражаемости повышается.

7.2 ПРИНЦИПЫ РАДИОЛОКАЦИОННОГО ИЗМЕРЕНИЯ

7.2.1 Импульсные радиолокаторы

Принципы радиолокационных наблюдений за явлениями погоды были установлены в 1940-е годы. С тех пор сделаны огромные шаги в направлении улучшения оборудования, обработки сигналов и данных, а также их интерпретации. Для получения более подробной информации заинтересованному читателю следует ознакомиться с некоторыми другими соответствующими работами. Хорошими справочниками являются Skolnik (1970, 1990) по аспектам, связанным с конструкцией и оборудованием; Battan (1973) по метеорологическим явлениям и применениям; Atlas (1964, 1990), Sauvageot (1982) и ВМО (WMO, 1985) — общий обзор; Rinehart (2004) по вопросам перспективы для метеорологов; Doviak и Zrnic (1993) по принципам и применениям доплеровских радиолокаторов; Bringi и Chandrasekar (2001) и Meischner (2003) по вопросам двойной поляризации. Существенное понимание вопросов, связанных с качеством радиолокаторов, их техническим обслуживанием, мониторингом и калибровкой приборного оборудования можно почерпнуть из материалов семинаров, посвященных RADCAL 2000 (Joe, 2001), RADCAL 2013 (Chandrasekar and Baldini, 2013) и RADMON 2010 (Joe, 2010). Краткое резюме этих принципов следует ниже.

На рисунке 7.1 показаны типовой радиолокатор и место установки радиолокатора. Антенна (2—8,5 м) находится внутри обтекателя наверху вышки высотой порядка 10—30 м или более. Вышка используется для того, чтобы поднять антенну выше местных препятствий. При определении высоты вышки следует учитывать растущие поблизости деревья. Слишком большая высота вышки приведет к значительно более сильному отражению от наземных объектов из-за стороны основного лепестка и боковых лепестков. В одном из зданий находится радарная электроника (передатчик/приемник и вычислительная техника), а в других размещаются источник бесперебойного питания (ИБП) и дизельный генератор. Радиолокаторы часто размещаются в сельской местности, и хорошее кондиционирование системы энергоснабжения часто не является нормой. ИБП играет исключительно важную роль в устранении перепадов напряжения и других аномалий энергоснабжения и является ключевым элементом для поддержания функционирования. Дизельный или другие виды генераторов могут функционировать в течение 2—3 дней, однако их технические характеристики следует определять в



Рисунок 7.1. Типовой метеорологический радиолокатор в составе канадской сети. Показаны основные физические компоненты радиолокационной системы. Высота вышки около 30 м с обтекателем, на котором установлены предупредительные световые сигналы и громоотвод.

соответствии с потребностями. Следует отметить громоотвод, находящийся наверху обтекателя антенны РЛС, который соединен с кабелями заземления (не показаны). Это исключительно важно, поскольку молния может причинить серьезный и долгосрочный ущерб радиолокационным компонентам. Колебания мощности, вызванные молниями, могут превышать мощность ИБП. Следует отметить также красные сигнальные огни наверху обтекателя антенны, предназначенные для предупреждения летчиков.

Электромагнитные волны на выборных фиксированных частотах излучаются направленной антенной в атмосферу в виде высокочастотных коротких импульсов. Разрешение по дальности радиолокационных данных определяется длительностью импульсов и обработкой дальности. Одной из появляющихся технологий, применяемой в оперативных радиолокаторах, является использование передатчиков низкой мощности (твердотельные, лампы бегущей волны), в которых используется метод, именуемый сжатием импульсов, когда применяется комбинация длительных импульсов низкой мощности, частотная модуляция и передовая обработка сигналов, с тем чтобы достичь высокое разрешение по дальности и высокую чувствительность, которые конкурируют с традиционными импульсными системами. Антенны с фазированной решеткой являются новейшей технологией, которая формирует луч посредством электронного сдвига фазы. Они обладают способностью направляться на разные места быстрым и непоследовательным образом. В то же время, все они используют направленный радиолуч, который может обеспечивать разрешение целей по дальности, азимуту и углу места.

На рисунке 7.2 показана направленная радиолокационная антенна, которая посылает импульсный луч электромагнитной энергии над поверхностью Земли и облучает различные цели, включая неметеорологические цели. Многие из физических ограничений, касающихся методик наблюдений, непосредственно очевидны из этого рисунка. Например: i) имеется ограничение по минимальной высоте, на которой могут проводиться наблюдения на больших расстояниях, вызванное кривизной земной поверхности; ii) имеются неметеорологические цели; iii) имеются другие излучатели (локальные радиосети, Солнце); iv) имеется аномальное прохождение луча; v) имеется блокировка или частичная блокировка, создаваемая горами; vi) имеются осадки разных типов; и vii) имеются взаимодействия между электромагнитным излучением и осадками, результатом которых является усиление эхосигналов (яркая полоса), и т. д.

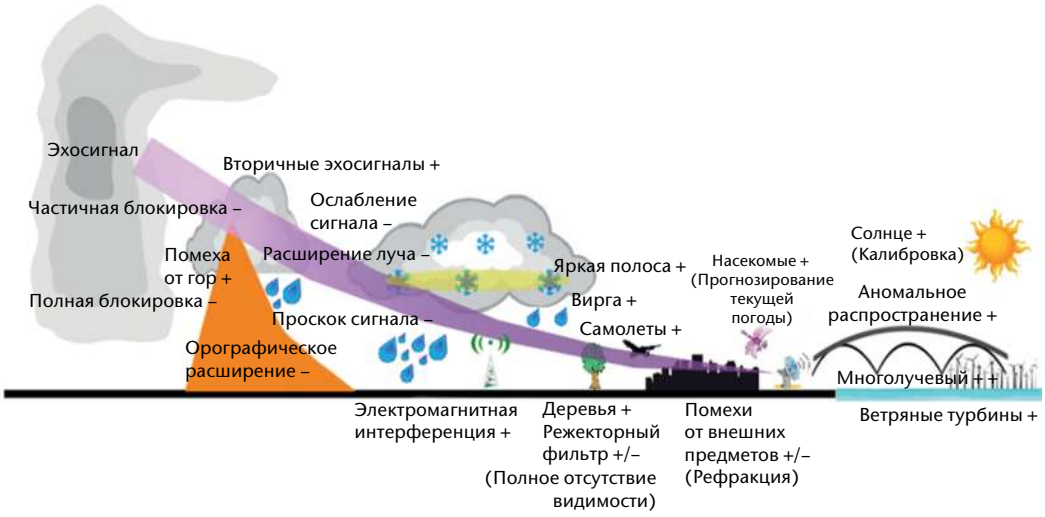


Рисунок 7.2. Метеорологический радиолокатор может обнаруживать многие объекты помимо метеорологических целей. На этой схеме показаны многие из этих характеристик. Знаки + или – показывают увеличение или уменьшение отражательной способности цели в результате этой характеристики. Эти артефакты необходимо удалять в случае количественных применений.

Параболический отражатель антенной системы фокусирует электромагнитную энергию в виде узконаправленного конусообразного луча. Линейная ширина луча увеличивается с расстоянием; например, номинальный луч с угловой шириной в 1° расходится на 0,9, 1,7 и 3,5 км на расстояниях 50, 100 и 200 км соответственно.

У импульсного радиолокатора высокочастотные импульсы электромагнитной энергии поглощаются и рассеиваются облучаемыми метеорологическими и неметеорологическими целями. Некоторая часть рассеянной энергии отражается обратно в направлении радиолокационной антенны и приемника. Поскольку электромагнитная волна распространяется со скоростью света (т.е. $2{,}99 \times 10^8$ м·с$^{-1}$), расстояние до цели может быть определено при помощи измерения интервала времени между излучением импульса и приемом отраженного сигнала. Между излучениями последовательных импульсов приемник принимает любую отраженную волну. Отраженный от цели сигнал обычно называют радиолокационным эхо. Время между последовательными импульсами определяет максимальную однозначную дальность действия радиолокатора. Эхосигналы могут быть получены в то же время от целей, находящихся за пределами этого максимального расстояния, и они известны как эхо-сигналы с временем запаздывания, превышающем несколько периодов повторения зондирующих импульсов.

У радиолокатора со сжатием импульсов и частотной модуляцией расстояние до цели определяется частотой в пределах длительного импульса. В то же время, максимальное однозначное расстояние все же определяется интервалом времени между последовательными импульсами. При излучении длительных импульсов приемник радиолокатора защищается от большой мощности передаваемого импульсного сигнала и образуется значительная слепая зона (10—30 км, в зависимости от продолжительности импульса). В случае этого типа радиолокатора короткие импульсы (с соответствующими небольшими слепыми зонами, < 2 км) излучаются для выявления объектов, которые находятся в пределах этой слепой зоны.

Уравнение радиолокационной дальности соотносит мощность отраженного от цели сигнала с характеристиками радиолокатора. Мощность отраженного сигнала позволяет оценивать количество осадков в пределах разрешения радиолокатора. Эта оценка зависит от предположения о типе частиц осадков и их распределения по размеру в пределах разрешения радиолокатора.

Измерения мощности определяются общей мощностью обратного рассеяния целью в пределах объема, облучаемого в любой данный момент времени. Этот объем называется импульсным объемом или объемом излучения. Размеры импульсного объема (который определяет разрешение радара) зависят от пространственной протяженности радиолокационного импульса (h) и ширины луча антенны в вертикальной (ϕ_b) и горизонтальной (θ_b) плоскостях. Ширина луча и, соответственно, импульсный объем возрастают с расстоянием. Поскольку энергия, которая возвращается к радиолокатору, проходит двойное расстояние, длина импульсного объема составляет только половину пространственной протяженности импульса ($h/2$) и не изменяется с расстоянием. Местоположение импульсного объема в пространстве определяется положением антенны по азимуту, углом места, дальностью цели, а также нелинейной траекторией распространения луча радиолокатора в направлении от радиолокатора. У радиолокатора со сжатием импульсов импульсный объем, в первую очередь, определяется разрешением частотной модуляции и способностью принимающей системы обеспечивать разрешение изменений по частоте.

Частицы в пределах импульсного объема непрерывно перемещаются относительно друг друга. Это проявляется в интенсивности флуктуаций средней для целей интенсивности. Измерение интенсивности одного эхосигнала от метеорологической цели имеет небольшую значимость. Необходимо проинтегрировать по меньшей мере 25—30 импульсов для получения приемлемой оценки средней интенсивности, хотя это будет зависеть от уровня качества данных, которое считается приемлемым (Smith, 1995). Обычно это осуществлялось раньше электронным способом в схеме интегратора, однако в настоящее время это делается при помощи цифрового процессора сигналов. Помимо этого, для увеличения облучаемого объема и повышения точности оценки

часто проводится осреднение импульсов по дальности, азимуту и времени за счет более грубого пространственного разрешения. Важное отличие от неметеорологических радиолокаторов заключается в том, что обработка сигналов и интерпретация данных основаны на предпосылке, согласно которой обратное отражение происходит от распределенной цели, а не от точечной цели (такой как самолет). Это требует обработки количественных данных измерений (а не просто обнаружения) и иной зависимости от данности уровня мощности отраженного сигнала (иное уравнение радиолокатора) по сравнению с радиолокаторами для обнаружения точечных целей (таких как радиолокаторы для управления воздушным движением).

Доплеровские радиолокаторы имеют электрическую схему для измерения разности сдвига по фазе последовательных импульсов из того же импульсного объема радара. Сдвиг по фазе пропорционален длине волны радиолокатора и соответственно расстоянию в интервал времени между импульсами. Этот сдвиг по фазе используется для оценки радиальной или доплеровской скорости.

Радиолокатор с двойной поляризацией может быть нескольких видов. Поляризация может быть циркулярной, и, хотя этой характеристикой обладали прекрасные исследовательские радиолокаторы, она, как правило, не используется в метеорологической деятельности. Радиолокаторы с линейной двойной поляризацией могут направлять импульсы с горизонтальной и вертикальной поляризацией в меняющемся или синхронном режиме. В первом случае требуется наличие быстрого мощного переключателя (переключает каждый импульс), но он проблематичен и поэтому их функционирует лишь небольшое количество. В случае метода синхронного излучения и приема с двойной поляризацией (режим STAR) излучается равная мощность как в горизонтальной, так и вертикальной поляризациях, и прием сигнала осуществляется отдельно в горизонтальной и вертикальной поляризациях. Это оказалось решением проблемы эксплуатации, поскольку исключается использование мощного быстрого переключателя, характеризуемого высокой степенью неработоспособности. Существуют вариации этих методов создания сигнала с двойной поляризацией. Основное преимущество альтернативного режима двойной поляризации является то, что в этом режиме можно измерять обратное отражение от цели с использованием перекрестной поляризации (степень линейной деполяризации — СЛП), и это является особенно полезным для обнаружения яркой полосы. Главным недостатком режима STAR является потеря СЛП (поскольку уже имеется перекрестная поляризация в излучаемом импульсе), потеря 3 дБ силы сигнала в обоих каналах (из-за разделения мощности) и взаимосвязанных артефактов, особенно в фазе ледяных штормов.

7.2.2 Распространение радиолокационных сигналов

В однородной среде электромагнитные волны распространяются по прямым линиям. В то же время атмосфера вертикально стратифицирована, и лучи изменяют направление в зависимости от изменений в показателе преломления (который является функцией температуры и влажности). Когда волны встречают на своем пути осадки и облака, то часть энергии поглощается, а часть энергии рассеивается во всех направлениях, в том числе и обратно в направлении радиолокатора.

Величину отклонения электромагнитных волн можно прогнозировать, используя вертикальные профили температуры, влажности и давления (Bean and Dutton, 1966). В нормальных атмосферных условиях волны распространяются по кривой, слегка наклоняясь к земной поверхности (рисунок 7.3). Изображение показано в физическом пространстве (Земля изображена с радиусом в 6 371 км), и на рисунке показано, что луч отклоняется в нисходящем направлении, но в то же время поднимается по мере расстояния относительно поверхности Земли. В модели Земли в масштабе четыре третьих (4/3), где поверхность Земли изображена с радиусом в 8 975 км (4/3 x 6 371 км), лучи представляют собой прямые линии (рисунок 7.4).

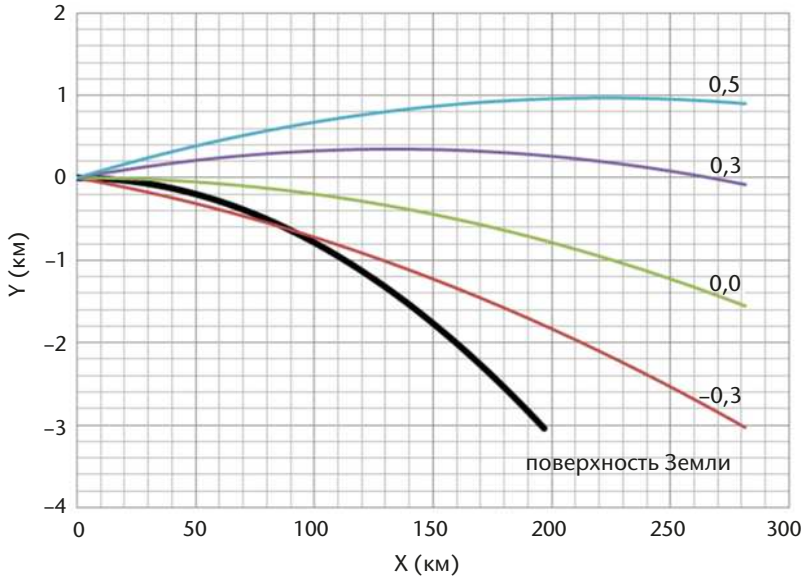


Рисунок 7.3. Схематическая диаграмма высоты луча для отдельных углов возвышения (–0,3; 0; 0,3 и 0,5) над поверхностью Земли для стандартного индекса профиля рефракции в атмосфере, вычерченная в физическом пространстве с кривизной земной поверхности, эквивалентной радиусу Земли.

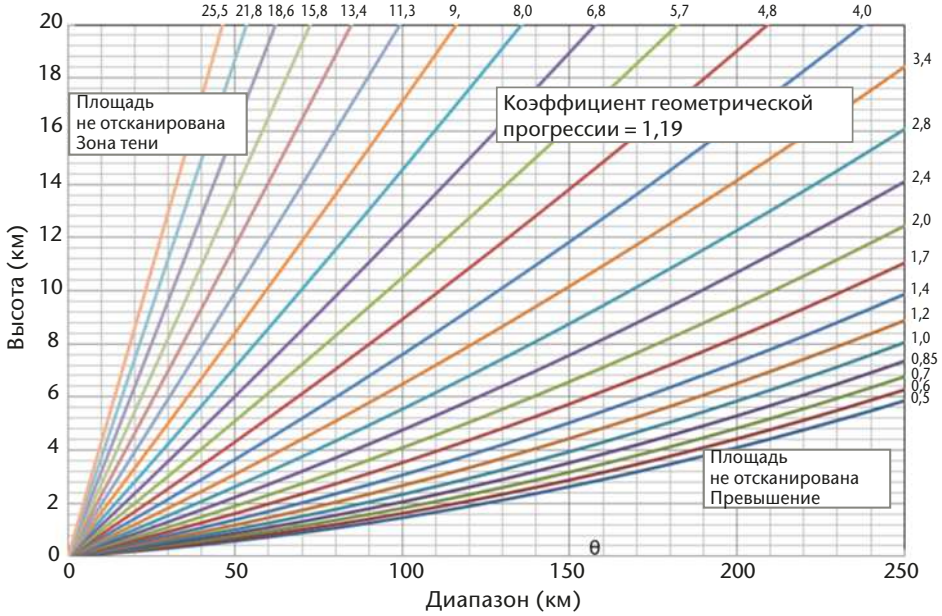


Рисунок 7.4. Диаграмма высоты луча также является полезным инструментом для интерпретации радиолокационной продукции. Высота луча вычерчивается относительно плоской Земли, что является более традиционным представлением. Последовательность углов места — это последовательность, предложенная Маршаллом и Баллантайном (1978 г.) для получения оптимальной горизонтальной продукции (CAPPI's, верхние точки эхосигналов).

Эта модель 4/3 применяется наиболее часто, однако некоторые радиолокаторы (вершина горы) используют модель 5/4. Высота над радиолокатором приводится в виде следующего уравнения:

$$h = \left[r^2 + \left(k_e a\right)^2 + 2rk_e a \sin\theta_e \right]^{1/2} - k_e a \qquad (7.1)$$

где h — это высота над антенной радиолокатора; r — расстояние вдоль луча; a — радиус Земли; e — угол подъема над горизонтом; и $k_e a$ — эффективный радиус Земли.

Траектория луча может отклоняться либо вверх (отрицательная рефракция), либо больше к земной поверхности (сверхрефракция). В обоих случаях высота луча будет содержать ошибку, если используется допущение о стандартной атмосфере. Это явление известно, как аномальное распространение. С точки зрения измерения осадков самая большая проблема возникает в условиях супер-рефракции или «волноводного распространения», когда луч может искривиться достаточно для того, чтобы коснуться земной поверхности и вызвать эхосигналы от нее, которые обычно не встречаются. Это явление происходит, когда показатель преломления резко уменьшается с высотой. Это случается при повышении температуры и уменьшении влажности с высотой. Эти эхосигналы должны исключаться при подготовке карты осадков. Случай отрицательной рефракции, когда траектория луча отличается от нормальной или отклоняется в верхнем направлении, не является очевидным для его установления и, соответственно, также является проблемой. В фактической практике вертикальный профиль показателя рефракции неизвестен, и поэтому точное местоположение луча неизвестно.

Некоторые эхосигналы от «ясного неба» возникают из-за турбулентных неоднородностей показателя преломления. Это встречается в зонах турбулентности, слоях повышенной стабильности, ячейках сдвига ветра или глубоких инверсиях (отражение Брэгга). Очертания этих эхосигналов по большей части распознаваемы, но не должны приниматься в качестве полей осадков (Gossard and Strauch, 1983).

7.2.3 Ослабление в атмосфере

Микроволны ослабляются вследствие их поглощения и рассеивания атмосферными газами, облаками и осадками.

Ослабление газами

Газы ослабляют микроволны в диапазонах 3—10 см. Поглощение атмосферными газами происходит, главным образом, молекулами водяного пара и кислорода. Ослабление водяным паром прямо пропорционально давлению и абсолютной влажности и почти линейно возрастает по мере понижения температуры. Концентрация кислорода до высот порядка 20 км является относительно однородной.

Ослабление газами незначительно изменяется в зависимости от климата и сезона. Оно является значительным для длин волн метеорологических радиолокаторов при бóльших дальностях и может составить 2—3 дБ на более длинных волнах и 3—4 дБ на более коротких волнах на расстоянии 200 км. Компенсацию можно весьма легко выполнять автоматически.

Ослабление гидрометеорами

Ослабление сигнала гидрометеорами может быть результатом как поглощения, так и рассеяния. Это самый значительный источник ослабления. Оно зависит от формы, размера, количества и состава частиц. Наличие подобной зависимости весьма затрудняет решение проблемы ослабления каким-либо количественным способом, используя только радиолокационные наблюдения, хотя достигнут значительный прогресс благодаря использованию радиолокаторов с двойной поляризацией.

Ослабление зависит от длины волны. На длинах волн порядка 10 см ослабление существует, но оно достаточно мало, в то время как на длинах волн в 3 см оно является весьма значительным. На длине волны 5 см ослабление может быть приемлемым для различных климатических условий, в особенности в высоких и средних широтах. Для достоверных измерений интенсивности осадков не рекомендуется использовать длины волн менее 5 см, за исключением применений на малых дальностях (таблица 7.5). Общее ослабление сигнала может происходить на 3 и 5 см. Радиолокаторы с меньшей длиной волн являются более чувствительными к ослаблению и коррекции ослабления, и большее значение для итоговых данных имеет количественная оценка осадков, основанная на измерениях специальной дифференционной фазы с двойной поляризацией. Эти методы являются эффективными, начиная с более низких значений интенсивности осадков для меньших длин волн.

Таблица 7.5. Соотношения ослабления при прямолинейном распространении луча

Длина волны (см)	*Соотношение (дБ км$^{-1}$)*
10	0,000 343 $R^{0,97}$
5	0,00 18 $R^{1,05}$
3,2	0,01 $R^{1,21}$

Примечание: по Burrows and Attwood (1949). Принятое ослабление при прямолинейном распространении луча при температуре 18 °C.
R — в единицах мм·ч$^{-1}$.

В отношении оценок осадков с помощью радиолокатора можно высказать несколько общих соображений, связанных с величиной ослабления. Ослабление зависит от массы воды в цели, таким образом, более сильные дожди ослабляют сигнал больше; облака с гораздо меньшей массой ослабляют сигнал меньше. Ледяные кристаллы вносят значительно меньшее ослабление в сравнении с жидкими частицами. Облака и ледяные облака вызывают небольшое ослабление и обычно его можно не принимать в расчет. Снежинки или ледяные кристаллы (либо градины) могут достигать гораздо большего размера, чем капли дождя. Они становятся влажными по мере таяния, в результате чего сильно увеличиваются их отражаемость и, следовательно, ослабляющие свойства. Это обстоятельство может исказить оценки осадков.

7.2.4 Рассеяние облаками и осадками

Мощность эхосигнала, обнаруживаемого и обрабатываемого радиолокатором, является мощностью волны обратного рассеяния целями в объеме разрешения (гидрометеоры, наземная поверхность, деревья и т. д.). Эффективная площадь обратного рассеяния (σ_b) определяется как площадь изотропного отражателя, который возвращает в направлении излучателя такое же количество энергии, что и фактическая цель. Эффективная площадь обратного рассеяния сферических частиц была впервые определена Mie (1908). Рэлей обнаружил, что если соотношение диаметра части к длине волны является равным или меньше 0,06, то для определения эффективной площади обратного рассеяния может быть использовано простое выражение:

$$\sigma_b = \frac{\pi^5 |K|^2 D^6}{\lambda^4} \tag{7.2}$$

которое является основой для уравнения 7.3. $|K|^2$ — коэффициент преломления, равный 0,93 для жидкой воды и 0,197 для льда.

Измерения мощности радиолокатора применяются для расчета интенсивности рассеяния целью с использованием уравнения 7.2 в форме:

$$z = \frac{C\overline{P}_r r^2}{|K|^2} \tag{7.3}$$

Метод и трудности приведения коэффициента преломления к величине интенсивности осадков (R) описываются в 7.10.

7.2.5 Рассеяние в безоблачной атмосфере

В регионах без осадкообразующих облаков было обнаружено, что эхосигналы обусловлены, главным образом, отражением от насекомых или большими градиентами показателя преломления в атмосфере (рассеяние Брэгга). Эхосигналы имеют низкую интенсивность и определяются большинством современных радиолокаторов, если они не исключаются посредством пороговой фильтрации данных. Значения, эквивалентные Z_e, для явлений в безоблачной атмосфере, как правило находятся в диапазоне от –55 до –5 дБZ, хотя они и не являются истинными параметрами Z; при этом физические процессы, порождающие эхосигналы, совершенно различны. Для измерения осадков такие эхосигналы являются «шумом» в сигнале. Однако обычно они могут быть связаны с некоторыми метеорологическими явлениями, такими как морской бриз или отток воздуха из зоны грозы, и поэтому они полезны для идентификации областей потенциального возникновения конвекции. Эхосигналы в безоблачной атмосфере также могут быть связаны с очень малыми скоплениями птиц и насекомых. Не является редкой мощность эхосигналов от 5 до 35 дБZ, особенно в периоды миграций (таблица 7.6).

Таблица 7.6. Эффективные площади обратного рассеяния для различных целей

Объект	σ_b ($м^2$)
Воздушное судно	10—1 000
Человек	0,14—1,05
Шар-зонд	0,01
Птицы	0,001—0,01
Пчелы, стрекозы, мотыльки	$3 \times 10^{-6} – 10^{-5}$
Капли воды диаметром 2 мм	$1,8 \times 10^{-10}$

Хотя обычная радиолокационная обработка интерпретирует сигнал в значениях Z, рассеивающие свойства флуктуации показателя преломления существенно отличаются от соответствующих свойств гидрометеоров. Это явление известно также как рассеяние Брэгга. Рассеяние чаще всего выражается в значениях структурного параметра показателя преломления Cn^2. Это мера среднеквадратических флуктуаций показателя преломления как функции расстояния (Gossard and Strauch, 1983).

7.3 УРАВНЕНИЕ РАДИОЛОКАЦИИ ДЛЯ ЦЕЛЕЙ ПРИ НАБЛЮДЕНИИ ЗА ОСАДКАМИ

Метеорологические цели представляют собой частицы льда и/или воды, свободно распределенных в пространстве. Энергия обратного рассеяния от объема цели зависит от количества, размера, состава, относительного расположения, формы и ориентации рассеивающих частиц. Общая энергия обратного рассеяния представляет собой сумму значений энергии обратного рассеяния каждой из рассеивающих частиц.

Используя данную модель цели и теорию электромагнетизма, Probert-Jones (1962 г.) вывел уравнение, связывающее мощность эхосигнала, полученного радиолокатором, с параметрами радиолокатора, расстоянием до целей и характеристиками рассеяния.

Оно является общепринятым в качестве достоверного соотношения и обеспечивает количественный расчет отражаемости с высокой точностью и учетом реальных допущений, и имеет вид:

$$\bar{P}_r = \frac{\pi^3}{1\,024 \ln 2} \cdot \frac{P_t h G^2 \theta_b \phi_b}{\lambda^2} \cdot \frac{|K|^2 10^{-18} Z}{r^2} \tag{7.4}$$

где $\bar{P}_r$ — принятая обратно радиолокатором мощность, осредненная по нескольким импульсам, в ваттах; P_t — пиковая мощность импульса, излучаемого радиолокатором, в ваттах; h — пространственная протяженность импульса, в метрах ($h = c\tau/2$, где c — скорость света и τ — длительность импульса); G — коэффициент направленного действия антенны по отношению к изотропному излучателю; θ_b и ϕ_b — ширина диаграммы направленности антенны соответственно в горизонтальной и вертикальной плоскостях на уровне –3 дБ при передаче в одном направлении, в радианах; λ — длина излучаемой волны, в метрах; $|K|^2$ — коэффициент показателя преломления цели; r — наклонная дальность от радиолокатора до цели, в метрах; и Z — коэффициент преломления радиолокатора (обычно принимаемый равным коэффициенту отражаемости Z_e, когда характеристики цели достоверно неизвестны), в мм$^6 \cdot$м$^{-3}$.

Второй член уравнения содержит параметры радиолокатора, а третий — параметры, зависящие от дальности и характеристик цели. Параметры радиолокатора являются относительно фиксированными, и если при работе передатчика поддерживается постоянная выходная мощность (как это и должно быть), то уравнение можно упростить следующим образом:

$$\bar{P}_r = \frac{C|K|^2 Z}{r^2} \tag{7.5}$$

где C — константа радиолокатора.

Имеется ряд основных допущений, неизбежных при выводе уравнения, значимость которых зависит от конкретного применения и интерпретации результатов. Несмотря на то, что они являются достаточно реалистичными, условия не всегда соответствуют действительности, что при особых условиях будет влиять на результаты измерений (Aoyagi and Kodaira, 1995).

Эти допущения резюмируются следующим образом:

a) частицы осадков, на которых происходит рассеяние в объеме цели, являются однородными диэлектрическими сферами, диаметры которых малы по сравнению с длиной волны, т.е. $D < 0{,}06\,\lambda$ для строгого применения аппроксимаций рассеяния Рэлея;

b) весь импульсный объем заполнен свободно распределенными частицами осадков;

c) коэффициент отражения Z является однородным по всему облучаемому импульсному объему и приблизительно постоянным в течение интервала зондирования;

d) все частицы являются каплями воды или ледяными кристаллами, т.е. все частицы имеют одинаковый коэффициент показателя преломления $|K|^2$, и рассеяние энергии частицами является изотропным;

e) многократное рассеяние (между частицами) пренебрежимо мало;

f) в промежуточной среде между радиолокатором и объемом цели не происходит никакого ослабления;

g) радиолокатор использует линейные поляризации (в основном, H или V);

h) основной лепесток диаграммы направленности антенны имеет гауссову форму;

i) коэффициент направленного действия антенны радиолокатора известен или может быть вычислен с достаточной точностью;

j) вклад боковых лепестков диаграммы направленности антенны в принимаемую мощность пренебрежимо мал;

k) затенение излучаемого сигнала отражениями от наземных объектов на пути луча пренебрежимо мало;

l) пиковая излучаемая мощность (P_t) является фактической мощностью, излучаемой антенной, т. е. учтены все потери в волноводах и т.д., а также ослабление в обтекателе антенны;

m) средняя измеряемая мощность (P_r) осредняется по достаточному числу импульсов или независимых измерений для репрезентативности среднего по импульсному объему цели.

Это упрощенное выражение связывает мощность эхосигнала, измеренную радиолокатором, с коэффициентом преломления радиолокатора Z, который, в свою очередь, связан с интенсивностью осадков. Эти коэффициенты и их взаимосвязь являются исключительно важными для интерпретации энергии, отраженной от цели, и для оценки количества осадков по данным радиолокационных измерений. Несмотря на многие допущения, данное выражение обеспечивает приемлемую оценку массы осадков. Эта оценка может быть улучшена дополнительным учетом факторов, принятых в допущениях.

7.4 СИСТЕМА И ДАННЫЕ ОСНОВНОГО МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКОГО РАДИОЛОКАТОРА

Базовый метеорологический радиолокатор состоит из следующих элементов:

a) антенна для фокусирования излучаемых микроволн в узкий луч и приема отраженной энергии;

b) вышка для поднятия антенны над близлежащими препятствиями;

c) передатчик для излучения энергии в микроволновом частотном диапазоне и модулятора, создающего импульсы и пульсацию;

d) приемник для обнаружения, усиления и преобразования микроволнового сигнала в низкочастотный сигнал;

e) процессор сигнала для извлечения полезной информации из полученного сигнала;

f) система управления радиолокатором и обработки данных в переменные значения радиолокатора;

g) система отображения данных для визуализации информации в доступной форме;

h) система регистрации для архивации данных в целях их использования для обучения, исследования и систематизации.

Базовый метеорологический радиолокатор может быть некогерентным (например, магнетронный передатчик или генератор мощности), т. е. фаза последовательно излучаемых импульсов является случайной. Доплеровские измерения могут производиться в том случае, если фаза излученного импульса измеряется и обратный сигнал обрабатывается по отношению к этой фазе. Это известно под названием когерентного на приеме доплеровского радиолокатора. Когерентный на передаче радиолокатор (например, клистрон, усилитель мощности, твердотельный передатчик

или передатчик на лампе бегущей волны) излучает каждый импульс в одинаковой фазе. Мощность, излучаемая метеорологическим радиолокатором, обычно составляет от нескольких сотен киловатт до мегаватта пиковой мощности, сконцентрированной в импульсе длительностью в микросекунду, при этом средняя мощность обычно равна нескольким сотням ватт. Твердотелые передатчики или передатчики на лампе бегущей волны излучают импульс гораздо меньшей мощности, однако в качестве компенсации они используют длинные импульсы.

7.4.1 **Отражательная способность**

Мощность обратного рассеяния типичного радиолокатора имеет порядок от 10^{-8} до 10^{-15} Вт, охватывая диапазон около 70 дБ от самых сильных до самых слабых целей, которые можно обнаружить. По сравнению с мощностью передатчика эта величина меньшая, более чем на 20 порядков. Для одновременного измерения самых слабых и самых сильных сигналов требуются приемники с широкими динамичными диапазонами (> 90 дБ), и в настоящее время они являются общедоступными (Heiss et al., 1990; Keeler et al., 1995). В прошлом для измерений отражательной способности использовались логарифмические приемники с динамическим диапазоном в 90 дБ. Для доплеровских измерений необходимы линейные приемники (которые поддерживают линейность фазы). В прошлом они имели ограниченный динамический диапазон (40—50 дБ), что требовало автоматической регулировки усиления.

Коэффициент отражаемости является самым важным параметром для интерпретации радиолокационных данных. Этот коэффициент выводится из модели рассеяния Рэлея и теоретически определяется как сумма диаметров частиц (капель), возведенных в шестую степень, в облучаемом объеме:

$$Z = \Sigma_{\text{vol}} N(D)\, D^6 \tag{7.6}$$

где единица измерения Z — мм$^6 \cdot$м$^{-3}$. Во многих случаях, когда количество частиц, их состав и форма неизвестны, определяется эквивалентный или эффективный коэффициент отражаемости Z_e. Например, частицы снега и льда должны описываться эквивалентным Z_e, который равен Z, при допущении о том, что все частицы обратного рассеяния являются сферическими каплями с плотностью ρ.

Интенсивность дождевых осадков выражается формулой:

$$R = \sum_{\text{vol}} N(D) V_T \rho\, \pi / 6\, D^3 \tag{7.7}$$

Однако значение $N(D)$ неизвестно, и были выведены эмпирические соотношения между Z и R; наиболее известным соотношением является соотношение Маршалла-Палмера:

$$Z = 200 R^{1,6} \tag{7.8}$$

В целях охвата диапазона значений общепринятой практикой является работа с логарифмической шкалой или единицами дБZ, которые численно определяются как $\text{dBZ}_e = 10 \log_{10} Z_e$.

Пространственные наблюдения за атмосферой обычно проводятся при помощи сканирования антенной при фиксированном угле места с последующим его увеличением при каждом обороте. Важным аспектом является разрешение целей. Для фокусировки волн в луч конической формы или гауссову форму используются антенны с параболическим отражателем или фазированной решеткой (при помощи сдвига фаз). Более широкие отражатели создают более узкие лучи, имеют более высокое разрешение и чувствительность при более высоких затратах. Ширина диаграммы направленности антенны, часто определяемая по уровню половинной мощности, равна половине мощности на оси, зависит от длины волны и может быть аппроксимирована по формуле:

$$\theta_e = \frac{70\lambda}{d} \tag{7.9}$$

где единицы измерения для θ_e — градусы; d — диаметр антенны в тех же единицах, что и λ. Современные метеорологические радиолокаторы имеют ширину диаграммы направленности антенны 0,5°—1°. Однако лучи с большей шириной практически используемы для применений на малых дальностях.

Полезная дальность действия метеорологических радиолокаторов зависит от вида применения и характера погоды. В зависимости от временного интервала между импульсами (характеризуемого частотой повторения импульсов (ЧПИ)), например 300 импульсов в секунду), максимальный диапазон однозначного определения дальности действия радиолокатора может составлять несколько сотен километров (например 500 км). Однако учитывая траекторию распространения луча и кривизну Земли, луч и, соответственно, импульсный объем характеризуются большой высотой и шириной (например, при дальности в 250 км ширина луча радиолокатора с углом места в 1° составляет 9 км по высоте и 6 км по ширине, рисунок 7.4). Луч может пройти мимо метеорологического явления, импульсный объем может быть не заполнен, а чувствительность радиолокатора может оказаться недостаточной для точного измерения интенсивности осадков. В то же время, если эхосигналы наблюдаются, они покажут весьма интенсивные и опасные грозовые бури или явления погоды. Типовые метеорологические радиолокаторы действуют с максимальной дальностью порядка 250—600 км.

Для проведения надежных количественных измерений осадков полезная дальность радиолокатора с шириной луча 1° составляет порядка 80 км. Чем меньше ширина луча радиолокатора, тем больше эффективный радиус действия (например, при луче шириной 0,65° эффективная дальность равна приблизительно 120 км). На бóльших расстояниях данные должны быть экстраполированы до уровня поверхности земли. Расширение луча и недостаточное заполнение импульсного объема приводят к получению недостаточной информации об интенсивности осадков. Это зависит от погодного режима, а рассмотренные результаты относятся к средним широтам.

7.4.2 **Доплеровская скорость**

Разработка доплеровских метеорологических радиолокаторов и их внедрение в процесс слежения за погодой открыли новые возможности для проведения наблюдений (Heiss et al., 1990). Доплеровский радиолокатор обеспечивает измерение скорости метеорологических целей вдоль радиальной линии. Таким образом, он обеспечивает измерение скоростного компонента ветра в направлении либо к радиолокатору, либо от него.

Обычные скорости метеорологических целей составляют менее 50 м·с$^{-1}$, за исключением случая торнадо/ураганов. Как рассматривалось выше, для оценки доплеровской скорости используются поимпульсные изменения фазы. Если фаза изменяется более чем на ±180°, оценка скорости является неоднозначной. Для однозначного и точного измерения доплеровской скорости метеорологических целей частота повторения импульсов должна быть высокой (меньшие интервалы времени между импульсами), а именно такой, когда максимальная однозначная дальность уменьшается по сравнению с обычным радиолокатором, измеряющим только отражаемость. На более высоких скоростях для получения истинного значения скорости требуются дополнительные этапы обработки сигналов. Максимальная однозначная доплеровская скорость зависит от длины волны радиолокатора (λ) и ЧПИ и может быть выражена следующим образом:

$$V_{\max} = \pm \frac{\mathrm{PRF} \cdot \lambda}{4} \tag{7.10}$$

Максимальную однозначную дальность можно выразить следующим образом:

$$r_{\max} = \frac{c}{\mathrm{PRF} \cdot 2} \tag{7.11}$$

Таким образом, V_{max} и r_{max} связаны уравнением:

$$V_{max} r_{max} = \pm \frac{\lambda c}{8} \tag{7.12}$$

Эти соотношения показывают ограничения, налагаемые выбором длины волны и ЧПИ (см. рисунок 7.5). Для увеличения однозначной скорости желательна высокая ЧПИ; низкая ЧПИ желательна для увеличения дальности действия радиолокатора. До тех пор пока не будет доступна более совершенная технология получения однозначной информации вне этих ограничений, требуется компромисс, связанный с условиями функционирования радиолокатора. Это известно, как доплеровская дилемма и рассматривается далее в разделе настоящей главы, посвященном обработке сигналов и данных. Максимальная однозначная скорость или дальность часто называется скоростью Найквиста или диапазоном Найквиста.

Одним из существенных последствий высоких ЧПИ является то, что за пределами диапазона Найквиста все же часто имеются обнаруживаемые эхосигналы. Эти эхосигналы называются вторичными (или множественными) эхо, поскольку они приходят от ранее излученных импульсов. Если цели являются достаточно сильными, то радиолокатор все же может принимать энергию от этих целей. Однако цели будут неправильно определены в качестве первых обратных эхосигналов, поскольку радиолокатор не может определить, является ли данный эхосигнал результатом текущего или предыдущего импульса, поскольку время или дальность эхосигнала основаны на самом последнем излученном импульсе.

Некоторые доплеровские радиолокаторы являются полностью когерентными; их передатчиками являются генераторы, и они излучают одинаковую фазу последовательных импульсов. В этих когерентных радиолокаторах обычно применяются клистроны, твердотельные или аналогичные передатчики. Поскольку радиолокаторы этих типов излучают одинаковую фазу для каждого импульса, скорость вторичных эхосигналов будут определять различимые средние радиальные скорости. Радиолокатор этого

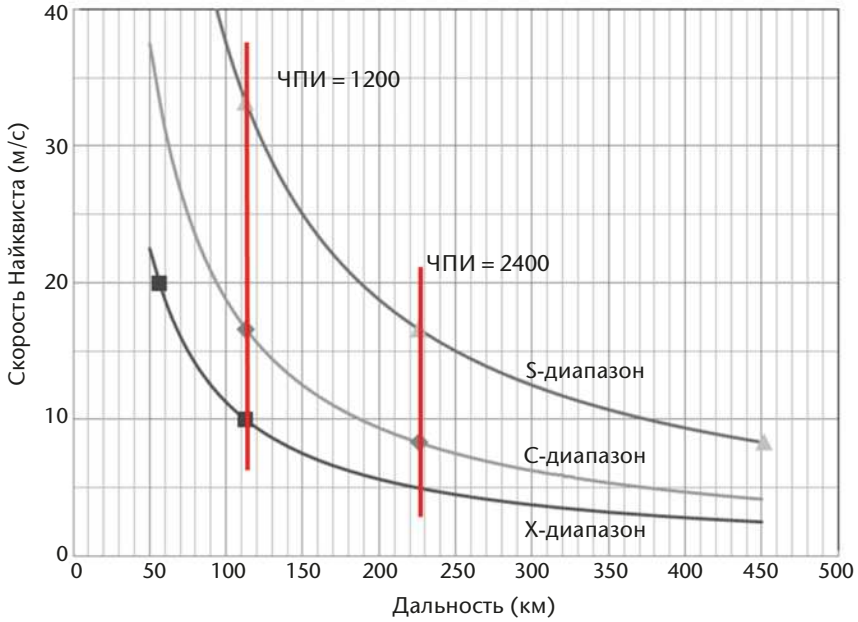


Рисунок 7.5. Это иллюстрация доплеровской дилеммы для трех частотных диапазонов обычных радиолокаторов (X, C, S). Эта дилемма возникает потому, что один из параметров, а именно частота повторения импульсов, т. е. время между излучаемыми импульсами, определяет максимальную однозначную скорость и максимальную однозначную дальность в противоположных направлениях. Маркеры и красные линии показывают общепринятые установочные параметры.

типа не может разделять (без новейшей системы обработки) дальность или скорость эхосигналов со временем запаздывания, превышающим несколько периодов повторения зондирующих импульсов.

У доплеровских радиолокаторов, когерентных на приеме, например с передатчиком с магнетронным усилителем, фаза от импульса к импульсу является случайной. У радиолокатора этого вида фаза самого последнего излученного импульса измеряется и фазы всех эхосигналов сравниваются с ней. Поэтому серия фаз от вторичных эхосигналов с временем запаздывания от 1 до 2 периодов повторения зондирующих импульсов, которые сравниваются с самой последней фазой, будет случайной и проявляться в виде шума в доплеровском спектре. Рисунок 7.6 является смоделированным примером настройки типового радиолокатора С-диапазона. Острый пик на нулевой скорости образуется эхосигналами от стационарных наземных объектов и характеризуется узким распределением мощности. Широкий пик с правой стороны — это эхосигнал от метеорологического объекта. Он шире, чем пик отражений от наземных объектов, поскольку он образуется в результате распределения капель, которые смешиваются. Следует отметить, что «хвост» справа, являющийся результатом влияния метеорологических условий, налагается и появляется с левого края графика. Сигнал колеблется приблизительно на уровне собственных шумов вследствие теплового шума в системе и также в пределах спектра метеорологических условий из-за колебаний, вызываемых смешением целей в виде осадков. При помощи динамической оценки мощности шума эта энергия может быть вычтена из общей мощности для получения более ясной оценки мощности первичных эхосигналов (рисунок 7.7). Это пример, показывающий: a) каким образом отражение от стационарного наземного объекта может фильтроваться благодаря использованию режекторного фильтра нулевой скорости; и b) каким образом вторичные эхосигналы могут фильтроваться посредством использования фильтра шума (показатель качества сигнала).

Для обработки доплеровских параметров используются две системы обработки сигналов разной сложности. В более простой системе обработки пары импульсов (ОПИ) применяется сравнение последовательных импульсов во времени для получения средней скорости и ширины спектра. Во второй и более сложной системе используется процессор, реализующий быстрое преобразование Фурье (БПФ) для получения полного спектра скоростей в каждом облучаемом объеме. Система ОПИ работает быстрее, в ней

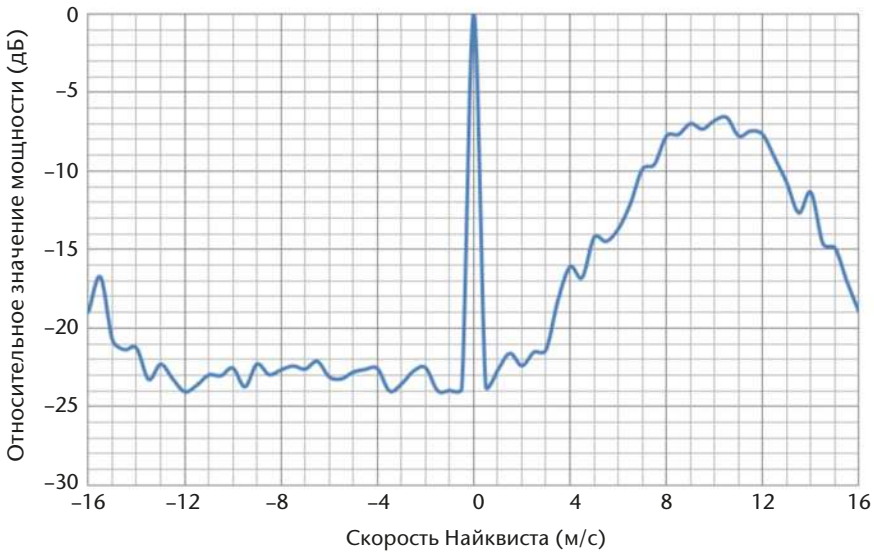


Рисунок 7.6. Этот доплеровский спектр показывает распределение мощности в пределах объема единого радиолокационного импульса как функции доплеровской скорости.

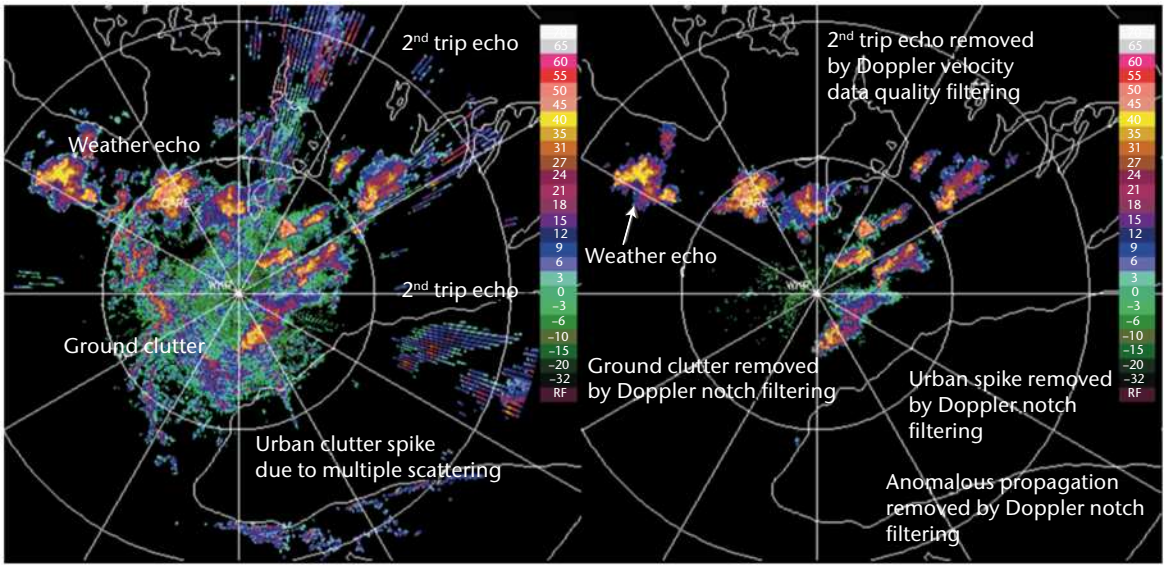


Рисунок 7.7. Современные доплеровские радиолокаторы могут фильтровать неверные данные или отражения от земли на этапе технологической цепочки, связанном с обработкой сигналов. На левом изображении показаны необработанные данные, а на правом — способность фильтрации доплеровского сигнала и обработки данных. На рисунке 7.29 показана возможность многовариантности поляризации для обеспечения качества данных.

производится меньше операций с большим объемом вычислений, и она более надежна при низких соотношениях сигнал-шум, но ее характеристики по устранению помех от отражения наземными объектами хуже, чем у системы БПФ.

7.4.3 Двойная поляризация

В настоящее время используются две основные радиолокационные системы. Одна система излучает волну с круговой поляризацией, и при этом измеряются кополярная и ортогональная поляризации. Другая система излучает попеременно или одновременно импульсы с горизонтальной (H), затем с вертикальной (V) поляризацией, используя при этом переключатель большой мощности. Радиолокаторы с синхронным излучением импульсов H и V не требуют быстрого переключателя. Сложность, связанная с развертыванием микрофизических характеристик эхосигнала, все еще является проблемой, и производство высококачественных систем с круговой поляризацией может быть более дорогостоящим. Система с линейной поляризацией, как правило, предпочтительнее, поскольку получение метеорологической информации требует меньше вычислений и обычные радиолокаторы могут быть легче преобразованы в радиолокаторы с двойной поляризацией. За исключением нескольких ситуаций, переключатель большой мощности зарекомендовал себя в качестве проблематичного для изменения поляризации, в результате чего система синхронной передачи и приема является общепринятой в оперативных радиолокаторах.

Как правило, методика поляризации основана на микроразличиях в рассеивающих частицах. При свободном падении в атмосфере капли дождя приобретают эллиптическую форму с большой осью в горизонтальной плоскости. Сплюснутость капли связана с ее размером. Мощность обратного рассеяния сплюснутого сфероида больше для горизонтально поляризованной волны, чем для вертикально поляризованной, при условии рэлеевского рассеяния. Это также справедливо, что также касается других целей, таких как насекомые, птицы и отражение от наземных объектов.

Таблица 7.2 содержит описание самых общих параметров разнообразных поляризаций. Дифференциальная отражаемость, обозначаемая Z_{DR}, определяется как 10-кратный

логарифм соотношения отражаемости при горизонтальной поляризации Z_H и отражаемости при вертикальной поляризации Z_V. Сравнения эквивалентной отражаемости Z_e и дифференциальной отражаемости Z_{DR} свидетельствуют о том, что осадки можно классифицировать как град, дождь, морось или снег (Seliga and Bringi, 1976).

Поскольку электромагнитная волна распространяется через среду со сплюснутыми частицами, фаза падающего луча изменяется из-за разностей ослабления (приводящих к разностям в скорости распространения) по вертикали и горизонтали. Влияние на вертикальные и горизонтальные компоненты фазы зависит от сплюснутости и учитывается в интегральном параметре, именуемом дифференциальной фазой (φ_{DP}). Если может быть рассчитана соответствующая производная дальности, то можно также оценить конкретную дифференциальную фазу (K_{DP}). Для измерений сильного дождя K_{DP} имеет определенные преимущества (Zrnić and Ryzhkov, 1995). English et al. (1991) продемонстрировали, что для оценки дождевых осадков гораздо лучше использовать K_{DP}, чем Z при интенсивности осадков выше 20 мм·ч$^{-1}$, измеренной в S-диапазоне. Поскольку это является измерением фазы и может быть локализовано или относится конкретно к элементу разрешения по дальности, этот параметр может быть использован для решения проблем калибровки мощности и частичного затенения луча. При большем ослаблении (более короткие длины волн) эффективность этого метода повышается при более низких величинах отражательной способности или интенсивностях осадков.

Соотношение между временными рядами данных о вертикальных и горизонтальных параметрах обеспечивает статистическое измерение отличия профилей рассеивания H и V от гидрометеоров. Следует отметить, что эта статистическая характеристика, и поэтому дождь и снег фактически имеют высокую корреляцию в статистическом смысле, хотя они обладают, по-видимому, совершенно разными характеристиками рассеяния, если исходить из параметров отдельных частиц. Bebbington (1992) ввел для радиолокатора с круговой поляризацией параметр, названный степенью поляризации, который является нечувствительным к эффектам распространения (линейная корреляция также не зависит от эффектов распространения). Этот параметр аналогичен линейной корреляции для радиолокаторов с линейной поляризацией и является, по-видимому, полезным для распознавания целей. Например, его экстремально низкие значения указывают на наличие случайно ориентированных рассеивающих частиц, таких, которые возникают в случае помех, вызванных самолетами или отражениями от наземных объектов (Holt et al., 1993).

7.5 ОБРАБОТКА СИГНАЛА И ДАННЫХ

7.5.1 Доплеровский спектр

Радиолокатор обнаруживает электромагнитную волну, вернувшуюся от цели. Эта волна образуется от всех источников рассеяния, находящихся в облучаемом радиолокатором объеме. Математически волна характеризуется амплитудой и фазой или эквивалентом в виде комплексных чисел в качестве реальных или мнимых частей фазирующего устройства. Это также называется синфазными или квадратурными (I, Q) сигналами. Волна измеряется несколько раз, и результатами являются временные ряды значений I и Q. Если к данным применяется преобразование Фурье, то величина коэффициентов преобразования Фурье представляет собой доплеровский спектр. Доплеровский спектр — это представление автокорреляции временных рядов I и Q в частотно-пространственном диапазоне (Weiner, 1964). Чем больше временных выборок сигналов, тем выше разрешение в домене частот. Процесс обработки во временном домене эквивалентен этому процессу в частотном домене. На рисунке 7.6 показан типичный доплеровский спектр, и он полезен для характеристики различных аспектов информации в едином облучаемом радиолокатором объеме. Уровень шума (интегрированный по всему спектру) представляет собой уровень минимального сигнала или максимум обнаруженного сигнала элементе разрешения по дальности. Пик при нулевой частоте или нулевой скорости — это вклад эхосигналов от неподвижных объектов или отражение от наземных объектов. Более широкий пик обусловлен метеорологической целью.

Следует отметить, что пик при нулевой скорости расширяется в результате движения антенны, плохой стабильностью фазы радиолокационной системы и меньшего количества выборочных измерений. Спектральная ширина отражений от наземных объектов, как правило, меньше спектральной ширины метеорологических эхосигналов и в большинстве случаев может быть использована для отделения эхосигналов от наземных объектов от метеорологических эхосигналов. Область под метеорологическими эхосигналами и над уровнем шума является мощностью метеорологического радиосигнала. Область под спектром отражений от наземных объектов является мощностью, обусловленной отражением от наземных объектов.

7.5.2 Оценка параметра мощности

Гидрометеоры распределяются в пределах объема импульса и перемешиваются относительно друг друга и создают флуктуирующий сигнал. Требуется осреднение для уменьшения дисперсии измерений до допустимых пределов погрешности. Обычно для оценки отражаемости требуется 30 независимых импульсов (Doviak and Zrnić, 1993). Это подразумевает, что необходимо осуществлять дискретизацию импульсов во временные интервалы, превышающие время декорреляции импульсного объема, проводить их дискретизацию в разных по дальности местах или применять какую-либо другую методику (смешение частот).

В оперативном порядке это делается различными способами, в зависимости от применения и основного подхода к процессу обработки. Антенна могла бы медленно осуществлять сканирование, и отражаемость можно было бы оценивать в пределах одного градуса азимута и в пределах объема импульса, или могла бы вращаться быстрее, при этом могло бы применяться осреднение дальности в сигнале или процессоре данных. Помимо этого, сниженное качество данных могло бы быть приемлемым, и на более позднем этапе могло бы применяться осреднение данных.

7.5.3 Отражение от наземных объектов и точечные цели

Отражение может происходить от разнообразных целей, включая здания, холмы, горы, воздушные суда и дипольные отражатели, к примеру это лишь некоторые из них. Правильное расположение радиолокатора является первой линией защиты против эффектов отражений от наземных объектов. Однако эффект отражения всегда присутствует в определенной степени, поскольку стороны основного луча и боковые лепестки взаимодействуют с близлежащей местностью (рисунок 7.8). Луч радиолокатора не является идеально коническим, напротив — он излучается во всех направлениях, хотя основная мощность проходит по линии визира. Ширина луча часто определяется на уровне половинной мощности (–3 дБ мощности вдоль линии визира). Эта конфигурация излучения определяется геометрией рупорного облучателя антенны, расстоянием от фокальной точки, параболической антенной и телескопическими опорами, на которых располагаются рупорный облучатель. Высота первого бокового лепестка (помечено) в большей или меньшей степени определяется этими факторами и часто используется в качестве меры качества антенны. Уменьшение или передвижение этого бокового лепестка по азимуту посредством сдвига рупорного облучателя приводит либо к расширению основного луча, либо к потере мощности.

Интенсивность отражения от наземных объектов обратно пропорциональна длине волны (Skolnik, 1970, 1990), в то время как обратное рассеяние от дождя обратно пропорционально четвертой степени длины волны. Поэтому более коротковолновые радиолокаторы меньше подвержены влиянию отражения от наземных объектов. Эхосигналы отражений от наземных объектов следует исключать при оценке осадков; однако эхосигнал отражения от наземных объектов можно использовать для измерений влажности (Fabry, 2004). Точечные цели, такие как воздушные суда, можно исключить, если они являются изолированными, путем удаления эхосигналов, которые занимают единичный объем элемента разрешения радиолокатора. Метеорологические цели занимают несколько элементов разрешения радиолокатора. Точечные цели могут



Рисунок 7.8. Общая диаграмма направленности излучения антенны. Следует отметить, что ширина антенного луча обычно определяется в точках половинной мощности (50 % или –3 дБ). Если цель обладает высокой отражаемостью, то мощность излучается и принимается со стороны главного лепестка и других боковых лепестков.

быть устранены на этапе обработки данных. Точечные цели, такие как эхосигналы от воздушного судна, совмещенные с эхосигналами от осадков, не всегда можно исключать с помощью данной методики, и это зависит от их относительной силы.

Для устранения отражений от наземных объектов концептуально привлекательная идея заключается в использовании карт отражений. Для построения такой карты используются изображения радиолокационных эхосигналов при отсутствии осадков, которые в дальнейшем вычитаются из радиолокационного изображения, полученного в условиях осадков. Проблема данной методики заключается в том, что очертания наземных помех изменяются во времени. Эти изменения прежде всего связаны со сменой метеорологических условий; самым простым примером является аномальное прохождение эхосигналов, которое длится несколько часов и затем исчезает. Микроизменения в окружающей среде вызывают небольшие флуктуации очертаний эхосигналов от наземных объектов, что вносит путаницу при использовании карт отражений. В адаптивных методиках (Joss and Lee, 1993) предпринята попытка динамически определить контуры помех для учета краткосрочных флуктуаций, но для повсеместного использования они недостаточно исследованы.

В методике доплеровской обработки предпринимается попытка устранить помехи из метеорологического эхосигнала в процессе его обработки. Основные допущения состоят в том, что эхосигнал вследствие мешающих отражений имеет малую спектральную ширину и что помехи являются постоянными. Однако для удовлетворения первых критериев необходимо принять и обработать значительное число импульсов, чтобы достичь спектрального разрешения, достаточного для различения эхосигналов от метеорологического объекта и эхосигналов вследствие мешающих отражений. Выделение метеорологического эхосигнала возможно только при относительно большом интервале Найквиста (см. рисунок 7.6). Спектральная ширина отражений от наземных объектов и эхосигналов от метеорологического объекта, как правило, гораздо меньше 0,5 м·с$^{-1}$ и обычно больше 1 м·с$^{-1}$ соответственно. Поэтому необходимы интервалы Найквиста примерно 8 м·с$^{-1}$. Помеха обычно является стационарной и выделяется на спектре как узкий пик на нулевой скорости (рисунок 7.6). Пик имеет ограниченную ширину, поскольку эхосигнал от наземных целей, таких как раскачивающиеся деревья, несет в себе некоторые соответствующие характеристики движения.

Временная фильтрация для исключения компонента с нулевой скоростью из конечной последовательности осуществляется при помощи цифрового фильтра верхних частот. Ширина и глубина цифрового фильтра, необходимые для обеспечения соответствия отражательной способности, должны предусматриваться для всей области сканирования, и несоответствия являются неизбежными, поскольку отражательная способность изменяется (Zrnić and Hamidi, 1981). Адаптивная спектральная обработка (преобразование Фурье) позволяет определять сигналы отражения от наземных объектов, эвристически определить эхосигнал мешающих отражений и исключить мощность отражения от наземных объектов из суммарной мощности, устраняя таким образом мешающие отражения от наземных помех из эхосигналов от метеорологического объекта, даже если они перекрываются (Passarelli et al., 1981; Crozier et al., 1991; рисунок 7.7). Трудным может оказаться отделение эхосигналов от метеорологического объекта от эхосигналов от наземных помех в тех случаях, когда эхосигнал от метеорологического объекта является узким (как в случаях небольшого снега), а средняя доплеровская скорость близка к нулю. В подобной ситуации может быть удалено слишком много эхосигналов от метеорологического объекта. При узком спектре эхосигнала от метеорологического объекта, как это бывает в случае снега или мороси, режекторный фильтр-нулевик не может отличать мешающие отражения от метеорологических объектов от помех от наземных объектов. Это особенно касается тех случаев, когда антенна быстро вращается, вызывая расширение спектра эхосигналов от наземных объектов, и когда средняя радиальная скорость метеорологического объекта близка к нулю. Удаляется слишком большая мощность, результатом чего является аномальное уменьшение параметра отражаемости (рисунок 7.9, изображение слева). Стрелка показывает то место, где замирание эхосигнала соответствует нулевой линии в изображении радиальной скорости (рисунок 7.9, изображение справа). Это является незначительным недостатком в работе режекторного фильтра доплеровского радиолокатора.

Усовершенствования, связанные с идентификацией эхосигналов мешающих отражений, включают более эффективные методики для идентификации этих сигналов (адаптивная обработка с использованием модели Гаусса) и методы использования текстуры данных (дисперсия отражаемости), связанные с отражениями до применения фильтров помех (Hubbert et al., 2009*a*; Hubbert et al., 2009*b*). Системы без применения доплеровского метода могут использовать эти методы анализа текстуры для удаления помехи у земной поверхности и эхосигналы аномального распространения.

При альтернативном подходе, именуемом «устранение микропомех», используется преимущество наблюдений, связанное с тем, что структуры объектов, вносящих вклад в отражение от наземных объектов, весьма малы по своему размеру (меньше, к примеру,

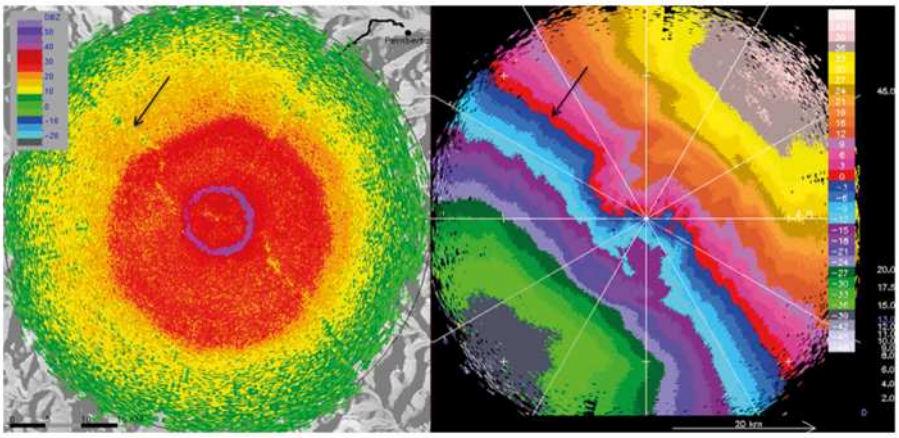


Рисунок 7.9. Режекторная доплеровская фильтрация может удалять слишком много эхосигналов, когда доплеровский спектр метеосигналов узок и при почти нулевой доплеровской скорости (см. стрелку). Эта проблема является незначительной по сравнению с другими ложными сигналами, показанными на рисунке 7.2.

100 м). Определение дальности проводится с очень высоким разрешением (менее 100 м), а помехи определяются при обработке отражаемости и доплеровского сигнала. Осреднение дальности (до конечного разрешения, равного 1 км) выполняется по элементам разрешения по дальности, свободным от радиолокационных помех. Смысл такого приема заключается в обнаружении и игнорировании элементов разрешения по дальности, содержащих отражения от местных предметов, а не в корректировке этих помех (Joss and Lee, 1993; Lee et al., 1995). Это коренным образом отличается от ранее описанных методик, и остается проверить, будет ли эта методика эффективной во всех ситуациях, в частности при аномальном распространении радиоволн, когда помехи являются повсеместными.

Радиолокаторы с поляризацией могут также идентифицировать отражения от наземных объектов, поскольку эти отражения имеют иные поляриметрические характеристики по сравнению с осадками. Помимо этого, могут быть идентифицированы другие виды мешающих целей.

Помехи можно уменьшить путем тщательного выбора места размещении радиолокатора (см. ниже). Радиолокаторы, используемые для наблюдений на больших расстояниях, например, для обнаружения тропических циклонов, или при широко размещенной сети наблюдений, обычно располагают на вершинах холмов, чтобы расширить их полезную дальность, и, вероятно, поэтому они способны отмечать множество эхосигналов мешающих отражений. Простая методика подавления таких помех заключается в автоматическом сканировании при нескольких углах места и в отбраковывании данных, полученных на малой дальности при малых углах места, где существует бóльшая часть помех. При помощи переработки данных радиолокатора в продукцию индикатора кругового обзора постоянной высоты (CAPPI) данные, полученные при малых углах места на малой дальности, выбраковываются автоматически (Marshall and Ballantyne, 1978). На рисунке 7.4 показана геометрическая последовательность сканирования, предложенная Маршаллом и Баллантайном (1978 г.), которая оптимизирована для получения продукции постоянной высоты, такой как CAPPI и эхосигналы целей на большой высоте.

7.5.4 **Решение доплеровской дилеммы**

Качество оценок доплеровской скорости определяется при помощи интервала Найквиста и дискретизации сигналов. Интервал Найквиста (±180°) должен быть достаточно широким для охвата спектра эхосигналов от метеорологического объекта. Как правило, эхосигналы от метеорологического объекта имеют ширину 4—6 м·с$^{-1}$, и поэтому интервал Найквиста должен быть, как минимум, вдвое шире. Может иметь место наложение «хвостов» спектра, однако если сигнал является сильным, то все же можно оценить среднюю скорость.

Для получения статистически стабильной оценки скорости требуется порядка 20–30 выборочных измерений. Необходима корреляция этих измерений, и поэтому их необходимо проводить быстро. Следует отметить, что это требуется в меньшей степени по сравнению с отражаемостью, и теоретически возможно восстанавливать скорость при более низких отношениях сигнал-шум (меньшая сила сигнала) по сравнению с отражаемостью и в более короткий период времени.

Для обнаружения обратных сигналов на разных удалениях от радиолокатора следует периодически, обычно примерно каждую 1 мкс, производить выборку эхосигналов для получения информации приблизительно через каждые 150 м по дальности. Эта выборка может продолжаться до тех пор, пока не наступит время передачи следующего импульса (приблизительно каждую 1 мс). Элемент дискретизации во времени (соответствующий расстоянию от радиолокатора) называется селектором дальности. Интервал между излучением импульсов определяет максимальную однозначную дальность. Длина волны в сочетании с интервалом излучения сигнала определяет максимальную однозначную скорость. Длины волн метеорологических радиолокаторов и метеорологические сценарии характеризуются конфликтом этих максимальных параметров, и это называется доплеровской дилеммой, поскольку увеличение одного показателя приводит к

уменьшению другого. Это показано на рисунке 7.5. Таким образом, фундаментальная проблема использования любого импульсного доплеровского радиолокатора заключается в смягчении воздействий факторов ограниченной дальности и скорости.

К общепринятым методикам уменьшения ограничения скоростей или разделения скоростей относятся методика множественной ЧПИ (Doviak and Zrnić, 1993; Crozier et al., 1991) или методика непрерывности (Eilts and Smith, 1990). В первой из них оценки радиальной скорости определяются на двух или нескольких разных ЧПИ с различными максимальными однозначными скоростями и объединяются для получения новой оценки радиальной скорости с расширенной однозначной скоростью. Например, радиолокатор С-диапазона, использующий ЧПИ, равные 1 200 и 900 Гц, имеет номинальные однозначные скорости 16 и 12 м·с$^{-1}$ соответственно. Величина наложения может быть вычтена из разницы между двумя оценками скорости для разделения скорости в расширенном диапазоне скорости Найквиста, равном ±48 м·с$^{-1}$. На рисунке 7.10 показано то, каким образом метод двойной ЧПИ способен расширить однозначную скорость. Наверху графика показано то, что доплеровский радиолокатор способен измерять в качестве функции реальной радиальной скорости (от –48 до 48 м·с$^{-1}$). В этом примере ЧПИ приводятся в соотношении 4:3; возможны другие соотношения, такие как 7:5 и 3:2. В нижней части графика представлено уникальное различие в измеряемых доплеровских скоростях в качестве функции реальной радиальной скорости. Исходя из этой разности, может быть определено кратное число и может быть выведена реальная скорость. Предел выведения определяется однозначными скоростями Найквиста и их соотношением. Этот предел называется расширенной скоростью Найквиста и в данном случае равен 48 м·с$^{-1}$. На рисунке 7.11 приводится пример результатов, полученных с использованием этой методики.

Обычно используемыми комбинациями соотношений ЧПИ являются 5:4, 4:3 или 3:2. Как правило, используется максимальная однозначная скорость 16 м·с$^{-1}$, хотя это не является

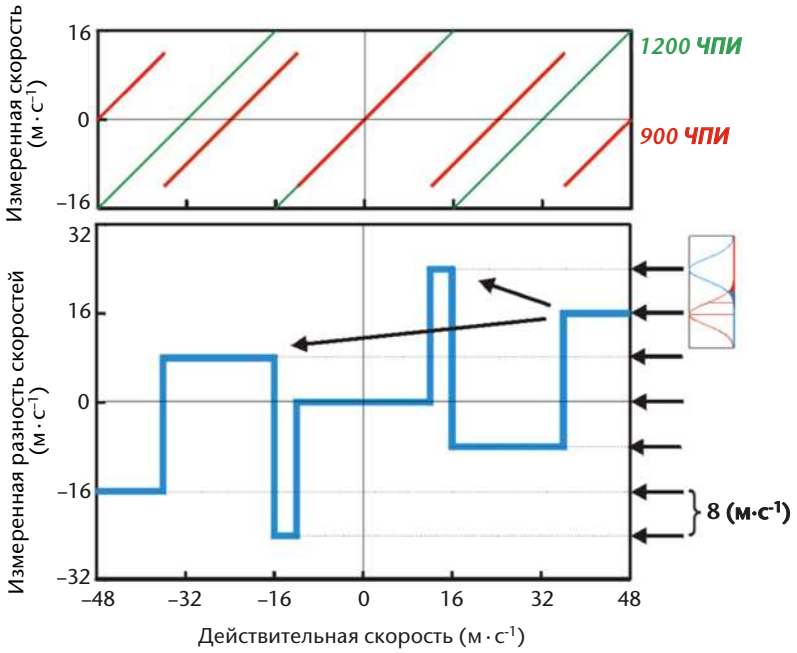


Рисунок 7.10. Это пример радиолокатора С-диапазона, работающего в импульсном режиме 900 и 1 200 с$^{-1}$ при однозначных скоростях Найквиста 12 и 16 м·с$^{-1}$ соответственно. В основе данного метода лежит разность между измеренными радиальными скоростями (ордината на нижнем изображении), служащая для определения кратного числа (абсцисса на нижнем изображении) и его последующего использовании с соответствующей измеренной радиальной скоростью для оценки истинной радиальной скорости.

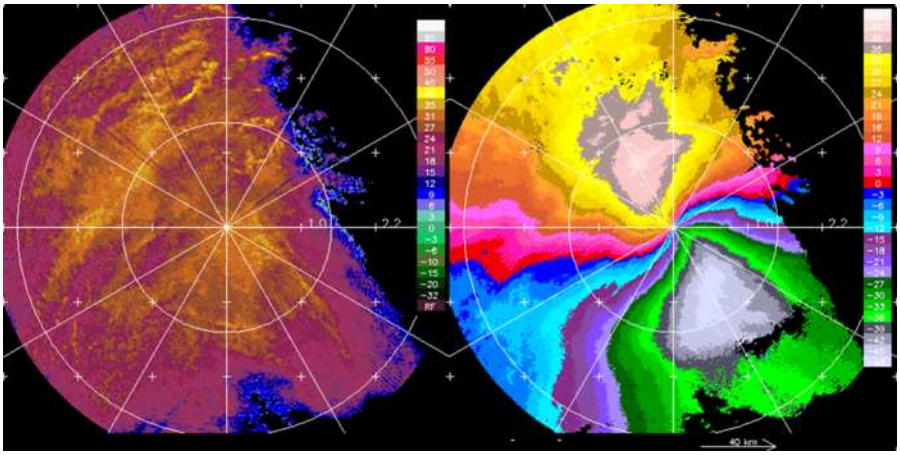


Рис. 7.11. На этом рисунке показана необходимость и способность увеличения скорости радиолокатором С-диапазона по меньшей мере до 48 м·с$^{-1}$. Речь идет в данном случае об урагане/внетропическом переходном участке траектории и скоростях порядка 48 м·с$^{-1}$. В подобной ситуации соблюдаются допущения, предусмотренные методом использования частоты повторения двойных импульсов (две измеренные расчетные скорости на разных ЧПИ являются производной той же самой радиальной скорости), и результат характеризуется незначительным шумом (изображение справа, сравнить с рисунком 7.20).

строгим требованием. Результатом более низких скоростей будут бóльшие максимальные дальности. Разница в использовании различных соотношений заключается в том, что дисперсия средней скорости приводит к нарушению предположения о единообразной скорости и возникновению «ошибок двойной ЧПИ» (Joe and May, 2003).

Методика непрерывности основана на наличии эхосигнала, достаточного для обнаружения наложенных скоростей и их корректировки при допущении о непрерывности скорости (нет разрывов больше $2V_{max}$). Кратные числа определяются, начиная от нулевой линии, и во всех случаях, когда встречается прерывание интервала Найквиста, это кратное число увеличивается или уменьшается, а интервал Найквиста добавляется или вычитается.

Второй фундаментальной проблемой является ограничение по дальности, налагаемое использованием высоких ЧПИ (около 1 000 Гц и более). Эхосигналы с расстояний, превышающих максимальную дальность, будут совмещаться с сигналами первоначальной дальности. Для радиолокаторов с когерентными передатчиками (например, клистронные или твердотельные системы) эхосигналы окажутся в пределах первоначальной дальности. Для систем, когерентных на приеме, вторичные эхосигналы будут проявляться как шум (Joe et al., 1995; Passarelli et al., 1981; рисунок 7.12). Для последней системы этот шум является результатом случайно излученных фаз сигналов. Доплеровские радиолокаторы с их короткой дальностью Найквиста подвержены воздействию помех в виде вторичных эхосигналов независимо от того, являются ли они когерентными на приеме (магнитронными) или когерентными на передаче (клистронными). На рисунке 7.12 с магнитронного радиолокатора С-диапазона вторичный сигнал проявляет себя в виде клинообразных эхосигналов в отражаемости (черные стрелки), и это может быть использовано для их идентификации. В поле радиальной скорости данные характеризуются шумом (желтые стрелки), и это может быть использовано на этапе обработки сигналов для их устранения, поскольку их доплеровский спектр является весьма широким, повышая уровень шума. Если эти данные были получены радиолокатором клистронного типа, то радиальная скорость появится в виде когерентных данных.

Методы фазового кодирования были разработаны для когерентных доплеровских радиолокаторов, с тем чтобы различать вторичные эхосигналы. Обработка может производиться в отношении текущего импульса первичного эхосигнала и предыдущего

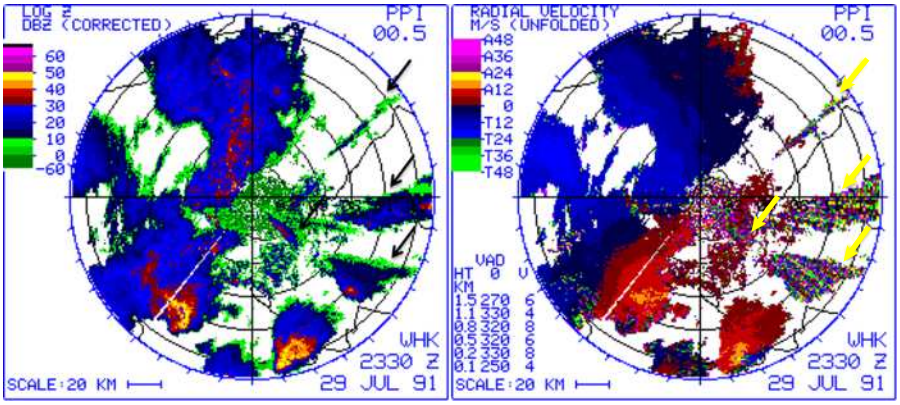


Рисунок 7.12. Пример вторичных эхосигналов, связанных с отражаемостью (слева) и радиальной скоростью (справа), для магнетронного радиолокатора.

импульса для вторичного эхосигнала. Это называется обработкой случайной фазы. Она является эффективной, если чувствительность радиолокатора является хорошей (низкой), с тем чтобы вторичный эхосигнал можно было обнаружить выше уровня шума, а также, если стабильность фазы является хорошей (низкой), с тем чтобы можно было восстанавливать фазу или скорость на дальних расстояниях. Для когерентных передатчиков может генерироваться псевдослучайная последовательность. В большей степени лучшим способом является модуляция фазы известным способом для точного отделения первичного эхосигнала от вторичного. Frush et al. (2002) разработали эту методику для клистронных систем.

В когерентной на приеме (например, магнетронной) системе вариация фазы является неявно случайной. В когерентной на передаче (например, клистронной) системе вариация фазы налагается модулятором контролируемым образом. Примером является фазовый модулятор SZ2, используемый в системе WSR-88D США. На рисунке 7.13 приводятся два примера (a-d, e-h) для иллюстрации преимуществ и ограничений методики случайной фазы. Изображения 7.13(a) и 7.13(e) приводятся с низкой ЧПИ и показывают «истину». Изображения 7.13(b) и 7.13(f) получены при помощи методики случайной фазы. Демаркация границы между первичным–вторичным эхосигналами показана белой стрелкой. Разрыв определяется тем, что во время передачи импульса приемник выключается. На изображениях 7.13(a-d) линия шквала не достигла радиолокатора. Эхосигналы вблизи радиолокатора являются слабыми относительно эхосигналов на дальних расстояниях, и данная методика хорошо срабатывает, поскольку восстанавливается бóльшая часть вторичного эхосигнала (сравните 7.13(a) с 7.13(b)). На изображениях 7.13(e-h) часть системы осадков достигла радиолокатора, и поэтому вблизи радиолокатора имеются относительно сильные эхосигналы по сравнению с эхосигналами на больших расстояниях. Данная методика действует менее эффективно из-за большого количества эхосигналов, которые не восстанавливаются (сравните 7.13(e) с 7.13(f)). При применении этой методики возможно использование данных только одной ЧПИ, а скорость Найквиста равна 16 м·с$^{-1}$ (изображения 7.13(c) и 7.13(g)). Данные двойной ЧПИ с расширенной скоростью Найквиста в 48 м·с$^{-1}$ показаны на изображениях 7.13(d) и 7.13(h). В случае наложения хорошо подготовленный аналитик может все же интерпретировать и эффективно использовать данные одной ЧПИ. Например, на изображении 7.13(c) можно наблюдать «заключительный вихрь» (белые и черные стрелки). Соответствующие изображения отражаемости — это внутренние (первичный эхосигнал) части изображений 7.13(b) и 7.13(f). Важным аспектом обработки случайной фазы является то, что первичный эхосигнал будет характеризоваться более высоким качеством данных, поскольку осуществляется фильтрация воздействий вторичного эхосигнала.

Предыдущая методика использует радиолокатор наблюдения с низкой ЧПИ для определения местоположения отраженного эхосигнала. Затем, когда происходит дублирование эхосигналов в доплеровском режиме при меньшей дальности, мощность и скорость эхосигнала определяются местом с большей отражательной способностью

(рисунок 7.14). Это срабатывает, если мощность значительно отличается (> 5 дБ). Радиолокатор с большой дальностью обзора используется для выявления места отраженного эхосигнала. Доплеровский радиолокатор малой дальности используется для измерения доплеровской или радиальной скорости. Радиальная скорость определяется по отраженному эхосигналу наибольшей мощности. Если мощности каждого из этих сигналов находятся в пределах 5 дБ, то данная методика не работает эффективно и данные радиальной скорости не восстанавливаются и обозначаются как умноженная дальность. Они отмечены белым цветом на рисунке 7.14. Используются некоторые цветные схемы, на которых эти эхосигналы обозначены пурпурным цветом, и поэтому их часто называют «пурпурной мглой».

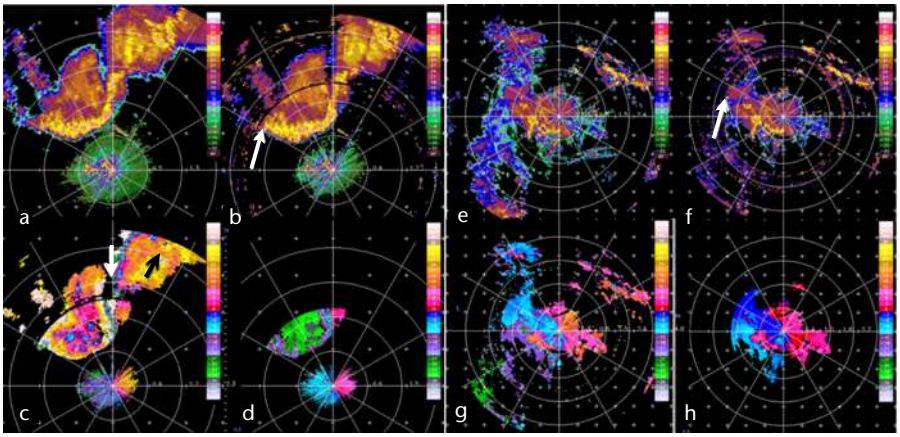


Рисунок 7.13. Пример увеличения дальности обнаружения с использованием случайной фазы: Пример слева (a-d) показывает ситуацию, при которой первичный эхосигнал является слабым, а вторичный сигнал в значительной степени может быть восстановлен. В правой части этого примера (e–h) показан сильный первичный эхосигнал, который исключает возможность восстановления вторичного эхосигнала.

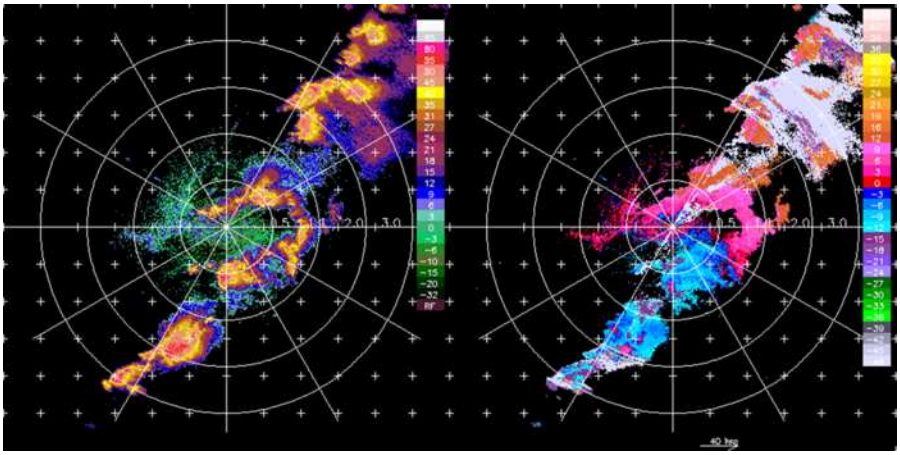


Рисунок 7.14. Для восстановления вторичного эхосигнала применяется множество методик, связанных с ЧПИ, при этом не проводится дополнительная обработка кодированного по фазе сигнала. Для пространственной локализации интенсивности эхосигнала используются сканирования с низкой ЧПИ, действующие на большой дальности. Для измерения радиальной скорости используется сканирование с высокой ЧПИ, но на малом расстоянии. Радиальная скорость привязана к элементу разрешения по дальности при наивысшей мощности.

Для одновременного ограничения обеих проблем может быть использована комбинация множества ЧПИ и методики фазового разнообразия (WMO, 2012; Yamauchi et al., 2013).

7.6 ОПТИМИЗАЦИЯ ХАРАКТЕРИСТИК РАДИОЛОКАТОРА

7.6.1 Выбор радиолокатора

Радиолокатор является высокоэффективной наблюдательной системой. В то же время, эффективность любого конкретного радиолокатора и радиолокационной системы определяются конкретным применением, климатическими условиями, местной окружающей средой (затенение) и структурой сети. Любая характеристика радиолокатора требует компромиссного решения. Ни один радиолокатор не может быть спроектирован таким образом, чтобы быть максимально эффективным для всех видов наблюдений. Можно опытным путем выбрать характеристики для достижения максимальной эффективности, с тем чтобы наилучшим образом соответствовать нескольким видам наблюдений, таким как обнаружение торнадо или обнаружение снежного шквала, но не для всех применений (по сравнению с наблюдениями на больших расстояниях). Существенным соображением являются финансовые затраты. Большинство взаимосвязей можно проследить из уравнения радиолокации дальности.

Важным соображением является структура радиолокационной сети и вид применения. Радиолокационные сети X-диапазона предлагаются для разнообразных локальных применений, когда требуется дальность порядка 50 км или меньше и когда исключительно важной является зона охвата на низком уровне, например, снежный шквал низкого уровня, обнаружение торнадо, обнаружение микропорыва, сложная местность (гористая), городская гидрология и, возможно, смягчение воздействий ветроэнергетических установок. Изначальная цель этих сетей заключалась в адаптивном зондировании атмосферы для многочисленных видов применений — от погоды до управления воздушным движением. Этот процесс осуществляется в сочетании с работой антенны с фазированной решеткой, которая обладает способностью к ориентации и может осуществлять совместное сканирование (McLaughlin et al., 2009). Инновационный характер этой технологии заключается в низких требованиях в плане инфраструктуры антенны с фазированной решеткой, которую можно монтировать на стене здания или на имеющейся вышке.

7.6.2 Длина волны и ширина луча

Чем больше длина волны, тем выше стоимость радиолокационной системы, в частности антенна оценивается по сопоставимым параметрам ширины луча (т.е. разрешение). Это связано как с увеличением количества расходного материала, так и со сложностями обеспечения соответствия допускам при увеличении размера. В пределах диапазонов, представляющих интерес для метеорологических радиолокаторов (S, C и X), чувствительность радиолокатора или его способность обнаруживать цель в значительной степени зависит от длины волны. Однако эта зависимость уменьшается в практическом плане за счет мощности передачи сигнала. Она также тесно связана с размером антенны, который влияет на коэффициент направленного действия антенны, ширину луча и заполнение луча. Для таких специализированных применений, как обнаружение тумана или облачности, доступными становятся радиолокаторы с меньшей длиной волны (35 ГГц и 94 ГГц), или они используются с платформ космического базирования для проведения измерений параметров облачности или осадков (например, Проект по измерению осадков в тропиках (TPMM); Глобальное измерение осадков (ГПМ); CloudSat; и спутник для изучения облаков, аэрозолей и радиации Земли (EarthCARE)).

Параметры дальности доплеровского радиолокатора в радиолокационной сети имеют большое значение для выбранной длины волны. При одинаковой скорости Найквиста S-диапазон будет иметь двойной частотный диапазон Найквиста по сравнению с

радиолокатором С-диапазона и соответственно будет в значительной мере влиять на обеспечение однозначного охвата. Этот эффект может быть ослаблен благодаря рассмотренной ранее методике, связанной со скоростью и расширением диапазона.

Ослабление радиолокационных лучей наиболее значительно в дожде, меньше — в снеге и на ледяных кристаллах, и еще меньше — в облаках и атмосферных газах. В более широком смысле ослабление в S-диапазоне относительно незначительное. Радиолокатор S-диапазона, несмотря на его стоимость, имеет существенное значение при сканировании целей с очень высокой отражаемостью в сильных штормах с градом в умеренных и субтропических широтах. Ослабление у радиолокаторов X-диапазона может быть сильным на коротких дистанциях.

Значительный недостаток состоит в том, что более короткие волны ослабляются гораздо сильнее. Еще остается убедиться в том, может ли методика двойной поляризации K_{DP} компенсировать ослабление до того, как произойдет полное ослабление (что случается весьма нечасто), и оправданным ли является игнорирование ослабления в S-диапазоне. Если методика K_{DP} окажется более эффективной для оценки осадков по сравнению с методикой расчета радиолокационной отражаемости, то волна меньшей длины является более чувствительной к ослаблению и поэтому может оказаться более эффективной.

Радиолокационный сигнал может быть полностью утерян в С- и X- диапазонах, особенно, если обтекатель антенны является влажным. Хотя это может показаться катастрофическим, ключевой вопрос заключается в том, приводит ли потеря сигнала (как правило, на десятки минут в случае распространяющегося шторма) к фактическому отсутствию предупреждений о суровом шторме или оповещения о быстроразвивающемся бурном паводке. Опыт показывает, что предупреждения будут уже, как правило, выпущены, а потеря одного или двух элементов данных не является катастрофической ситуацией для гидрологических целей.

7.6.3 Передатчики и мощность излучения

Возможность обнаружения цели непосредственно связана с пиковой выходной мощностью радиолокационного импульса. Однако имеются практические ограничения для величины выходной мощности, которые диктуются технологией мощных генераторных ламп. Неограниченные увеличения мощности не являются самым эффективным средством повышения возможности обнаружения цели. Например, удвоение мощности повышает чувствительность системы только на 3 дБ. Технически максимально возможная выходная мощность возрастает с увеличением длины волны и ширины импульса. Улучшения, связанные с дискретизацией, чувствительностью приемника, коэффициентом усиления антенны, шириной импульса и выбором длины волны, могут быть более действенными средствами увеличения способности радиолокатора обнаруживать цели.

Широко распространенными источниками энергоснабжения являются магнетроны и клистроны. Магнетроны являются менее дорогостоящими, но они являются генераторами электропитания, и поэтому менее стабильны по частоте. Многие доплеровские радиолокаторы выполнены в настоящее время на магнетронах и при наличии коаксиальных магнетронов и цифровой технологии фазовый шум этих систем может быть сопоставим с шумом клистронных систем. Благодаря меньшему фазовому шуму обеспечивается бóльшая возможность для подавления мешающих отражений (рисунок 7.15). Фазовый шум менее 0,5° — это минимальный уровень эффективности работы современных радиолокаторов. При нормальных рабочих длинах волн типовые радиолокаторы должны обнаруживать осадки с интенсивностью порядка 0,1 мм·ч$^{-1}$ на расстоянии 200 км и иметь пиковые выходные мощности порядка 250 кВт и 1 000 кВт или больше в С-диапазоне и S-диапазоне соответственно.

В последнее время оперативно устанавливаются твердотельные передатчики. Благодаря им рассчитывают обеспечить меньший объем технического обслуживания при высокой надежности технологии твердотельной электроники, прекрасную

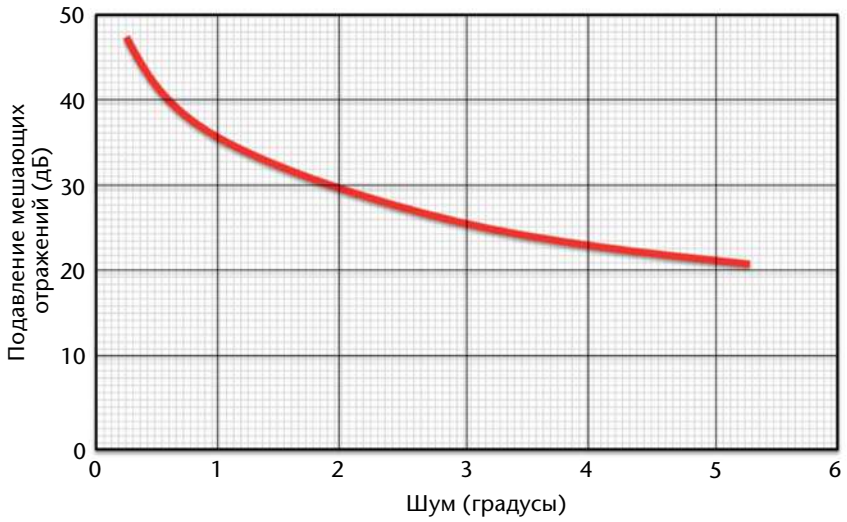


Рисунок 7.15. Когерентность (фазовый шум) — это мера качества работы доплеровского радиолокатора, и она непосредственно связана со способностью удалять помехи, вызванные отражением от земной поверхности, и способностью восстанавливать вторичные эхосигналы, используя методику кодирования по фазе.

фазовую стабильность и электронную стабильность для проведения измерений с двойной поляризацией. Твердотельные передатчики, как правило, обладают низкой мощностью и требуют множества длинноволновых импульсов и компрессии импульсов для достижения требуемых параметров чувствительности. Они представляют собой комбинацию импульсных радиолокаторов и радиолокаторов с частотной модуляцией — незатухающими колебаниями. Проблемой являются боковые лепестки по дальности в том, что касается схем модуляции с компрессией импульсов, и еще предстоит установить, являются ли они значимыми в случае метеорологического применения.

7.6.4 Длительность импульса

Длительность импульса определяет разрешающую способность радиолокатора по дальности. Разрешающая способность по дальности, или способность радиолокатора различать две отдельные цели, пропорциональна половине импульса в пространстве. У большинства клистронов и магнетронов максимальное отношение ширины импульса к ЧПИ составляет около 0,001. Обычная длительность импульса находится в пределах от 0,3 до 4 мкс. Длительность импульса в 2 мкс соответствует разрешающей способности в 300 м, а импульс длительностью 0,5 мкс может иметь разрешение в 75 м.

При допущении о том, что импульсный объем заполнен целью, удвоение длительности импульса повышает чувствительность радиолокатора на 6 дБ при использовании соответствующей приемнику фильтрации, хотя при этом уменьшается разрешение; сокращение длительности импульса снижает чувствительность, хотя при этом повышается разрешение. Импульсы с меньшей длительностью позволяют получать более независимые данные зондирования цели в пределах дальности действия и обеспечивают потенциал для повышения точности оценки.

7.6.5 Частота повторения импульсов

Для получения максимального числа измерений цели в единицу времени ЧПИ должна быть настолько высокой, насколько это практически осуществимо. Исходным ограничением ЧПИ является нежелательное обнаружение вторичных эхосигналов. Большинство радиолокаторов, измеряющих только отражаемость, имеют однозначные дальности, превышающие полезную дальность метеорологических наблюдений,

осуществляемых радиолокатором. Важным ограничением полезной дальности обнаружения метеорологической цели является значительная высота луча над земной поверхностью даже на дальности 250 км.

В доплеровских радиолокационных системах высокие ЧПИ (~1 200 $с^{-1}$) используются для повышения предела однозначного измерения доплеровской скорости. Результатом этого является доплеровская дилемма, когда принимается компромиссное решение между такими параметрами, как максимальная дальность и максимальная скорость. Фактор ЧПИ не связан со значительными финансовыми расходами, но сильно влияет на эффективность работы системы. Вкратце, высокая ЧПИ желательна для увеличения количества измерений, повышения максимальной однозначно измеряемой скорости и получения возможно более высоких скоростей сканирования. Низкие ЧПИ (~300 $с^{-1}$) желательны для увеличения максимальной однозначной измеряемой дальности и обеспечения оптимального режима работы.

7.6.6 Антенная подсистема

Для получения сфокусированного узкого конического луча в метеорологических радиолокаторах обычно используется параболическая антенна с рупорным облучателем. Тремя важными характеристиками являются ширина луча (угловое разрешение), коэффициент усиления антенны и боковые лепестки. Для общепринятых метеорологических радиолокаторов размер антенны увеличивается с ростом длины волны с фиксированной шириной луча и с уменьшением ширины необходимого луча. Для обычной цели ширина луча антенны метеорологического радиолокатора составляет 1°, хотя в своей основе это число не является чем-то особенным.

В ходе научных исследований ведется изучение методик, связанных с антеннами с фазированной решеткой, и в настоящее время эти антенны, работающие в X-диапазоне, являются доступными по приемлемым ценам. Эти антенны состоят из излучающих элементов с управляемой фазой, которые формируют луч. Могут быть разработаны адаптируемые стратегии сканирования для конкретных целей или обусловленные свойствами цели, благодаря которым может быть теоретически обеспечено быстрое сканирование или соблюдены требования к высокому качеству данных, однако это еще предстоит продемонстрировать в ходе практической работы. Исключение отражений от местных наземных объектов может быть высшего качества, поскольку эти системы не сканируют, а фактически совершают моментальный обзор по каждому азимуту, и таким образом не происходит размытия лучом эхосигналов, отраженных от земной поверхности.

Размер антенны и ширина луча

Ширина луча метеорологических радиолокаторов обычно находится в пределах 0,5–2°. Для луча шириной 0,5 и 1° в C-диапазоне диаметр зеркала антенны составляет как минимум 7,1 и 3,6 м соответственно; в S-диапазоне — 14,3 и 7,2 м. С увеличением размеров зеркала антенны цена антенной системы и ее платформы резко возрастает. Существуют также технически реализуемый и стоимостной пределы. Кроме того, соответствующим образом должна быть выбрана опора, которая сможет выдержать вес антенны.

Требование обеспечения узкого луча для максимального разрешения и увеличения вероятности заполнения луча целью является особенно критичным с ростом дальности. Для луча в 0,5° азимутальная (и вертикальная) ширина сечения луча на дальности 50, 100 и 200 км составляет 0,4, 0,9 и 1,7 км соответственно. Для луча в 1° этот параметр соответственно равен 0,9, 1,7 и 3,5 км. Также при таких относительно узких лучах их ширина на больших расстояниях существенно возрастает.

Коэффициент усиления антенны также обратно пропорционален ширине луча, и поэтому более узкие лучи повышают чувствительность системы при помощи этого коэффициента, равного дифференциальному коэффициенту усиления. Оценки отражаемости и осадков требуют установленного минимального количества зондирований цели для обеспечения приемлемой точности измерений. Следовательно, луч должен иметь достаточное время задержки на цели при эксплуатации в режиме кругового сканирования. Таким образом, существуют пределы скорости вращения антенны. Уменьшение цикла сканирования будет иметь последствия. Для значимых измерений распределенных целей их частицам необходимо время, достаточное для смены положения перед проведением независимой оценки. В основном системы сканируют в диапазоне скорости вращения антенны примерно 0,5–6 об/мин.

Большинство метеорологических радиолокаторов с одной поляризацией являются линейно поляризованными, с горизонтально либо вертикально направленным вектором излучаемого электрического поля. Причины предпочтения горизонтальной поляризации заключаются в следующем: (a) эхосигналы от поверхности моря и земли обычно меньше при горизонтальной поляризации; (b) меньшие размеры по горизонтали боковых лепестков диаграммы направленности обеспечивают более точные измерения по вертикали; и (c) бóльшее обратное рассеяние от дождя в связи с эллиптичностью падающих капель. Однако при малых углах места антенны лучшее отражение горизонтально поляризованных волн от плоских поверхностей на земле может привести к нежелательному эффекту, зависящему от дальности.

В большинстве, если не во всех, оперативных радиолокаторах с двойной поляризацией применяется режим излучения STAR с равной мощностью при двух ортогональных линейных поляризациях (обычно горизонтальной и вертикальной). Это исключает необходимость использования часто выходящего из строя мощного переключателя поляризации.

7.6.7 Подсветка

Неотъемлемой характеристикой любой антенны являются боковые лепестки диаграммы направленности. Боковые лепестки охватывают также стороны главного лепестка. Ширина луча обычно определяется на уровне половинной мощности основного луча, и мощность присутствует на угловых расстояниях от основного луча. Основными элементами, влияющими на боковые лепестки, являются рупорный облучатель антенны и его опорные стойки. Опорные лепестки могут ослабляться в результате чрезмерной подсветки тарелки, однако результатом этого являются более широкий луч и меньшая чувствительность.

Таким образом, малая ширина луча влияет на чувствительность системы, ее способность обнаруживать цели, горизонтальное и вертикальное разрешение, эффективную дальность действия и точность измерения. Основным ограничением для использования малой ширины луча являются расходы. По этим причинам самая малая допустимая ширина луча, как доказано, значительно повышает полезность радиолокатора (Crozier et al., 1991).

7.6.8 Стандартные характеристики метеорологических радиолокаторов

Стандартные характеристики радиолокаторов, в основном используемых в метеорологической практике, приводятся в таблице 7.7.

Как указывалось, характеристики и параметры радиолокатора являются взаимозависимыми. Технические ограничения для компонентов радиолокатора и доступность промышленно производимых компонентов являются важными обстоятельствами при проектировании радиолокационных систем.

Таблица 7.7. Технические характеристики обычных метеорологических радиолокаторов

Тип	*S*	*S*	*S*	*S*	*C*	*C*	*C*	*C*	*C*	*X*
Частота (ГГц)	2 800—3 000	2 700—3 000	2 700—3 000	2 700—3 000	5 400—5 900	5 600—5 650	5 600—5 650	5 500—5 700	5 300—5 850	9 300—9 500
Длина волны (см)	10,7	10,7	10,7	10,7	5,3	5,3	5,3	5,3	5,3	3
Максимальная мощность (кВт) на канал	475	850	750	20	500	1 000	250	250	12	75
Длительность импульса (мкс)	1,57, 4,5	0,2—2,0	0,4—4,5	0,5—200	0,2—3,0	0,4—4,5	0,4—4,5		0,5—200	0,3—3,3
ЧПИ (/с)	318—1 403, 318—452	200—2 400	250—2 000	100—20 000	200—2 400	200—2 400	250—2 000		100—20 000	250—3 000
Мин. дБZ на 50 км	–28,7	–15,5		–5,5	–17,5	–19,5		–15	–5	
МДС (дБм)	–113	–114	–114	–114	–114	–114	–114	–115	–114	–113
Динамическая дальность приемника (дБ)		105	115	110	105	105	115	99	110	90
Диаметр антенны (м)	8,53	8,5	8,5	8,5	4,2	4,2	4,2	4,5	4,2	2,4
Ширина луча (градусы)	1	0,95	1	0,95	0,95	0,95	1	1	0,95	1,05
Коэффициент усиления антенны (дБ)	45	45	44,5	45	45	45	44,5	45	45	44,5
Поляризация	Горизонтальная	STAR	STAR	STAR	Двойная линейная	Двойная линейная	Двойная линейная	Двойная линейная	STAR	Двойная линейная
Максимальная скорость вращения (об/мин)	6	10	6	6	10	10	8	6,7	6	6
Тип передатчика	клистрон	коаксиальный магнитрон	клистрон	твердотельный	коаксиальный магнитрон	клистрон	клистрон	коаксиальный магнитрон	твердотельный	коаксиальный магнитрон
Подавление пассивных помех	50	46	55	55	46	46	55	55	55	

Радиолокаторы типа «только Z» являются некогерентными импульсными радиолокаторами, которые использовались десятилетиями. Доплеровские радиолокаторы относятся к современному поколению радиолокаторов, которые открывают новые возможности применения. Они обеспечивают оценки радиальной скорости. Для более эффективного обнаружения мелкомасштабных микровихрей и торнадо по очень ограниченным районам были разработаны специализированные доплеровские радиолокаторы, например для защиты аэропортов. Ведется установка радиолокаторов с двойной поляризацией и свой путь к внедрению в оперативную практику находят их применения, предназначенные для обеспечения качества данных, классификации целей и количественной оценки осадков, включая гидрологию, численное прогнозирование погоды и исследования изменения климата.

7.6.9 Стратегия радиолокационного сканирования по объему

Большинство современных радиолокаторов автоматически выполняют сканирование по объему, включающее в себя ряд полных вращений антенны по азимуту при нескольких углах места. Это называется стратегией сканирования и имеются самые разнообразные стратегии для разных целей (Marshall and Ballantyne, 1978; Brown et al., 2005; Crum and Alberty, 1993; Germann et al., 2006a, Seltmann et al., 2013).

Для проведения наблюдений на больших расстояниях необходимы сканирования большой дальности 500 км или больше (результатом чего является ограниченная скорость Найквиста). Для охвата меняющейся морфологии конвективной грозы требуется быстрое обновление в течение приблизительно 5 минут. В случае авиационных применений, определяющих нисходящий воздушный поток, требуются еще более короткие циклы сканирования (Michelson et al., 1990). Научно-исследовательские радиолокаторы сканируют ограниченные области или сектора с циклом сканирования в 1 минуту или менее (Wurman et al., 1996). Для максимального захвата эхосигналов в безоблачной атмосфере необходимо проведение медленных маловысотных сканирований импульсами большой длительности. Медленное сканирование будет оптимизировать доплеровскую фильтрацию эхосигналов от наземных объектов. Многочисленные методики ЧПИ требуют наличия предположения об однородности радиальной скорости и могут осуществляться на основе последовательности лучей или сканирований.

Проведение сканирований при максимально возможных малых углах возвышения необходимо для оптимизации получения количественных оценок осадков, а также для организации обнаружения метеорологических явлений на низкой высоте и в приземном слое. Для получения оптимальных CAPPI или эхосигналов целей на большой высоте требуется геометрическая последовательность углов возвышения (Marshall and Ballantyne, 1978). Появляющиеся сети радиолокаторов с фазированной антенной решеткой, работающих в X-диапазоне, такие как сети проекта по совместному адаптивному зондированию атмосферы (CASA) или многофункциональный радиолокатор с фазированной антенной решеткой (MPAR), революционизируют концепцию стратегии сканирования, поскольку электронное сканирование может адаптироваться в зависимости от метеорологического объекта или применения (McLaughlin et al., 2009; Weber et al., 2007), либо имеющиеся недостатки могут быть снижены благодаря получению данных с соседних радиолокаторов.

Возможность компромисса обеспечивает качество данных. Например, медленные сканирования для получения высокого спектрального разрешения с целью ослабления мешающего отражения от земной поверхности или низкий разброс в данных препятствуют реализации стратегии сканирования при множестве углов возвышения и соответственно приводят к плохому вертикальному разрешению. Качество данных — это нечетко сформулированная концепция, поскольку с точки зрения качества оно означает компромиссы, связанные с временным охватом или временным разрешением (время цикла), пространственным разрешением (азимут, дальность, возвышения), погрешностью данных (погрешность скорости или отражаемость) и разбросом данных. Этот фактор

трудно объективно оптимизировать, поскольку исходные параметры успеха являются совершенно разными, а установление числа последовательности угла возвышения не является точной наукой.

Первоочередным соображением является характер метеорологических условий и то место, которое необходимо охватить. Например, последовательность сканирования для радиолокатора, расположенного в долине или используемого для локальных целей и на короткую дальность, будет либо может весьма отличаться от радиолокатора, который используется для дальнего обзора выходящих на сушу ураганов (Joe et al., 2014).

Хотя в концептуальном плане привлекательным является установление изменений угла возвышения равным ширине луча, небольшие изменения угла возвышения даже в 0,1° могут стать причиной значимых вариантов представлений данных, зависящих от стратифицированного характера осадков (снег, яркая полоса, профили дождя) и профиля ветра.

Необработанные данные, представленные в полярных координатах, хранятся в трехмерном (дальность, азимут, возвышение) или множественном (параметр радиолокатора) массиве, обычно именуемом «сканированием по объему». Это служит источником данных для дальнейшей обработки и архивирования. Может быть несколько вариантов необработанных данных из-за разных процессов обеспечения качества данных.

7.6.10 Эксплуатационные характеристики радиолокатора

Более подробная информация о рабочих характеристиках наземных метеорологических радиолокационных систем, измеряющих параметры атмосферы с использованием частот 2–10 ГГц, содержится также в приложении 7.A.

Минимальный обнаруживаемый сигнал

Минимальный обнаруживаемый сигнал (МОС) — это мера совокупных эксплуатационных характеристик, таких как мощность излучения, размер антенны, ширина луча или коэффициент усиления антенны, продолжительность импульса, длина волны и другие факторы. Это часто описывается в единицах мощности или температуры шума системы. Однако для радиолокационного аналитика отражаемость на установленной дальности служит более интуитивной мерой эксплуатационных характеристик радиолокатора. Высокая чувствительность является весьма желательной, с тем чтобы обнаруживать эхосигналы в безоблачной атмосфере и легкие осадки, а также повышать эффективность поиска вторичных эхосигналов. В таблице 7.8 показаны некоторые МОС типовых радиолокаторов с высокими эксплуатационными характеристиками.

Таблица 7.8. Минимальный обнаруживаемый сигнал типовых радиолокаторов с высокими эксплуатационными характеристиками

Радиолокатор	*МОС на 50 км*
Z9110	–8,0 дБZ (несколько дней в августе) –10,0 дБZ (2 месяца)
Z9220	–1,0 дБZ
King City CONVOL (2 мкс)	–11,0 дБZ
King City DOPVOL (0,5 мкс)	–5,0 дБZ
Twin Lakes, OK	–7,5 дБZ
Lake Charles, LA	–8,5 дБZ

Фазовая стабильность

Фазовая стабильность, или флуктуация фазы, — это мера среднего изменения фазы от импульса к импульсу. Некоторые виды программного обеспечения для тестирования радиолокаторов обеспечивают проведение этого измерения посредством использования акустической линии задержки или внешних целей. Преимущество последнего метода заключается в том, что с его помощью тестируется стабильность на разных дальностях или временные задержки и полное изменение в процессе обработки. Результатом хорошей фазовой стабильности (< 0,5°) является более лучшая оценка скорости, устранение отражений от местных наземных объектов и более эффективный поиск вторичных эхосигналов магнитронными системами.

Корреляция перекрестной поляризации и *ZDR*

Мерой качества работы радиолокатора с двойной поляризацией является корреляция перекрестной поляризации (ρ_{HV}). Если радиолокатор направлен на легкий дождь или моросящие осадки, которые, как правило, характеризуются единообразной круглой формой, то корреляция должна быть весьма близкой к 1,0. Эффективные радиолокаторы сообщают значения, как правило, в 0,995 или еще более точно. Это свидетельствует о том, что двойная поляризация является весьма хорошей и хорошо конфигурированной.

Если вертикальные сканирования проводятся в условиях наличия слоистых форм, то значения Z_{DR} должны быть равны 0 и не иметь никакой азимутальной зависимости.

7.7 ОБСЛУЖИВАНИЕ И КАЛИБРОВКА

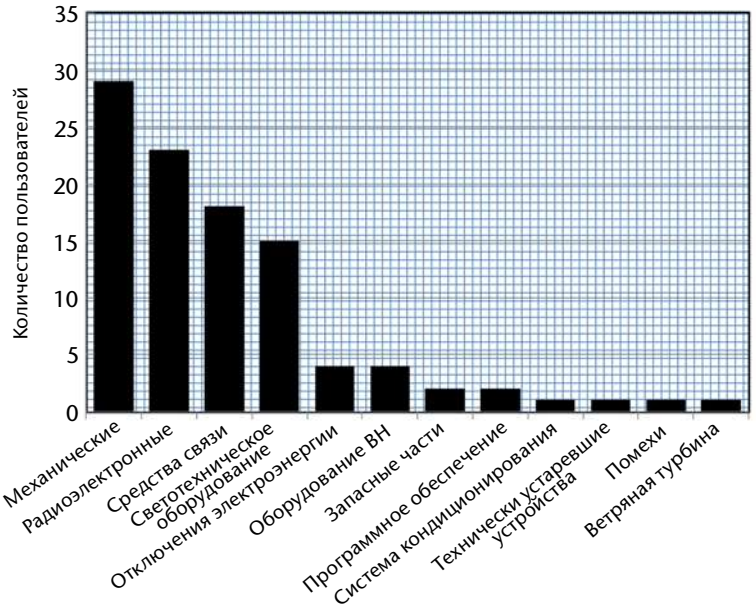
Радиолокатор является, вероятно, самым сложным из приборов, которые метеорологическая служба или поставщик услуг должны эксплуатировать и обслуживать. Он требует очень высокого уровня профессиональной подготовки и развития профессиональных навыков. Обслуживание является исключительно важным для обеспечения постоянной эксплуатации радиолокатора, а калибровка является исключительно важной для обеспечения качества данных. Как обслуживание, так и калибровка, должны осуществляться в соответствии с процедурами, предписанными производителем. Ниже следует их общее описание.

7.7.1 Обслуживание

Современные радиолокаторы, если она надлежащим образом установлены и эксплуатируются, не должны часто выходить из строя. Некоторыми производителями заявлено, что для их радиолокаторов среднее время наработки на отказ (СВНО) составляет около года. Однако эти заявления зачастую являются оптимистичными, и реализация СВНО требует планового профилактического обслуживания. Для минимизации времени ремонта необходимы плановое повседневное обслуживание и достаточное количество технического персонала. Наиболее частыми являются сбои в работе механических и электронных компонентов (Sireci et al., 2010; рисунок 7.16).

Следует отметить, что факторы, не связанные непосредственно с радиолокатором, могут привести к тому, что данные не будут доходить до пользователей. К ним относятся сбои в работе или плохое качество силовой сети, или же могут иметь место слишком многочисленные перепады или колебания напряжения. Работа энергосети может быть нарушена из-за удара молнии или по другим причинам. Может быть нарушена телекоммуникация. Могут произойти сбои в работе систем кондиционирования воздуха, результатом чего будет отключение чувствительных электронных систем.

Профилактическое обслуживание должно включать по меньшей мере квартальную проверку всех подверженных износу частей радиолокатора, таких как редукторы, моторы,



Рисуное 7.16. Результаты проведенного ВМО обзора метеорологических радиолокаторов, показывающие основные отказные режимы радиолокатора (Sireci et al, 2010); рисунок любезно предоставлен Oguzhan Sireci из Турецкой государственной метеорологической службы.

вентиляторы и инфраструктуры. Местный обслуживающий персонал должен вносить результаты проверок в журнал обслуживания радиолокатора и, по мере надобности, посылать их в центральную обслуживающую организацию. Когда имеется много радиолокаторов, можно организовать, вероятно, централизованную службу материально-технического снабжения и ремонтный цех. Последний получает вышедшие из строя части радиолокаторов, ремонтирует их и передает их в службу материально-технического снабжения для хранения в качестве запасных частей, которые будут использоваться по мере необходимости в месте эксплуатации. Обязательным условием является ведение основной документации.

Для выполнения ремонтных работ служба должна быть достаточным образом укомплектована, а именно:

a) запасными частями для всех самых важных элементов радиолокатора с длительным сроком изготовления, такими как радиолампы, твердотельные компоненты, панели, шасси, моторы, редукторы, блоки питания и т.д. Опыт показывает, что желательно предусмотреть 30 % первоначальных затрат на радиолокатор для приобретения запасных частей, хранимых в месте его расположения. Если имеется много радиолокаторов, то эта процентная доля может быть снижена до уровня примерно 20 % при соответствующем распределении между централизованным и местным обслуживанием;

b) испытательной аппаратурой, включая оборудование для калибровки, упомянутое выше. Обычно затраты на нее составляют приблизительно 15 % от стоимости радиолокатора;

c) хорошо подготовленным персоналом, способным определить проблему и быстро и эффективно произвести ремонтные работы, что является исключительно важным.

Продуманная организация обслуживания повысит регулярность работы радиолокатора до 96 % времени в течение года при наличии стандартного оборудования. Более высокая эффективность работы возможна при более высоких расходах.

Рекомендуемый минимум оборудования для калибровки и обслуживания включает следующие виды:

a) генератор микроволновых сигналов;

b) микроволновый измеритель мощности;

c) мегагерцевый осциллограф;

d) микроволновый измеритель частоты;

e) рупорные антенны со стандартным усилением;

f) генератор сигналов промежуточной частоты;

g) микроволновые компоненты, включая нагрузочные устройства, блоки сопряжения, аттенюаторы, соединительные устройства, кабели, адаптеры и т. д.;

h) универсальный анализатор микроволнового спектра в центральной службе;

i) стандартные электрические и механические инструменты и оборудование.

7.7.2 **Калибровка**

В идеальном случае для полной калибровки отражаемости используется внешняя мишень с известным коэффициентом радиолокационной отражаемости, такая как сфера с металлическим покрытием. Идея заключается в том, чтобы проверить антенну и волноводы на соответствие их номинальным характеристикам. Однако данный метод используется очень редко из-за практических трудностей подъема сферы и многочисленных отражений от наземных объектов, а также необходимого времени и квалификации (Brunkow, 2001).

Стандартная процедура заключается в использовании солнца в качестве источника калибровки в плане мощности и точности наведения. Солнце является источником микроволнового излучения и имеет вид диска порядка 0,5 градуса (Tapping, 2001). Однако путем максимизации мощности может быть достигнута бóльшая точность. Эффекты распространения луча могут сказаться на низких углах возвышения, и поэтому более высокие углы часто используются для калибровки по солнцу. Проведение повторных измерений обеспечит статистически более точные результаты. Следует отметить, что точность направленности угла места антенны может зависеть от угла, и поэтому следует проводить измерение разных углов.

При обычной калибровке антенна, как правило, не проверяется, а калибруются волноводный тракт и приемо-передающая система. Обычно предписываются следующие мероприятия:

a) измерение излучаемой мощности и формы волнового фронта в соответствующем диапазоне частот;

b) проверка излучаемой частоты и частотного спектра; при этом следует фильтровать внеполосную мощность;

c) подача известного микроволнового сигнала на вход приемника, с тем чтобы проверить правильность связи определяемых радиолокатором уровней отражаемости с мощностью входного сигнала;

d) измерение отношения сигнал-шум, которое должно быть в пределах номинального диапазона, соответствующего техническим характеристикам радиолокатора.

Если по результатам этих калибровочных проверок выявлены какие-либо изменения или отклонения, необходимо произвести корректирующие настройки.

Доплеровская калибровка включает: проверку и настройку фазовой стабильности с использованием фиксированных целей или искусственных сигналов, масштабирование реальной и мнимой частей комплексного видеосигнала и тестирование процессора сигналов по известным искусственно генерируемым сигналам.

Установка по горизонтали и угла места лучше всего проверяется отслеживанием положения солнца в режиме «только прием» и путем использования имеющейся информации о положении солнца; в противном случае нужна механическая установка уровня антенны. Наличие или отсутствие эхосигналов от неподвижных наземных целей может также служить грубой проверкой азимутальной диаграммы направленности антенны и качества работы передатчика или приемника.

Несмотря на то, что современные радиолокаторы обычно снабжаются очень стабильными электронными устройствами, калибровки необходимо проводить достаточно часто, чтобы гарантировать надежность и точность данных. Калибровка должна производиться либо квалифицированным персоналом, либо с помощью автоматических методик, например, с использованием контрольно-диагностичекого оборудования, которое работает в непрерывном режиме. В первом случае, который требует участия оператора, оптимальными являются по крайней мере калибровки, проводимые каждые 6 месяцев. Для выполнения калибровки в автоматическом режиме могут быть спроектированы новые системы. Простые сравнительные проверки по мощности и местоположению эхосигнала можно осуществлять часто, используя два или более радиолокаторов с перекрывающимися зонами обзора и следящих за соответствующей целью (Zhang et al., 2005).

Методики сбора и обработки данных, такие как накопления данных по отражаемости, распределения вероятности отражаемости как функции дальности для минимального обнаруживаемого сигнала, мониторинг ячейки передачи-приема, а также эхопроверка и установка углов места могут быть использованы для мониторинга рабочего состояния радиолокатора. Погрешности в накоплениях данных о радиальной скорости могут выявить проблемы фильтрации мешающих помех — обычно недостаточной фильтрации, результатом чего являются отклонения в радиальной скорости в направлении нуля (Joe, 2010).

Радиолокаторы с двойной поляризацией требуют наличия двух приемников, которые должны соответствовать друг другу. Допуски в отношении всех компонентов необходимо ужесточить, поскольку измеряются малые величины. Затем для проверки этого могут быть использованы самосогласованность и сканирования чашеобразной антенной для режекции Z_{DR}. Калибровка самосогласованности означает выведение Z из K_{DP} с использованием эмпирического соотношения, полученного по данным измерителя дождевых капель (рисунок 7.17) и рассчитанных при помощи теоретической формулы. После этого проводится корректировка отражаемости (погрешность калибровки) до тех пор, пока выведенная отражаемость K_{DP} не будет соответствовать скорректированному показателю отражаемости. Исходя из качества соотношения Z-K_{DP} (плотность рассеяния) можно рассмотреть вопрос об использовании KDP в качестве независимого параметра для оценки осадков. В случае вертикальной направленности радиолокатора (тарелка антенны выглядит как чашеобразная поилка для птиц) в условиях дождя, выпадающего из слоистообразных облаков, Z_{DR} должна быть равна нулю, а если нет, то необходимо внести поправки. Мониторинг сообщенного максимума ρ_{HV} обеспечит проверку всей работы системы, а именно хорошие радиолокаторы должны сообщать значение, равное 0,995 или еще лучше.

Инновационной методикой является использование радиолокатора космического базирования TRMM или ГПМ для калибровки метеорологических радиолокаторов наземного базирования. Это единственный и стабильный инструмент нижнего обзора, который совершает облеты метеорологических радиолокаторов наземного базирования. В качестве успешной метрики для обеспечения согласованности при калибровке

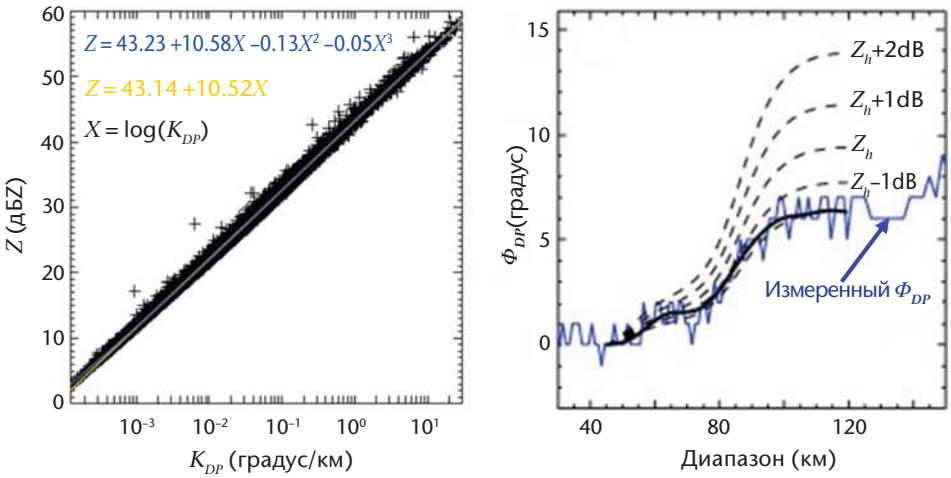


Рисунок 7.17. Существует тесная взаимосвязь между отражаемостью и конкретной дифференциальной фазой (Z и K_{DP}). На левом рисунке эта взаимосвязь показана по данным измерения дисдрометра. На правом рисунке показано одно радиальное направление данных со значительной дифференциальной фазой. Посредством корректировки отражаемости и перерасчета дифференциальной фазы можно осуществить последовательную калибровку радиолокатора (рисунки любезно предоставлены Isztar Zawadzki).

радиолокаторов используются сравнения вершин эхосигналов при фиксированной и умеренно низкой чувствительности, когда ослабление не является значимым (Anagnostou et al., 2001).

7.8 УСТАНОВКА РАДИОЛОКАТОРОВ

7.8.1 Выбор оптимального места

Выбор оптимального места для установки метеорологического радиолокатора зависит от предполагаемого использования. Когда имеется определенная зона, по которой требуются штормовые предупреждения, то обычно самым лучшим компромиссом является расположение оборудования на расстоянии 20—50 км от интересующей зоны и, как правило, в направлении навстречу ветру в соответствии с основной траекторией движения штормов. Рекомендуется устанавливать радиолокатор несколько в стороне от основной траектории, с тем чтобы избежать сложностей измерения при прохождении штормов над радиолокатором. Одновременно это приведет к получению высокого разрешения над интересующей зоной и созданию более заблаговременного предупреждения о надвигающихся штормах (Leone et al., 1989).

В том случае, если радиолокационная сеть предназначается прежде всего для синоптических применений, в средних широтах, радиолокаторы следует располагать на расстоянии приблизительно 150—200 км друг от друга. Расстояние может быть увеличено на широтах, более близких к экватору, если радиолокационные эхосигналы, представляющие интерес, часто достигают больших высот. Во всех случаях радиолокаторы с узким лучом будут давать наилучшую точность для измерения осадков.

Благодаря адекватности и доступности таких цифровых комплектов данных об угле места, как GTOPO30 (https://lta.cr.usgs.gov/GTOPO30), SRTM30 и SRTM03 (http://www2.jpl.nasa.gov/srtm/) появились программные приложения, которые помогают выбрать место. Базовым продуктом является карта дальности радиолокационного горизонта, на которую наносится угол возвышения над горизонтом относительно угла по азимуту радиолокатора, при этом учитывается распространение луча в атмосфере (рисунок 7.18). На этом рисунке

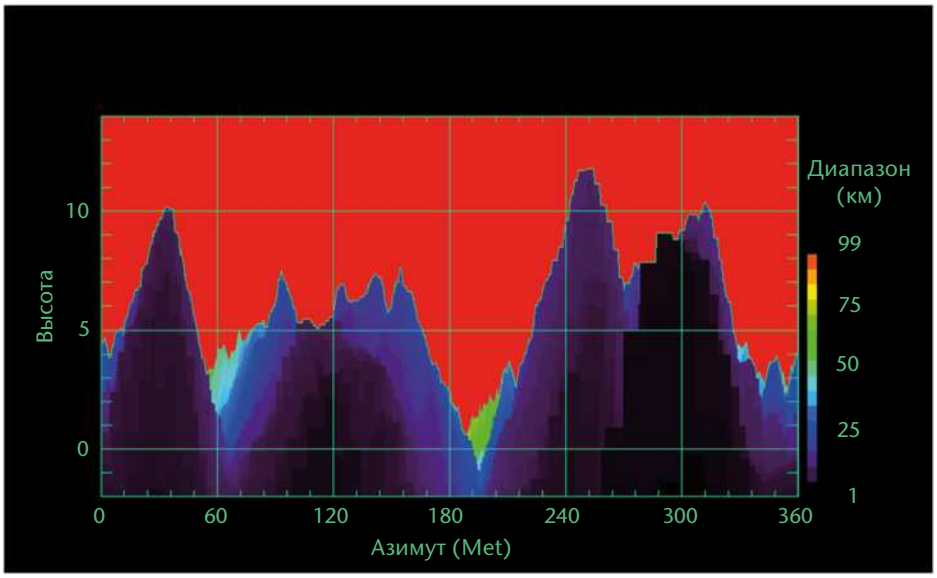


Рисунок 7.18. Глобальные данные цифровой модели рельефа (ЦМР) имеются и являются достаточно точными для их использования с целью оценки и определения места установки метеорологического радиолокатора. Изображение показывает расстояние, на котором могут быть собраны полезные данные, при этом учитываются азимут и угол места.

дальность до земной поверхности показана цветовой кодировкой как функция углов по азимуту и высоте. Цветом показана дальность, на которой луч радиолокатора (в этом случае предполагается модель Земли 4/3) будет собирать пригодные для использования данные. Это особенно полезно при сложном характере земной поверхности, когда радиолокатор, расположенный в долине, должен обеспечивать охват на низких уровнях (в долине), но с ограниченной дальностью, поскольку характер осадков значительно меняется на пути от горного хребта до горной долины. Например, радиолокатор может видеть на расстоянии 50 или 60 км вдоль азимута в 190° при углах места в 1 или 2°. Подобный анализ не может учитывать наличие деревьев или искусственных опор.

Благодаря этому графическому изображению могут быть конкретно определены углы сканирования для оптимального наблюдения за требуемыми наиболее важными участками. Комплекты данных не могут учитывать блокировку, вызванную местными предметами, такими как деревья, здания или вышки.

На выбор места установки радиолокатора влияют многие экономические и технические факторы, а именно:

a) существование дорог для подъезда к радиолокатору;

b) наличие электролиний и линий связи. Часто необходимо добавлять серийно выпускаемые установки для защиты от молний;

c) стоимость земли;

d) близость средства контроля и обслуживания;

e) необходимо исключить затенение луча препятствиями. Не должно быть никаких препятствий при угле места антенны над горизонтом, большем половины ширины луча, либо препятствий с горизонтальными размерами больше половины ширины луча;

f) необходимо, насколько это возможно, избегать влияния отражений от локальных наземных объектов. Для радиолокатора, который будет использоваться для

работы на относительно малой дальности, после внимательного обследования места установки и изучения подробных топографических карт, иногда можно найти относительно плоскую территорию внутри небольшого понижения, края которого будут служить естественной защитой от помех для боковых лепестков диаграммы направленности антенны при минимуме блокирования основного луча. Во всех случаях обследование места установки должно включать фото- и оптико-теодолитную проверку на потенциальные препятствия. В определенных случаях полезно применить подвижную радиолокационную систему для подтверждения того, что данное место является подходящим. В некоторых современных радиолокационных системах имеется программное и аппаратное обеспечение, которое подавляет бóльшую часть отражений от наземных объектов при минимальном отбраковывании эхосигналов от метеорологических объектов (Heiss et al., 1990);

g) когда радиолокатор используется в целях обнаружения метеорологических объектов на больших расстояниях, как это может быть в случае тропических циклонов или других применений на побережье, то его обычно устанавливают на вершине холма. В зону его видимости попадает значительное количество отраженных сигналов от местных наземных предметов, которые могут не иметь особой важности на большой дальности (см. раздел 7.5.3, посвященный подавлению помех);

h) каждое обследование потенциальных мест установки радиолокатора должно включать тщательную проверку на наличие электромагнитных помех в целях максимально возможного исключения взаимного влияния с другими системами связи, такими как телевидение, микроволновые линии, или с другими радиолокаторами. Следует также убедиться, что микроволновое излучение радиолокатора не представляет угрозы для здоровья населения, живущего вблизи предполагаемого места его установки (Skolnik, 1970, 1990; Leone et al., 1989).

7.8.2 Обмен данными, организация сетей, база данных и обработка данных

Достижения в области телесвязи и компьютерной технологии предоставляют возможность передачи радиолокационных данных из большого числа мест на центральный узел для обработки и визуализации при помощи общих компьютерных систем. С учетом существующей сейчас сети Интернет, тарифов и расходов, связанных с сотовыми телефонами и даже спутниковыми данными, возможным является глобальный обмен данными — по крайней мере ограниченными, но полезными и подходящими для использования радиолокационными данными, хотя необходимо исследовать подробную информацию о сетях телесвязи. Следует помнить о том, что радиолокаторы часто располагаются в удаленных местах, где отсутствуют современные системы телесвязи или требуются первоначальные капиталовложения для минимизации затрат на их эксплуатацию и техническое обслуживание.

В некоторых странах существует множество радиолокационных сетей, предназначенных для различных применений, таких как погода, опасные для авиации явления в аэропортах, управление гидрологическими ресурсами, управление воздушным движением и даже таможенная служба и иммиграция. Обмен данными является возможным, но при этом следует учитывать, что применения носят весьма конкретный характер и зависят от весьма специфичных методологий сбора данных и возможно даже технологий. В некоторых местах это является функциональным, однако требует значительных усилий для интеграции и интерпретации.

У ВМО имеются действующие стандарты для некоторых видов радиолокационной продукции. Предполагая возникновение потребности в радиолокационных данных для целей численного прогнозирования погоды на региональном и глобальном уровнях, ВМО приступила к реализации проекта ВМО по обмену радиолокационными данными в целях определения стандартов для необработанных радиолокационных данных (Michelson et al.,

2013). Помимо этого, была создана база радиолокационных данных ВМО, предназначенная для сообщения базовых метаданных о радиолокаторах и радиолокационных сетях в глобальном масштабе (Sireci et al., 2010).

Обмен радиолокационной продукцией осуществляется в целях создания комбинированной или мозаичной продукции по данным от многих радиолокаторов, которая обычно предназначается для представления осадков, выпадающих на значительной территории, в целях обеспечения слежения за погодой. Это является общепринятой практикой, осуществляемой как в странах, так и между ними. Консорциум ОПЕРА (Европейская оперативная программа по обмену метеорологическими радиолокационными данными) — это централизованная мультинациональная модель по объединению сетей и обработке данных (Dupuy et al., 2010). Консорциум БАЛТРАД (http://se.baltrad.eu/) — это еще одна модель объединения сетей и обработки данных, предназначенная для работы с гетерогенными радиолокационными сетями, которая представляет собой открытый источник, действующий по принципу равноправного обмена данными и программным обеспечением для обработки данных, что позволяет отдельным членам консорциума получать или отправлять данные, конфигурировать и обрабатывать программное обеспечение по своему усмотрению (Michelson et al., 2010). Отдельная проблема заключается в подготовке набора гетерогенных радиолокационных данных, представляющих собой продукцию, полученную по разным географическим проекциям, с разным пространственным и временным разрешением и видом обработки. Это привело к появлению концепции обмена полярными необработанными радиолокационными данными для уменьшения подобных проблем. Однако в зависимости от типа радиолокатора и его конфигурации к необработанным данным уже применялись в различной степени разные виды обработки. Подобные проблемы касаются также обмена радиолокационными данными в пределах страны, поскольку радиолокаторы могут принадлежать к разным поколениям.

Что касается обработки данных, то на сегодняшний день существует множество выборов. Каждый производитель предлагает свои собственные системы обработки и визуализации радиолокационных данных, при этом обычно с разными условиями, такими как включенная возможность организации сети или получения лицензии. Существуют также такие системы, как ТИТАН (идентификация, отслеживание, анализ и текущее прогнозирование гроз), которая представляет собой популярное и доступное бесплатно программное обеспечение, используемое во многих научных исследованиях и несколькими метеорологическими службами (Dixon and Weiner, 1993). Изначально эта система была задумана в качестве инструмента, предназначенного для деятельности в области активного воздействия на погоду, однако стала затем многоцелевой. Имеется множество сложных коммерческих систем, которые являются независимыми и специализируются на самых современных применениях, связанных с суровой погодой, таких как Система поддержки принятия решений о выпуске предупреждений — Комплексная информация (WDSS II) (Lakshmanan et al., 2007; http://www.wdssii.org/). Можно создать радиолокационную систему, используя средства, предоставляемые БАЛРАД или Библиотекой НАСА по радиолокационному программному обеспечению (Wolff and Kelley, 2009). В отношении создания своей собственной системы имеется возможность проведения переговоров или сотрудничества с национальной метеорологической и гидрологической службой (НМГС) или каким-либо правительственным агентством. Функциональные возможности варьируют от самых базовых декодеров до систем, генерирующих базовую продукцию, систем с возможностью обеспечения высокого качества данных и автоматического обнаружения суровых штормов и их классификации. Принимаемая к эксплуатации система должна быть основана не только на функциональных возможностях, но и определяться также видом применения и наличием доступных возможностей в области научно-технической поддержки и обслуживания.

7.9 ИСТОЧНИКИ ОШИБКИ

Ошибки в радиолокационных данных необходимо рассматривать в контексте конкретного применения. Задачей часто является оценка осадков, и необходимо применение строгих процедур обеспечения качества данных, с тем чтобы удалять и корректировать артефакты. Существуют разные уровни контроля качества данных. Гидрологические применения требуют оценок даже в случае плохого качества данных, в то время как при ассимиляции данных допускается наличие отсутствующих данных, но не их плохое качество. Многие проблемы плохого качества радиолокационных данных вызваны воздействием внешней среды, но не самого радиолокатора (рисунок 7.2). Следует отметить, что эти количественные применения метеорологического радиолокатора все еще находятся на этапе разработки, в то время как качественное использование радиолокационных данных для понимания и обнаружения суровых штормов является совершенным, и оно полностью оправдывает существование радиолокационных сетей.

Радиолокационное уравнение выводится с учетом многих предположений. В тех случаях, кода эти предположения не оправдываются, отражаемость может рассматриваться в качестве ошибки. Например, если цель является единообразной или полностью заполненной либо является смешанной, то данное уравнение не является соответствующим. Помимо этого, если параметры, включенные в данное уравнение, такие как коэффициент усиления антенны, потери в волноводе или длительность импульсов являются неправильными, то константа радиолокатора будет представлять собой ошибку, результатом которой будут систематические погрешности при преобразовании показателей мощности в показатели отражаемости. Ниже рассматриваются различные источники ошибки применительно к качественным и количественным применениям.

Заполнение радиолокационного луча

Во многих случаях, и в особенности на больших расстояниях от радиолокатора, ширина луча является значительной и импульсный объем не целиком заполняется однородными осадками, т. е. радиолокационный луч может быть лишь частично заполненным. Это особенно справедливо в отношении низко расположенных метеорологических систем (< 1 км по высоте, например снежные бури, связанные с эффектом озера), когда луч полностью проходит мимо зоны осадков и на расстоянии порядка 50 км не видно никаких эхосигналов осадков. На бóльших расстояниях импульсный объем является весьма большим и, естественно, происходит значительное сглаживание по мере свертывания радиолокационного луча целью. В подобной ситуации луч находится также очень высоко над земной поверхностью и не очень хорошо количественно отражает осадки над поверхностью Земли. В случае систем, работающих на большей высоте (например, 15 км), радиолокатор способен обнаруживать эти системы на бóльших расстояниях (> 250 км) и представляет собой значительно бóльшую ценность для прогнозистов, поскольку эти системы будут весьма интенсивными. Как правило, радиолокационные измерения могут оказаться полезным с точки зрения количественных параметров на расстояниях менее 80 км при ширине луча радиолокатора в 1° и порядка 110 км при ширине луча радиолокатора в 0,65°, без внесения при этом дополнительных корректировок в данные (см. рисунок 7.33).

Неоднородность вертикального распределения осадков

Параметром, связанным с заполнением радиолокационного луча, является несоответствие интенсивности осадков как функция высоты. Первым параметром, представляющим интерес при радиолокационных измерениях, обычно являются осадки на уровне земной поверхности. Что касается горизонтальной изменчивости, то вертикальная изменчивость или вертикальный профиль играют существенную роль в оценке осадков на поверхности земли. Из-за эффектов, связанных с шириной луча, его наклоном и кривизной Земли, радиолокационные измерения осадков на больших расстояниях или эквивалентно по высоте осуществляются на меньших высотах по сравнению с измерениями осадков над поверхностью земли (см. 7.10.4.1).

Ослабление из-за воздействия осадков

Ослабление сигнала из-за дождя может быть значительным, в особенности на более коротких длинах волн радиолокатора (5 и 3 см). Ослабление из-за снега меньше, чем ослабление при дожде, но может быть все же более существенным на больших расстояниях. Вопреки общему мнению, ослабление в случае радиолокатора, работающего в S-диапазоне, существует, но определить его более трудно. Методика двойной поляризации использует параметр специальной дифференциальной фазы (K_{DP}), который не зависит от ослабления и является более эффективным на более коротких длинах волн. K_{DP} — это параметр шума, и эта методика все еще совершенствуется (см. 7.10.4.4).

Затенение луча

В зависимости от места установки радиолокатора его луч может быть частично или полностью заслонен рельефом или препятствиями, расположенными между радиолокатором и целью. Это ведет к недооценкам отражаемости и соответственно к ошибкам в интенсивности выпадения дождевых осадков. K_{DP} — это локальный параметр, являющийся мерой дифференциального ослабления (определенного по фазе) в пределах облучаемого радиолокатором объема, и поэтому он не зависит от затенения луча. В случае узкого затенения интерполяция данных может быть достаточной для количественного применения. В случае качественного применения затенение луча является проблемой, которую аналитик может преодолеть. При полном затенении луча с определенной степенью успеха могут быть использованы вертикальные корректировки на основе профиля отражаемости.

Ослабление за счет намокания ветрозащитного обтекателя антенны радиолокатора

Большинство радиолокационных антенн защищены от ветра и дождя обтекателем, который обычно изготовляется из стеклопластика. Обтекатель спроектирован таким образом, чтобы вызывать минимальные потери излучаемой энергии. Например, благодаря такому устройству обтекателя потери при двойном прохождении сигнала могут довольно легко поддерживаться на уровне ниже 1 дБ в С-диапазоне при нормальных условиях. Однако при обильном дожде поверхность обтекателя может покрыться тонкой пленкой воды или льда, вызывающей сильное, зависящее от азимута, ослабление.

При сочетании с ослаблением из-за осадков и на более коротких длинах волн эхосигналы радиолокатора могут быть полностью подавлены. Хотя это может показаться катастрофическим, но в реальности это происходит в течение ограниченного времени (около 10 минут), и в плане качественного использования предупреждения будут уже, вероятно, выпущены. Что касается ассимиляции данных, то доступной будет двойная поляризация данных (K_{DP}), что свидетельствует о том, что имело место резкое ослабление, и остальные данные будут непригодными для использования. Для гидрологических применений, которые действуют во временных масштабах в размере часов или суток, краткосрочная потеря данных для прогнозирования паводков не является существенной. В зависимости от режима метеорологических условий затронуто может быть прогнозирование быстроразвивающихся бурных паводков.

Электромагнитные помехи

Электромагнитные помехи от других радиолокаторов или установок, таких как локальные радиосети (RLAN), становятся все более значительными и требуют принятия существенных мер по защите от них. Помехи, создаваемые между соседними радиолокаторами, уменьшаются за счет использования несколько иных частот (но все же в той же самой полосе) с применением надлежащих фильтров, установленных на передатчике и приемнике. Иногда случайные помехи могут возникать от радиолокаторов воздушного и наземного базирования, которые работают в С-диапазоне и используют ту же самую частоту.

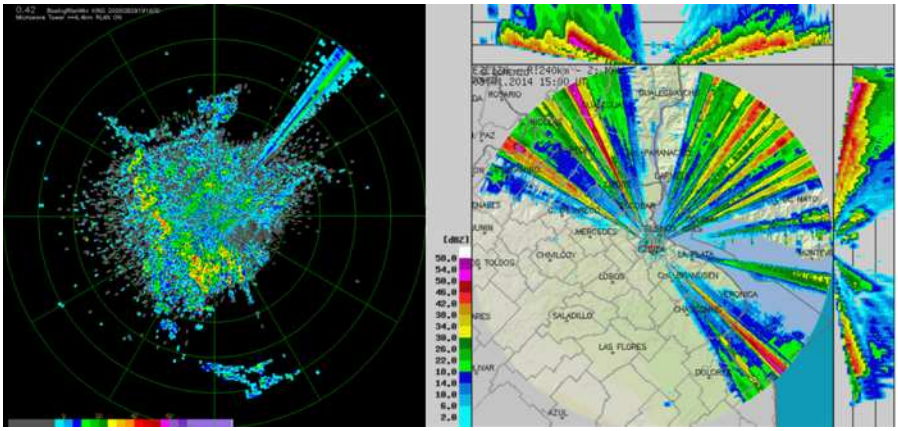


Рисунок 7.19. Изображение слева демонстрирует тип предполагаемых помех со стороны локальной радиосети, находящейся на расстоянии 6,4 км с углом места 0,42°. Изображение справа получено оперативным метеорологическим радиолокатором и любезно предоставлено Claudia Campetella из Национальной метеорологической службы Аргентины.

Использование электромагнитного спектра определяется на основе соглашения и его порядок регулируется Международным союзом электросвязи. На Всемирной конференции радиосвязи 2003 г., после запроса со стороны сообщества пользователей беспроводной связи о предоставлении спектра телекоммуникационной индустрии был открыт доступ к частотам C-диапазона на регулируемой, вторичной основе без необходимого лицензирования и с условием несоздания помех и совместного использования с метеорологическим сообществом. Для того, чтобы не создавать помехи, предполагается, что в аппаратуре RLAN будет применяться устройство динамического выбора частоты, которое предназначено для освобождения канала в C-диапазоне в том случае, если обнаружен метеорологический радиолокатор. Однако алгоритмы, используемые для обнаружения метеорологического радиолокатора, являются недостаточными для предотвращения помех до того, как они освобождают данный канал. Доплеровский спектр сигналов RLAN появляется в виде белого шума и может быть устранен при помощи адаптивных методов шумоподавления. Однако они повышают уровень шума и уменьшают чувствительность метеорологического радара в случае обнаружения RLAN. ВМО выпустила директивные документы, касающиеся совместного использования частот C-диапазона. На рисунке 7.19 показаны некоторые примеры подобных помех для источников на разном расстоянии. Тем не менее системы интерференции, подобные этим, наблюдаются все более часто. Слева на рисунке показано изображение общей отражаемости (без фильтрования доплеровского отражения от местных наземных объектов) на экране индикатора кругового обзора (ИКА) при угле места 0,42°, полученное в ходе контролируемого исследования, когда радиолокатор C-диапазона с RLAN конкретно размещался в известных местах на расстоянии 6,4 км с азимутом порядка 40°. RLAN наблюдается при азимуте 7°—10°. Более близкое (или далекое) расположение RLAN приведет к расширению (или сужению) систем интерференции. В данном эксперименте наблюдение за RLAN может осуществляться на расстоянии до 16,7 км (максимальная величина в вертикальном столбе в пределах сканирования по объему). Изображение справа — это продукт «максимальной отражаемости» от оперативного радиолокатора Эзейза в Аргентине, и оно показывает систему, включающую, возможно, 12 RLAN, которые находятся в пределах 5 км от радиолокатора. Это пример экстремальной интерференции. Помимо этого, в случае близкого нахождения, интерференция может повлиять на трехмерные данные радиолокатора.

Необходимо проявлять предельную осторожность, поскольку эти системы будут разворачиваться в массовом порядке и на безлицензионной основе, и в этом случае будет трудно пресекать нарушения. Сотрудничество и совместная работа ожидаются, требуются и поощряются. Помехи возникают также в S-диапазоне из-за беспроводной технологии

4G, а также других радиолокаторов S-диапазона (управление воздушным движением). ВМО подготовила директивные указания или заявления относительно совместного использования частотного спектра с учетом этих новых технологий (см. приложение 7.B).

Отражение от местных наземных объектов

Искажение эхосигналов от дождя отражениями от наземных объектов может повлечь очень большие ошибки в оценке интенсивности осадков и скорости ветра. Антенны большинства современных радиолокаторов имеют стандартные технические характеристики боковых лепестков, которые трудно улучшить, поскольку это является геометрической проблемой. Боковые лепестки могут быть улучшены или сдвинуты в иные угловые положения, однако отдаление рупорного облучателя антенны от фокальной точки приводят к ухудшению коэффициента усиления антенны или ширины луча. Исходным методом для минимизации отражения от наземных объектов является правильный выбор места установки радиолокатора. В идеальном варианте радиолокатор следует размещать в углубленном месте или в месте его размещения должны быть деревья для поглощения и рассеяния боковых лепестков без блокирования при этом главного лепестка. Методы подавления сигналов и изъятия данных широко рассмотрены.

Аномальное распространение

Аномальное распространение нарушает траекторию радиолокационного луча и ведет к усилению отражений от наземных объектов в результате преломления луча в направлении к Земле. Оно может также способствовать обнаружению радиолокатором циклонов, находящихся гораздо дальше обычного радиуса действия, но с ошибками в определении их удаления из-за искажения дальности. В некоторых районах аномальное распространение является частым, когда в атмосфере происходит сильное уменьшение влажности и/или повышение температуры с высотой. Отражения сигналов, связанные с аномальным распространением, могут весьма запутать неопытного наблюдателя. Эти эхосигналы устраняются таким же образом, что и отражения от наземных объектов.

Следует отметить, что, как правило, местонахождение луча неизвестно, поскольку атмосферный профиль индекса рефракции является идеализацией (Joe, 1999). Ассимиляция данных, связанных с объемом облучения радиолокатора, при типичном числе углов места (10—24) является проблематичной, поскольку модели численного прогнозирования погоды имеют в настоящее время, как правило, 50—80 модельных уровней. Нехватка точной информации о местоположении луча и несоответствие между количеством радиолокационных данных и модельными уровнями исключают возможность использования этих данных для ассимиляции на расстояниях более 100 км.

Точность установки диаграммы направленности антенны

В хорошо сконструированной системе положение антенны может быть известно в пределах 0,1°. Однако ошибки в положении антенны могут увеличиваться из-за наклонной платформы антенны или нестабильности в контуре или механизме обратной связи, вызванной износом оборудования. Это является особенно важным при низких углах места, поскольку малые изменения угла места могут приводить к большим изменениям в охвате параметров погоды в приземном слое атмосферы.

Электронная стабильность

Современные электронные системы с течением времени претерпевают небольшие изменения и были значительно усовершенствованы с ранних дней метеорологических радиолокаторов, когда приходилось ежедневно осуществлять калибровки приемника. Хорошо сконструированный радиолокатор может характеризоваться стабильностью (изменение < 1 дБ) в течение месяца. Добавление системы мониторинга со встроенной

температурой тестирования может привести в действие подачу предупреждающего сигнала или послать сообщение по электронной почте при обнаружении неисправности, а также минимизировать время простоя радиолокаторов.

Вариации соотношения Z-R

Для преобразования отражаемости в интенсивности осадков необходимо эмпирическое соотношение между Z и R. Соотношением, которое является самым знаменитым и наиболее часто используемым применительно к оперативным радиолокаторам, является соотношение Маршалла-Палмера (1948 г., в настоящее время известно, как соотношение Маршалла-Ганна, 1952 г.). Как сообщалось, степень неопределенности этого соотношения характеризуется коэффициентом 2. Это также относится к снегу. Отражаемость — это функция распределения размера капель, и разные распределения размера капель могут давать одинаковое значение Z. Таким образом, с разными степенями успеха были сформулированы разнообразные соотношения Z-R для разных типов осадков — конвективных, слоистых и снега (см. 7.10.4.2). Для радиолокатора с двойной поляризацией сейчас разработана методика, использующая параметр двойной поляризации K_{DP}. Предстоит убедиться в том, может ли корректировка вертикального профиля конкурировать с методом K_{DP} в ситуациях частичного затенения.

Радиальная скорость

Скорости, измеряемые при помощи доплеровского радиолокатора, характеризуются только радиальным направлением, что может быть причиной неоднозначных показаний. Автоматизированная интерпретация все еще представляет собой область активных исследований, однако интерпретации возможны в определенных ситуациях, а именно крупномасштабные синоптические потоки и мелкомасштабные конвективные потоки, при условии наличия компетентных и хорошо подготовленных аналитиков.

Скорости представляют собой взвешенные оценки отражаемости или движение осадков/цели. Если радиальные компоненты вертикальных движений являются ничтожными (например, низкие углы места), то они представляют движение осадков, которое часто может интерпретироваться в качестве ветра. Однако следует проявлять осторожность, с тем чтобы не интерпретировать скорость в качестве движения эхосигнала осадков или самой системы. Например, в случае лентикулярного потока над горной вершиной движение эхосигнала (показанного отражаемостью) может быть стационарным, но частицы осадков движутся через это явление, и эхосигнал будет иметь ненулевое доплеровское значение. Насекомые и птицы могут вносить погрешности в значения радиальных скоростей. В целом эти погрешности являются относительно небольшими (Wilson et al., 1994), если птицы или насекомые не мигрируют. Отражение от местных наземных объектов может также смещать значение радиальных скоростей в направлении нулевой скорости (недооценка), если недостаточно удаляется эхосигнал от земной поверхности.

Если ветер в облучаемом радиолокатором объеме не является равномерным и характеризуется значительными сдвигами, то результатом будут неточные оценки радиальной скорости. Рассмотрим экстремальный случай торнадо, который полностью и частично входит в облучаемый радиолокатором объем. В первом варианте ожидается нулевая средняя радиальная скорость при весьма значительной спектральной ширине. Во втором может ожидаться ненулевая скорость, если скорость Найквиста является достаточно высокой. Если скорость Найквиста относительно мала, то средняя скорость может налагаться несколько раз и может быть выведена любая скорость (Fabry et al., 2013). Помимо этого, наложение может также иметь место в случае метеорологического спектра, затрудняя таким образом получение данных как о средней скорости, так и ее спектральной ширине. Методика двойной ЧПИ также не срабатывает в данном случае, поскольку нарушается предположение о единообразии оценок двух двойных ЧПИ. Также происходит вращение антенны, и поэтому это предположение может быть нарушено в областях высокого сдвига, в которых две выборки скорости на разных ЧПИ производятся в разных

азимутальных местах и в которых скорость характеризуется значительной изменчивостью или спектральной шириной. В последней ситуации методическая ошибка определяется посредством этой изменчивости и разности в однозначных скоростях Найквиста (соответственно, отношение ЧПИ). Методы коррекции могут улучшить ситуацию с изменчивостью доплеровских частот (Joe and May, 2003). Имитация ситуации приводится на рисунке 7.20. Верхнее изображение показывает предписанное модельное поле с временным шагом в поле скорости. Средний рисунок показывает, что будет измеряться доплеровским радиолокатором С-диапазона. Нижний рисунок показывает результаты методики подавления помех.

Загрязнение боковых лепестков

При наличии существенных градиентов отражаемости, например в случае гроз с крупным обводненным градом, боковые лепестки могут вызывать эхосигнал, в то время как главный лепесток направлен на цель с существенно низкой или нулевой отражаемостью. Боковые лепестки, как правило, находятся на уровне ниже 25 дБ и еще ниже (односторонний или 50 дБ-двусторонний) значения основного луча (рисунок 7.8). Таким образом, если боковой лепесток направлен на цель, показатель отражаемости которой составляет 60 дБZ, как это имеет место в случае обводненного града, а основной луч направлен на цель с показателем 10 дБZ, то радиолокатор будет сообщать эхосигнал с характеристиками отражаемости, радиальной скорости и двойной поляризации, исходя при этом из предположения о том, что данная мощность создавалась главным лучом. Эхосигналы боковых лепестков появляются в виде кольцевых артефактов как по азимуту, так и углу места, при постоянной дальности. Это может иметь вид «крыльев» вблизи областей с высокими значениями отражаемости или «высоких верхних всплесков эхосигналов» (левое и правое изображения на рисунке 7.21 соответственно. Множественные эффекты рассеивания появляются в виде радиальных артефактов при постоянном азимуте, но с увеличением дальности. Они вызываются зонами с высокой отражаемостью плюс эффектами отражения от поверхности с высокой отражаемостью (поверхность земли, увлажненная дождем, например) и используется в качестве

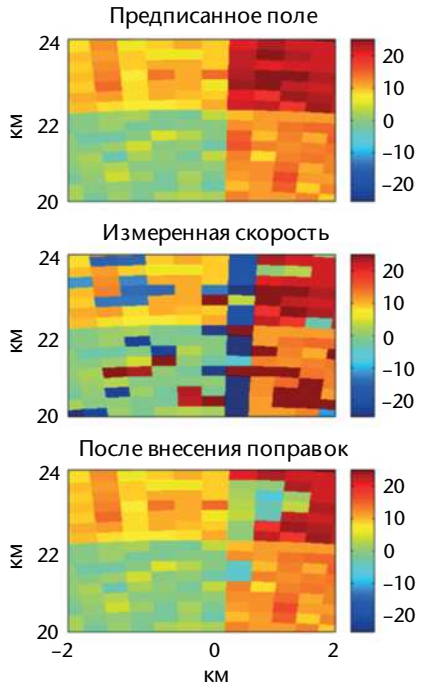


Рисунок 7.20. Метод двойной ЧПИ предполагает, что измерения производятся по объему с одинаковой радиальной скоростью. Изображения показывают предписанное поле, измеренные и скорректированные данные. (Рисунок адаптирован из работы Joe and May, 2003).

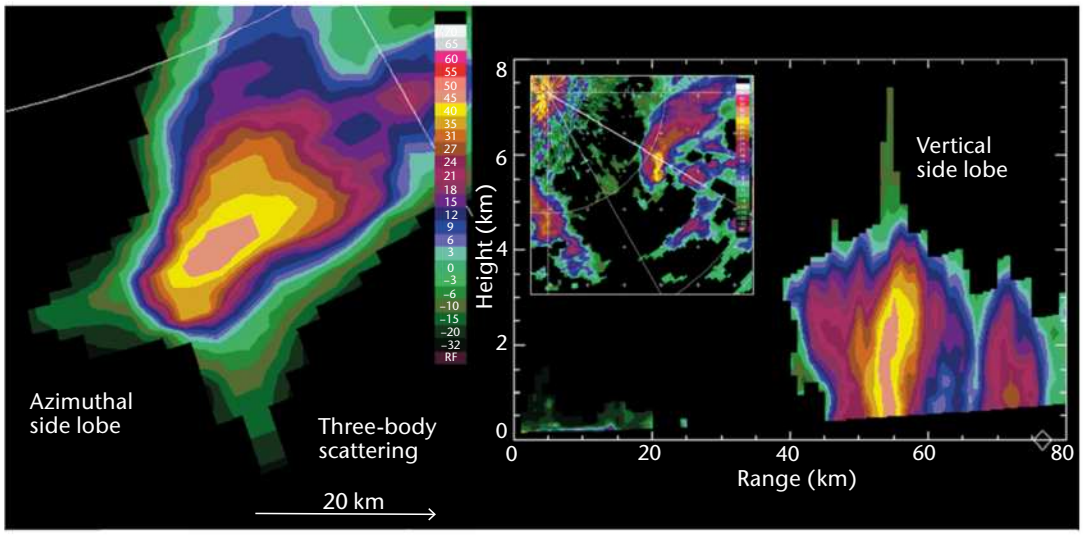


Рисунок 7.21. Эффекты боковых лепестков и множественного рассеяния приводят к появлению в некоторой степени похожих артефактов. Артефакты боковых лепестков наблюдаются на постоянной дальности, а множественное рассеяние — при постоянном азимуте.

индикаторов града в радиолокаторах S-диапазона. Следует отметить, что на рисунке справа возможно имел место азимутальный боковой лепесток и/или трехмерное рассеяние, но это, вероятно, было затенено более сильными метеорологическими эхосигналами. Это не является очевидным в пределах самой грозовой области, поскольку в главном лепестке эхосигнал будет доминировать над отражаемостью. Однако это может быть очевидным в вертикальной плоскости и приводить к ложно высоким вершинам эхосигналов, которые были названы выбросом града и могут быть использованы для количественной диагностики града во время грозы (см. рисунок 7.21). Этот тип эхосигнала может также иметь место в районе слабого эхосигнала, который граничит с грозовой завесой града, которая может внести путаницу в интерпретацию признаков вращения, свидетельствующих о присутствии мезоциклона.

Множественное рассеяние

Луч радиолокатора может отражаться множество раз вследствие условий распространения (см. рисунок 7.22). Его рассеяние может происходить также множество раз в пределах грозовой зоны, обладающей высокой отражательной способностью (обводненный град), в направлении влажной подстилающей поверхности и обратно к радиолокатору. Это явление называется трехмерным рассеянием, и его результатом является удлиненный по дальности эхосигнал, выходящий за пределы ядра сильной отражаемости (Zrnić et al., 2010). В радиолокаторах S-диапазона это используется в качестве признака града, который именуется факелом града, с тем чтобы отличать его от признака града в боковом лепестке (Lemon, 1998). Множественное рассеяние становится более частым по мере уменьшения длины волн, и данный признак может также проявляться при сильном дожде в C- и X-диапазонах.

Вторичный/многократный эхосигнал

При использовании высоких ЧПИ в доплеровских радиолокаторах могут иметь место многократные эхосигналы. Это явление уже рассматривалось ранее, и были отмечены различия между когерентными на передаче и когерентными на приеме радиолокаторами. На рисунке 7.7 приводится пример вторичных эхосигналов в случае отражаемости и

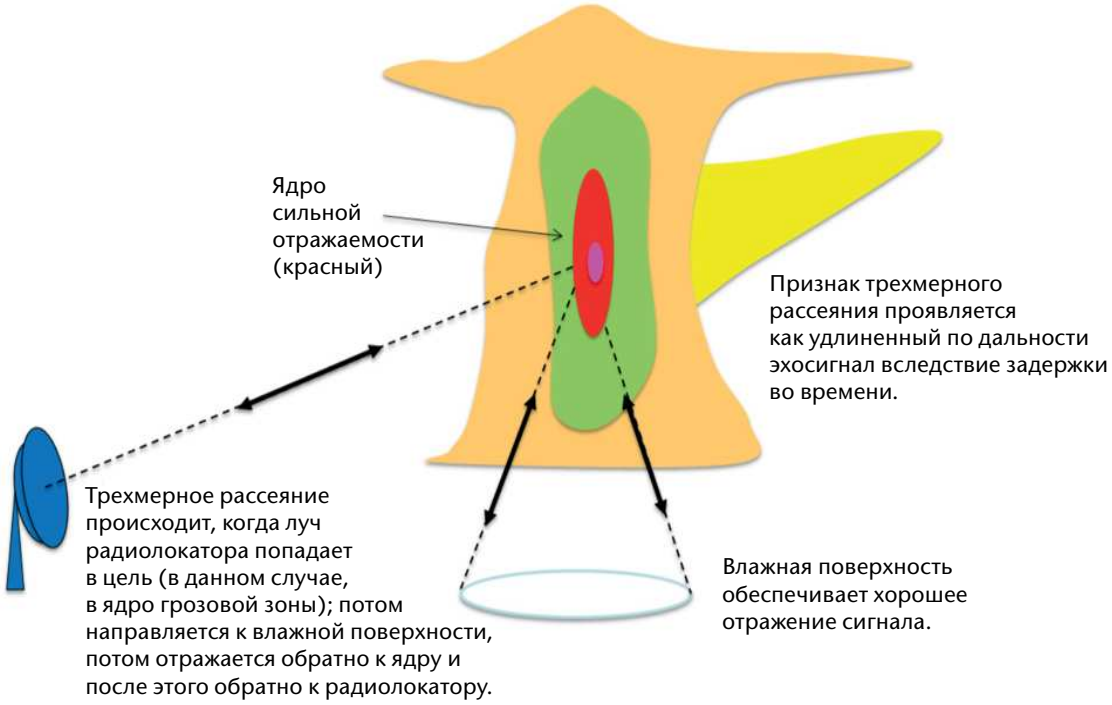


Рисунок 7.22. На этой схеме дается описание того, как происходит трёхмерное рассеяние. Эхосигнал, распространяющийся вправо (яркий желтый цвет), является артефактом, вызванным трехмерным рассеянием.

радиальной скорости для когерентного на приеме радиолокатора. В случае когерентного на передаче радиолокатора алгоритм вторичного эхосигнала показывает цветом перекрывающие друг друга эхосигналы как свернутые расстоянием.

Ветряные турбины

Все большей проблемой является распространение ветроэнергетических установок и их воздействие на метеорологический радиолокатор. Ветряные турбины являются источником естественной энергии и находятся в отдаленных районах с ветреной погодой. Эти цели появляются в эхосигналах от земной поверхности (и соответственно в более низких лучах), однако лопасти турбины представляют собой движущуюся цель и соответственно генерируют доплеровский признак, и поэтому их трудно удалить. Помимо этого, турбины устанавливаются в виде кластеров по 100 и более единиц, образуя ветряные фермы. В связи с этим будут затронуты важные области. На рисунке 7.23 показано два разных воздействиях ветряных турбин. Если турбины расположены поблизости от радиолокатора, то они могут образовывать заблокированные сектора (изображение слева). Они могут появляться в виде несколько изолированных эхосигналов (не показано). Может наблюдаться множественное рассеяние (изображение справа). В этом примере ветряные турбины находятся на расстоянии 80—100 км от радиолокатора. ВМО разработала руководящие указания по совместной эксплуатации при близком расположении ветряных турбин и радиолокаторов.

К числу одних из методов исключения эхосигналов являются карты помех. Однако при этом методе удаляются также эхосигналы от метеорологических объектов, и поэтому потребуются другие стратегии ослабления помех для восполнения отсутствующих данных (рисунок 7.23). Они могут включать интерполяцию на основе боковых данных или данных сверху, или использование источников данных для заполнения пробелов. В связи с распространением ветряных электростанций необходима текущая модификация или разработка адаптивных стратегий, с тем чтобы быть в состоянии поддерживать качество данных для метеорологических применений. Если ветряные турбины находятся очень

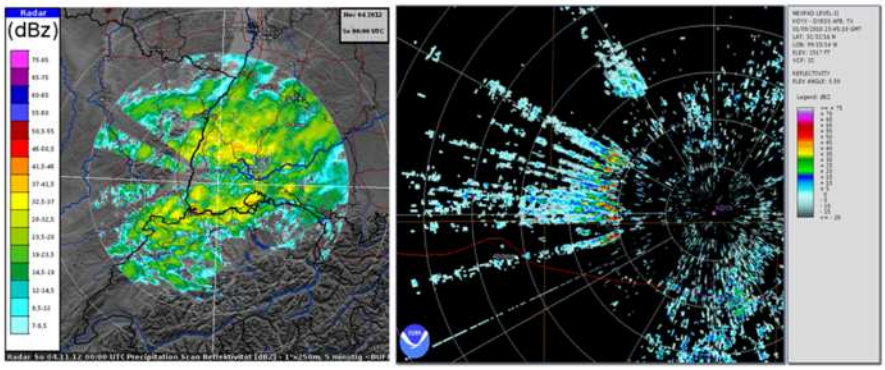


Рисунок 7.23. На изображении слева (любезно предоставлено Метеорологической службой Германии) показано затенение (к западу от радиолокатора) ветряными турбинами, а на изображении справа показаны помехи и эффекты множественного рассеяния ветряными турбинами (любезно предоставлено Национальным управлением по исследованию океана и атмосферы).

близко от радиолокатора, то они могут быть препятствием для радиолокационного луча, причем не только для лучей низкого уровня, но также и для лучей с большим возвышением, в результате прямого затенения, а также вследствие многоканальности. ВМО разработала руководящие указания, касающиеся их установки (см. приложение 7.C).

7.10 ОБЗОР МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИХ ПРИМЕНЕНИЙ

Радиолокационные наблюдения находят широкое применение для следующего:

a) наблюдения за синоптическими и мезомасштабными системами погоды;

b) обнаружение явлений суровой погоды, их отслеживание и предупреждение о них, включая обнаружение такого опасного явления как сильный ветер;

c) прогнозирование текущей погоды;

d) оценка интенсивности осадков, классификация эхосигналов;

e) определение профилей ветра и составление карт ветров;

f) инициирование моделей численного прогнозирования погоды;

g) определение влажности.

7.10.1 Общее слежение за погодой

Радиолокаторы могут обеспечить практически непрерывный мониторинг погоды, связанной со штормовыми возмущениями синоптического масштаба и мезомасштаба на большой территории (например, радиус 220 км и площадь обзора 125 000 км^2), если им не мешают здания, холмы, горы и т. п. Как правило, требуется только единое сканирование радиолокатором по малому углу в течение приблизительно 10—30 минут. Из-за кривизны Земли и траектории распространения радиолокационного луча максимальная практическая дальность метеорологических наблюдений составляет около 250—350 км, поскольку на бóльших расстояниях излучение радиолокатора будет проходить над метеорологическим объектом. Хотя радиолокаторы обладают достаточной чувствительностью для обнаружения объектов на большей дальности, предел современных радиолокаторов обусловлен высотой луча радиолокатора.

Радиолокатор с шириной луча антенны в 1° с углом места в 0,5° над уровнем горизонта действует в пределах приблизительно 10 км над земной поверхностью при дальности в 350 км. Помимо этого, ширина луча при этой дальности составляет порядка 7 км. Менее продолжительные штормы не будут обнаруживаться или их представление будет искажаться. Поэтому штормы должны быть достаточными по масштабам для обнаружения на такой дальности, и практически оперативно используются процессы сканирования на расстоянии даже в 500 км и более, особенно по границам радиолокационных сетей. В случае обнаружения эхосигналов прогнозисту предоставляется существенная информация об обширном и интенсивном шторме. Спутники и сети обнаружения молний могут предоставлять информацию об облачности и электрической активности метеорологических явлений, которые вызывают осадки или связаны с ними. Обмен радиолокационными данными для создания радиолокационной сети является необходимым и обязательным для создания мозаичной продукции с целью слежения.

Еще одним применением в области слежения является обнаружение погодных явлений в приземном слое (< 1 км), таких как снежные шквалы над озерами, морось и даже пыльные бури. Меньшая широта луча обеспечивает лучшее разрешение и бóльшую эффективность при бóльших расстояниях, поскольку они могут сканировать при меньших углах места без дополнительных эффектов отражения наземных объектов, могут обеспечивать заполненный луч на бóльших дальностях и имеют бóльшую чувствительность благодаря большему усилению. Появляются сети радиолокаторов X-диапазона, требующие меньшего технического обслуживания, менее значительной инфраструктуры и меньших расходов и которые могут заполнить этот пробел низкоуровневого сканирования радиолокаторов, работающих в широких S- и C-диапазонах.

Важное место в применениях радиолокаторов занимает в настоящее время кооперационный обмен метеорологическими радиолокационными данными между различными операторами. Он может обеспечить более широкий анализ крупномасштабных систем осадков, таких как фронты синоптического масштаба и тайфуны. Стандартные форматы радиолокационных данных обеспечат возможность и содействие для эффективной разработки межсетевой продукции. Ярким примером этого является то, что делается в рамках консорциума ОПЕРА.

Появляются радиолокационные сети, применяющие адаптивные и кооперационные стратегии сканирования (McLaughlin et al., 2009; Weber et al., 2007). Ведется разработка радиолокаторов с фазированной антенной решеткой, которые могут осуществлять сканирование в несопредельных направлениях по азимуту и возвышению для обеспечения высокой временной выборки быстро изменяющихся метеорологических явлений, таких как торнадо и нисходящие воздушные потоки, и даже для других целей, таких как воздушные суда. Сопредельные радиолокаторы могут также восполнить низкоуровневые пробелы в охвате благодаря эффектам распространения луча на дальние расстояния и, возможно, «конус молчания», обусловленный ограниченным сканированием угла места.

7.10.2 **Обнаружение опасных явлений погоды и предупреждение о них**

Радиолокатор — это единственное реальное средство мониторинга суровой погоды над обширной территорией (сотни километров дальности) благодаря временному разрешению (минута), пространственному разрешению (километры) и обнаруживаемым метеорологическим элементам (отражаемость от осадков). Величины интенсивности радиолокационных эхосигналов, их площадь и особенности используются для определения областей суровой погоды, включая грозы с возможным выпадением града и ветры разрушительной силы. Новые возможности открывают доплеровские радиолокаторы, которые могут определять и измерять параметры сильного ветра, связанные с фронтами порывов ветра, нисходящими микровихрями и торнадо (Lemon, 1978). Радиолокаторы с двойной поляризацией обладают способностью разделять эхосигналы, вызванные разными типами рассеивающих объектов, и могут отличать град от сильного дождя и дождь от снега (Zrnić et al., 2001). Номинальная дальность охвата одного радиолокатора составляет около 250 км, что является достаточным

1. Крупная ячейка с повышенной отражаемостью (MAXR>45 дБZ)
2. Высокий (эхосигнал на верхней границе зоны)
3. Зона слабого эхосигнала
4. Крюк/луч в форме почки
5. Эхосигнал на верхней границе восходящего потока/градиент низкого уровня отражаемости
6. Ротация Мезоциклоны
7. Нисходящие потоки
8. Град

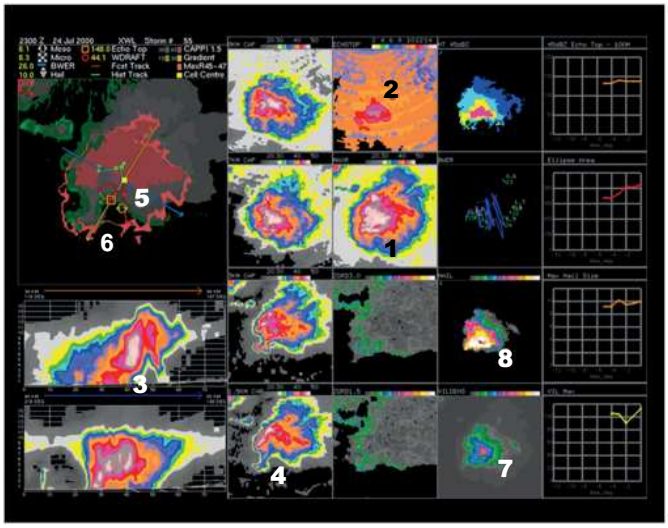


Рис. 7.24. Методики предупреждений сильных штормов перечислены слева (Lemon, 1978). Продукция вида ячейки — это изображение, в центре которого находится ячейка обнаруживаемой в автоматическом режиме грозы и которое показывает соответствующую продукцию для принятия решения (число ячейки соответствует номеру списка).

для местного краткосрочного прогноза с заблаговременностью порядка 1—2 часа и выпуска предупреждения. Радиолокационные сети расширяют охват и повышают заблаговременность прогноза (Germann et al., 2006*b*). Эффективные предупреждения требуют эффективной интерпретации, выполненной компетентным и хорошо подготовленным персоналом.

Методика радиолокационного предупреждения о грозовых образованиях

Создание методики по использованию радиолокатора для выпуска предупреждений приписывается Lemon (1978), который описал характеристики отражаемости для определения необходимости подготовки предупреждений о мощных грозовых явлениях, включая торнадо, сильный ветер, ливневый дождь, быстроразвивающийся бурный паводок и град. С тех пор к списку критериев были добавлены доплеровские характеристики и характеристики двойной поляризации, а также параметры отражаемости. На рисунке 7.24 перечислены (слева) и приведены в качестве примера (справа) характеристики суровой погоды (Lemon, 1978; Lemon et al., 1978). Эти характеристики включают сильную отражаемость в верхних слоях атмосферы, верхние границы эхосигналов, области слабого эхосигнала в верхних слоях атмосферы, характерных для сильных восходящих потоков воздуха, градиенты сильной низкоуровневой отражаемости и крючковидных изображений низкой облачности. Набор мультимодульных изображений (показаны в правой части рисунка 7.24) называется видом ячейки и создается автоматически, как только ячейка идентифицирована программным обеспечением для обработки радиолокационных данных. Подизображения являются производными радиолокационными продуктами, которые будут использованы аналитиком опасных явлений погоды для принятия решения относительно суровости бури, ее стадии в цикле развития и необходимости выпуска предупреждения. С учетом местоположения различных параметров грозы (например, местоположение верхней границы эхосигнала, местоположение центра бури или местоположение ограниченного района слабого эхосигнала) может быть составлена конфигурация линий поперечного разреза и могут быть автоматически созданы вертикальные поперечные сечения.

Временное и трехмерное пространственное отношение является важным для диагностики стадии развития бури для прогнозирования ее эволюции и соответственно для выпуска предупреждений о ней. Эта проблематичная задача, и не каждая грозовая система создает

Таблица 7.9. Характеристики грозы для разных предупредительных пороговых значений

Пороговые значения	Минимум	Слабый	Умеренный	Суровый
Ранги по весу	1	2	3	4
Класс (0—8)	0—2	3—4	5—6	7+
Значение ограниченного района слабого эхосигнала (BWER) count	5—11	12—17	18—21	22—26
Мезомасштабный сдвиг ($м \cdot с^{-1}$/км)	4	6	8	10
Размерградин (см)	0,5	1,3	2,3	5,0
Нисходящий поток ($м \cdot с^{-1}$)	10	15	20	25
Интегрированное по вертикали содержание жидкой воды ($кг \cdot м^2$/км)	2,2	3,0	3,5	4,0
Макс. Z (дБZ)	30	45	50	60
Высота верхней границы эхо-сигнала 45 дБZ (км)	5,5	8,5	10,5	12,5

метеорологические условия, приближающиеся к пороговому критерию суровости для выпуска предупреждений (см. таблицу 7.9). Применялась первоначальная методика, которая до сих пор используется в настоящее время и суть которой заключается в анализе различных видов продукции радиолокаторов и тщательном исследовании данных с использованием разнообразных способов (рисунок 7.24).

Первое применение доплеровского радиолокатора для обнаружения и отслеживания сильных гроз в режиме реального времени началось в начале 1970-х годов. Donaldson (1970) был, вероятно, первым, кто определил вихревую структуру потоков в сильной грозе. Квазиоперативные эксперименты продемонстрировали, что очень высокий процент этих признаков вихревых образований, определенных с помощью одного доплеровского радиолокатора, сопровождался вызывающим ущерб градом, сильным ветром одного направления или торнадо (Ray et al., 1980; JDOP, 1979). Это вихревое образование известно, как мезоциклон, который представляет собой вертикальный столб поднимающегося и вращающегося воздуха, обычно 2—10 км в диаметре. Признаком мезоциклона является незначительный аномальный режим доплеровской скорости, и он впервые наблюдался на средних уровнях шторма, который опускается до высоты образования облачности и может совпадать с явлением суровой погоды (Markowski, 2002; Burgess, 1976; Burgess and Lemon, 1990; рисунок 7.25). Вращение мезоциклонного происхождения во время сильных штормов является свидетельством сильного и длительного шторма, заслуживающего предупреждения о суровой погоде. Это явление идентифицируется как небольшие квазициркулярные области, движущиеся в направлении от шторма и к нему с радиальными скоростями, векторы которых расположены по одной линии приблизительно на постоянной дальности в азимутальном направлении, как видно из рисунка 7.25. Следует отметить, что необходимо исключить фактор движения шторма, с тем чтобы было легко видно соотношение векторов скоростей в противоположных направлениях. В северном полушарии вращение, как правило (но не всегда), происходит в направлении против часовой стрелки, а в южном полушарии — в обратном направлении. В ходе квазиоперативных экспериментов в Оклахоме (JDOP, 1979) такая последовательность дала возможность повысить заблаговременность предупреждения о сильном шторме и торнадо до 20 минут или больше. Во время этих экспериментов было отмечено, что приблизительно в 50 % всех случаев мезоциклонов возникали торнадо, сведения о которых были подтверждены; при этом все штормы, сопровождавшиеся разрушительными торнадо, формировались в средах со значительным сдвигом ветра и характеризовались сильными мезоциклонами (Burgess and Lemon, 1990).

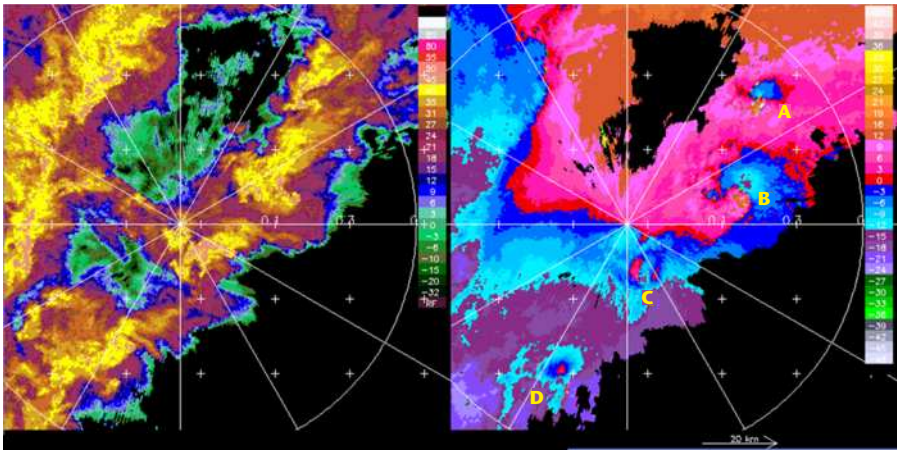


Рисунок 7.25. Многочисленные мезоциклоны (A-D) наблюдаются по линии шквалов и идентифицируются как пары относительных скоростей в обратном и прямом направлениях при постоянной дальности. Симметричные признаки скорости, наблюдаемые в ходе шторма, не являются очевидными или были исключены.

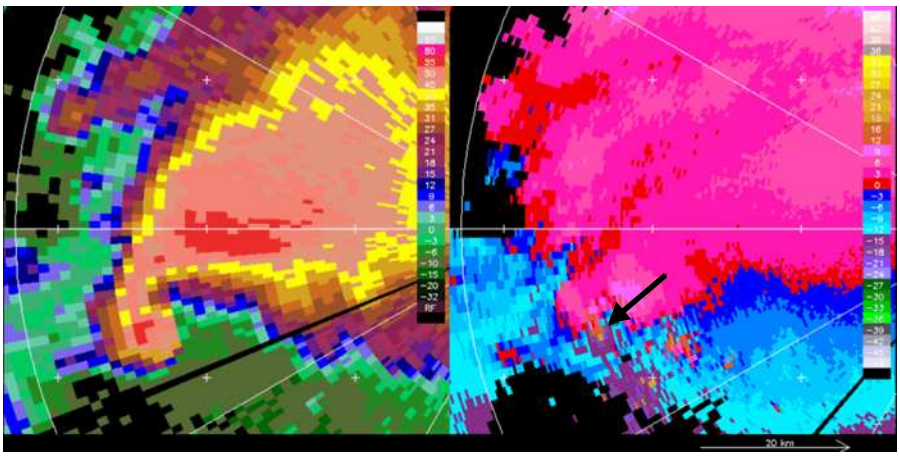


Рисунок 7.26. Признак вихревого торнадо определяется как пара относительных скоростей в обратном/прямом направлении на сопряженных элементах разрешения по дальности (см. стрелку на изображении справа), входящих в зону мезоциклона. На изображении слева показан классический крючкообразный эхосигнал.

Диаметр торнадо составляет приблизительно 200—500 м. Это часто соответствует разрешающей способности данных радиолокатора и поэтому с трудом поддается последовательному обнаружению, если только не применяется увеличение с высоким коэффициентом. В случае обнаружения торнадо он наблюдается в виде большого разброса радиальной скорости в сопряженных объемах радиолокационных данных, именуемого признаком торнадообразующего вихря, и это образование происходит внутри мезоциклона (рисунок 7.26). В некоторых случаях признак торнадообразующего вихря обнаруживали на высоте почти за полчаса или больше до того, как торнадо касался земной поверхности. Опыт изучения признака торнадообразующего вихря в течение многих лет показал его большую пригодность для определения местоположения торнадо, обычно в пределах ±1 км. Согласно оценкам, могут быть обнаружены 50—70 % торнадо, возникающих к востоку от высокогорных равнин Скалистых гор в США (Brown and Lemon, 1976). Большие значения ширины Доплеровского спектра (второй момент) были идентифицированы с местоположением торнадо. Однако большие значения ширины спектра также хорошо коррелируют с большими значениями турбулентности, возникающие во время шторма. На изображении отражаемости (рисунок 7.26, слева) наблюдается крючкообразный эхосигнал, являющийся признаком осадков, связанных с мощным нисходящим потоком воздуха в тыловой части грозы.

Дивергенция, вычисленная по данным о радиальной скорости, является, как представляется, хорошей мерой общей дивергенции. Оценки дивергенции на верхней границе шторма совпадают с оценками высоты вершины эхосигнала, которая является показателем мощности восходящего потока. Квазиоперативные эксперименты с доплеровскими радиолокаторами показали, что рост значения дивергенции может быть, вероятно, самым ранним признаком усиления шторма. Помимо этого, большие значения дивергенции вблизи вершины шторма являются, как выяснилось, приемлемым признаком града. Признаки дивергенции на нижних уровнях в виде нисходящих микровихрей регулярно отслеживались с помощью аэронавигационных доплеровских метеорологических радиолокаторов для защиты воздушных судов во время взлета и посадки. Эти радиолокаторы специально построены для обеспечения слежения на ограниченной площади и непрерывного быстрого сканирования воздушного пространства вокруг терминалов аэропорта. Микровихрь имеет жизненный цикл от 10 до 20 минут, что требует наличия специализированных радиолокационных систем для эффективного обнаружения (см. рисунок 7.27). Это является примером увлажненного нисходящего потока воздуха, который характеризуется соответствующим значительным преломлением. Сухие нисходящие потоки не могут быть опознаны в данных радиолокатора, если осадки испаряются и нет никаких других целей, которые радиолокатор должен обнаруживать. В этом случае требуется высокочувствительный радиолокатор или доплеровский лидар либо сеть анемометров. В случае подобного применения радиолокационно-компьютерная система автоматически представляет предупреждения для центра управления воздушным движением (Michelson et al., 1990). Мезомасштабные ветры (масштаб 40—50 км) с трудом поддаются интерпретации при помощи доплеровского радиолокатора, поскольку ориентация потоков исключает предположение о единообразии. Предположения должны строиться на направлении ветра, основанном на результатах научных исследований и концептуальной модели воздушного потока в пределах этих систем (Smull and Houze, 1987). К счастью, в некоторых случаях потоки и структура преломления отличаются друг от друга и можно идентифицировать сильные ветры и выпускать предупреждения. На рисунке 7.28 показана система, перемещающаяся в восточном направлении, и, соответственно, полная сила прямолинейных ветров (также известных как сильные прямые штормовые ветры), которая является очевидной в случае радиальных скоростей отдаления (оранжевый цвет) (маркировано как A). В этом случае движение на скоростях удаления происходит в направлении движения на скоростях приближения. Это также проявляется в виде изгиба эхосигнала радиолокационной отражаемости (изображение слева). При других азимутах радиальный ветер не является перпендикулярным к направлению движения системы (маркировано как B), и поэтому эти факторы должны учитываться аналитиком.

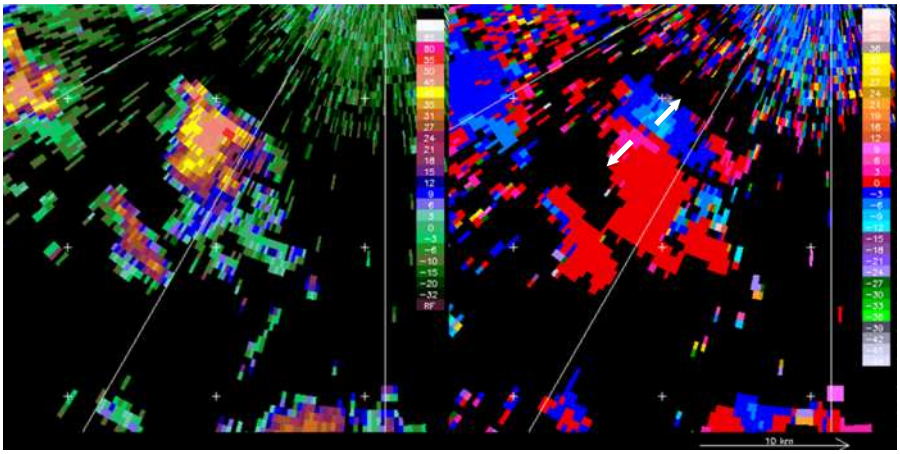


Рисунок 7.27. Нисходящий микровихрь (микро- или макро-) наблюдается в виде пары радиальных скоростей в обратном/прямом направлении, выравненных вдоль радиального вектора (см. стрелки на правом изображении). Это представляет собой быстро меняющуюся характеристику гроз и может быть следствием самых обычных и небольших гроз.

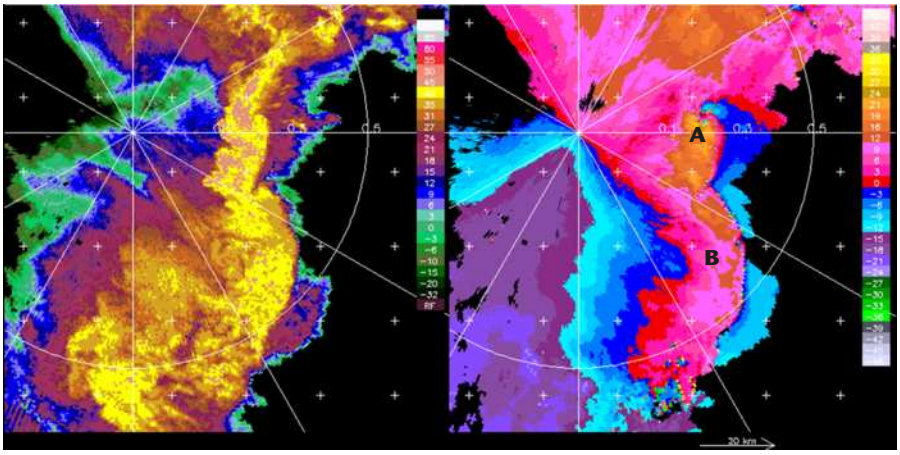


Рисунок 7.28. Другой признак весьма интенсивных опасных ветров может наблюдаться в качестве линейной или нелинейной характеристики в данных об отражаемости (слева) или радиальной скорости (справа).

Самым лучшим методом измерения ветра внутри зон осадков является кратный доплеровский метод, который использовался с середины 1970-х годов для научных исследовательских полевых программ ограниченной продолжительности. Однако на сегодняшний день оперативного использования в реальном масштабе времени двойных или тройных доплеровских анализов не ожидается из-за необходимости относительно близкого расположения радиолокаторов (~40 км). Исключением могут быть потребности аэропортов, касающиеся ограниченной зоны, где полезной может быть сеть радиолокаторов X-диапазона (McLaughlin et al., 2009 Wurman et al., 1995).

Для идентификации града с помощью 10-сантиметрового обычного радиолокатора было предложено множество методик, например по эхосигналу 50 дБZ на высотах 3 км или 8 км (Dennis et al., 1970; Lemon et al., 1978). Эмпирические, но ограниченные исследования показали способность предсказывать размер града (Treloar, 1998; Joe et al., 2004; Witt et al., 1998). Federer et al., (1978) обнаружили, что для определения вероятности выпадения града высота контура 45 дБZ должна превосходить высоту нулевой изотермы более чем на 1,4 км. Данный метод был доработан, прошел проверку в Королевском нидерландском

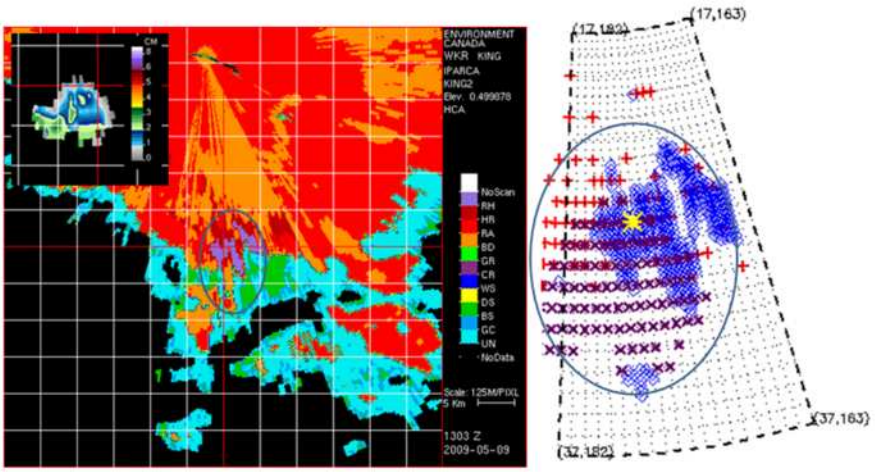


Рисунок 7.29. Приведенная иллюстрация — это отражательность, основанная на данных о размере градин, а большое изображение — продукт поляризационного разнесения для идентификации типа осадков, включая град. Изображение справа содержит подробный анализ этого примера. Рисунок любезно предоставлен Судеш Буду из Министерства окружающей среды Канады.

метеорологическом институте и используется в оперативном режиме (Holleman et al., 2000; Holleman, 2001). Иной подход к более совершенному обнаружению града связан с применением радиолокаторов, работающих на двух длинах волн — обычно в диапазонах X и S (Eccles and Atlas, 1973). Физические аспекты того, что радиолокатор «видит» на этих разных длинах волн, являются исключительно важными для понимания сильных сторон и ограничений этих методик (изменения площади сечения гидрометеоров или распределение интенсивности).

Исследования различных видов поляризации показывают определенные перспективы улучшения обнаружения града и оценки обильных осадков на основе дифференциальной отражаемости (Z_{DR}), измеряемой с помощью доплеровского радиолокатора с двойной поляризацией (Seliga and Bringi, 1976; рисунок 7.29). Изображение слева показывает классификацию радиолокационных эхосигналов посредством использования двойной поляризации для описания признаков состояния града. Для сочетания различных параметров двойной поляризации, таких как Z, Z_{DR}, ρ_{HV} и K_{DP}, широко используется методика нечеткой логики, с тем чтобы идентифицировать характер радиолокационного эхосигнала. В этом случае на изображении слева показана схема классификации, и она включает (сверху-вниз): град, сильный дождь, дождь, большие капли, снежную крупу, кристаллы льда, мокрый снег, сухой снег, биологические рассеиватели и отражения от локальных наземных предметов. На вставленном изображении показана оценка размера градин, основанная на сочетании интегрированного по вертикали содержания жидкой воды (VIL), максимальной отражаемости и уровня замерзания (Treloar, 1998; Joe et al, 2004). Показан максимальный размер градин в 3,2 см. На изображении справа дается подробное сравнение обнаружения града посредством двойной поляризации с использованием данных в двух разных разрешениях (знаки плюс для разрешения 1 км и ромбы для разрешения 250 м) и несколько иных временных периодов по сравнению с более старым методом отражаемости (крестики). Синий эллипс соответствует синему эллипсу на изображении слева. Все три алгоритма проверены градинами в 3+ см, о которых сообщалось в сводке по аэропорту (желтый знак, середина красных линий сетки).

Последние достижения включают автоматизированное обнаружение и классификацию гроз посредством передовых методов обработки данных (Lakshmanan et al., 2007; Joe et al., 2002; Joe et al., 2012). Эволюция гроз происходит в минутном временном масштабе, и осадки начинают выпадать на высоте. В этой связи для идентификации суровой погоды используются характеристики радиолокаторов как на высоте, так и вблизи поверхности. Таким образом радиолокатор должен осуществлять сканирование по многим углам возвышения с цикличностью времени порядка 5 минут.

Доплеровские радиолокаторы особенно полезны для мониторинга тропических циклонов и предоставления данных об их «глазе», «стене глаза» и динамической эволюции спиральных облачных лент, а также о местоположении и интенсивности ветров ураганной силы (Ruggiero and Donaldson, 1987; Baynton, 1979).

7.10.3 Прогнозирование текущей погоды

Строгим определением прогнозирования текущей погоды является предсказание во временном масштабе 0–2 ч, и традиционно это означает автоматизированную линейную экстраполяцию текущей ситуации, сообщаемой наблюдателями. Первоначальная система прогнозирования текущей погоды была основана на проведении анализа взаимной корреляции двух радиолокационных изображений (CAPPI) в отношении движения эхосигнала (Bellon and Austin, 1978). Анализ этого движения проводился в девяти секторах изображения и использовался метод экстраполяции эхосигналов до 90 минут вперед. Были определены точки для прогнозов текущей погоды и подготовлена метеограмма, которая показывала наиболее вероятные и возможные величины (рисунок 7.30). Рисунок слева — это единое изображение метеорологических условий, представленное как CAPPI, которая перемещается в направлении север-восток. Рисунок справа показывает прогноз текущей погоды (наиболее вероятный, колонка слева, и наиболее возможная отражаемость — колонка справа) для разных точек. Для ясности представления в этом примере указаны только две точки. Эта метеограмма, представленная в качестве

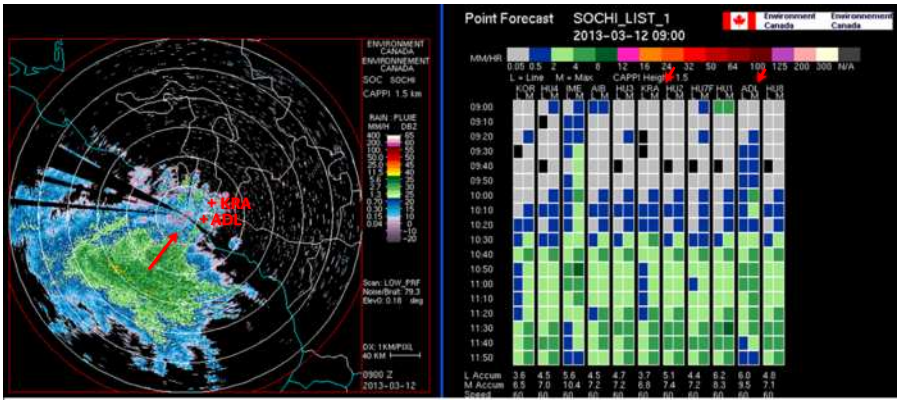


Рисунок 7.30. Пример взаимно-корреляционного прогноза текущей погоды. Погодные условия перемещаются с юго-запада (изображение слева) и на метеограмме справа показаны наиболее вероятные и наиболее правдоподобные показатели интенсивности осадков в разных местах (на изображении слева фигурируют только KRA и ADL, которые находятся на шестом и десятом местах на изображении справа).

изображения (текущее время указано сверху и будущие увеличения интервалов времени представлены с понижением до 10 минут). Характерным предположением в этом текущем прогнозе является то, что система осадков продолжает существовать в течение последующих 90 минут. Это иллюстрирует специфическую характеристику прогнозов текущей погоды и их точность в плане времени, пространства и метеорологического элемента. Точность данного прогноза текущей погоды весьма высока для первых 20–30 минут, и это обстоятельство используется в качестве принятия мер или подготовки предупреждения. Не предполагается никакого постепенного развития ситуации.

Благодаря использованию континентальной составляющей радиолокационных данных и масштабированного подхода к отфильтровыванию высокой частоты или мелкомасштабных характеристик отражаемости прогнозы текущей погоды крупномасштабных моделей обладают точностью до 6 или более часов, что превышает точность моделей численных прогнозов погоды в это же время. Это сопоставимо с 2—3 часами для более мелких масштабов. Однако эти уровни точности не могут обеспечить точность, необходимую для предупреждений о необходимости принятия мер.

Проводимые с помощью доплеровских радиолокаторов исследования роли линий конвергенции пограничного слоя в формировании новых грозовых систем подтверждают выводы более ранних спутниковых исследований облачных дуг. Имеются указания на то, что мезомасштабные линии конвергенции пограничного слоя (включая перекрещивающиеся фронтальные порывы ветра от предыдущей конвекции) играют основную роль в определении того, где и когда сформируются штормы. Wilson and Schreiber (1986) задокументировали и объяснили несколько случаев возникновения торнадо на линиях сдвига ветра при отсутствии осадков, которые наблюдались с помощью доплеровского радиолокатора (Mueller and Carbone, 1987).

Важным прикладным аспектом прогнозирования текущей погоды является анализ радиолокационных полей для условий начала конвекции. Последние научные исследования показали, что грозы, возникающие в условиях воздушной массы, которые ранее считались редкими и непредсказуемыми, фактически образуются при наличии определенных мелкомасштабных пограничных условий атмосферы (Wilson et al., 1998). Такие условия могут быть обнаружены как в поле отражаемости, так и в поле радиальной скорости эхосигналов в безоблачной атмосфере в качестве линейных характеристик или линий конвергенции (рисунок 7.31). Эти границы формируются разнообразными механизмами, включая озерные бризы: (A); оттоки воздуха из зоны грозы: (B); дренажные стоки с горных долин; сухие линии и прочие. Усиленный подъем, происходящий на

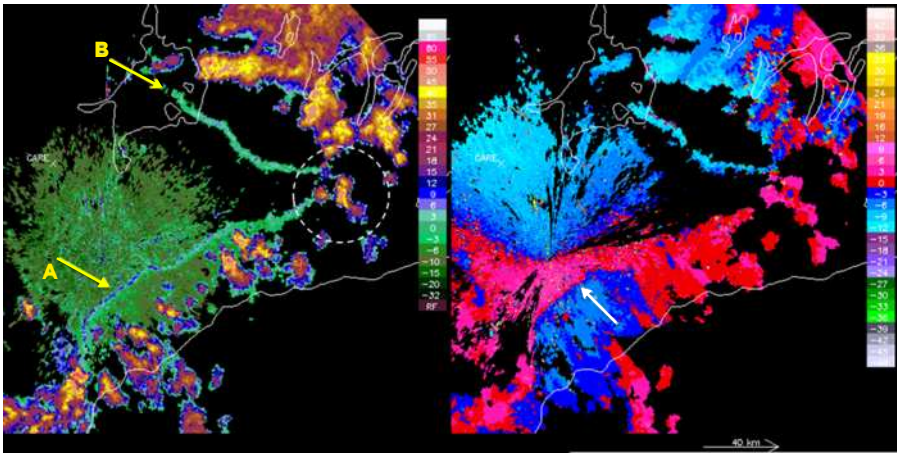


Рисунок 7.31. Современные радиолокаторы достаточно чувствительны для того, чтобы видеть озерный бриз и оттоки воздуха из зоны грозы (A и B соответственно, изображение слева). Точки взаимопересечения яляются местами ускоренного подъема и соответственно местами потенциального развития конвективных образований (см. явление образования шторма внутри штрихового круга белого цвета).

пересечении этих условий, может инициировать грозы. Следует отметить отчетливый признак конвергенции на изображении радиальной скорости (белая стрелка, изображение справа).

Источником эхосигналов в безоблачной атмосфере могут быть турбулентные флуктуации или насекомые. Исследования радиолокаторов с поляризацией показывают, что насекомые являются первичным источником таких отраженных радиолокационных сигналов. Расширения традиционных систем прогнозирования текущей погоды включают прогнозирование начала развития и рассеяния конвективных образований, моделирование жизненного цикла гроз и использование в данном анализе моделей численного прогнозирования погоды (Wilson et al., 1998; Sun et al., 2013). Помимо радиолокационных данных экстраполируются также соответствующие модельные поля, такие как температура и влажность (Crook and Sun, 2002; Sun et al., 2013). Ожидаемыми усовершенствованиями являются увеличение времени цикла (быстрое обновление до одного часа или еще меньше), уменьшение скорости раскрутки и улучшение физических характеристик моделей высокого разрешения (Sun et al., 2013). Еще одним появляющимся применением в области прогнозирования текущей погоды является разработка прогнозов выпадающих осадков по ансамблю, где малые масштабы проходят как процесс фильтрации, так и повторного создания, используя совокупность статистически последовательных оценок (Seed, 2003).

7.10.4 Оценка осадков

Длительное время радиолокаторы используются для оценки распределения, интенсивности и, таким образом, количества осадков, осуществляемой с высоким разрешением во времени и пространстве. Бóльшая часть исследований касается дождевых осадков, но при соответствующих допущениях о составе радиолокационной цели могут также производиться и измерения снега. Получение данных об интенсивности осадков основано, главным образом, на эмпирических связях отраженной мощности или отражаемости (Marshall and Palmer, 1948; Marshall and Gunn, 1952; Wilson and Brandes, 1979; Chandrasekar et al., 2003). Радиолокаторы с двойной поляризацией используют дополнительную информацию, основанную на сдвиге по фазе затухающей распространяющейся волны и на дифференциальном рассеятеле, обусловленном частицами несферической формы. Комплексные исследования града являются редкими из-за трудности, связанной со сбором наземных контрольных данных. Читателям следует ознакомиться с обзорами, подготовленными Joss and Waldvogel (1990) и Smith (1990), для всеобъемлющего обсуждения данных проблем и сложностей, а также вопросов

эффективности и точности. Появляющиеся системы обработки данных радиолокаторов способны исключать отражения от локальных наземных объектов (включая аномальное распространение) разнообразными способами и уменьшать проблему вертикального профиля отражаемости посредством корректировки осадкомеров или дисдрометров в квазиреальном времени.

7.10.4.1 ***Вертикальный профиль отражаемости***

На больших расстояниях обычно преобладают ошибки, вызванные невозможностью наблюдать осадки вблизи земной поверхности и незаполнением луча. В связи с увеличением или испарением осадков, движением воздуха и изменением фазы (лед и вода в слое таяния или яркая полоса) наблюдаются весьма изменчивые вертикальные профили отражаемости как в пределах данного шторма, так и от бури к буре. В случае конвективных дождевых осадков, как показывает опыт, возникает меньше трудностей, связанных с проблемой вертикального профиля. Однако при дожде или снеге, выпадающем из слоистообразных облаков, значение вертикального профиля возрастает. С увеличением дальности луч становится шире и проходит выше над земной поверхностью. Поэтому также возрастают различия между оценками количества дождевых осадков, измеренных с помощью радиолокатора, и их сумм, измеренных у земной поверхности. Отражаемость обычно снижается с высотой; поэтому в условиях слоистообразной облачности или снега дождь недооценивается радиолокатором. На рисунке 7.32 показаны три идеализированных вертикальных профиля отражаемости для разных метеорологических ситуаций. Они показаны при нулевой дальности. Эти профили во все большей мере сглаживаются по мере увеличения дальности из-за расширения луча. Также происходит эффект продвижения луча, и нижняя часть профиля не вносит больше вклад в измеряемую величину. На больших дальностях для приземных штормов, и в особенности, когда при малых углах места антенны происходит затенение такими препятствиями, как горы, недооценка может быть очень серьезной. Ошибка подобного типа часто преобладает над всеми остальными. Этому обстоятельству зачастую не придается значения в тех случаях, когда штормы наблюдаются только на близких расстояниях, или в случаях, когда анализируются штормы, которые располагаются приблизительно на одинаковом удалении. Эффективная дальность для количественной оценки осадков составляет порядка 80 км при ширине луча радиолокатора в 1° (рисунок 7.33) и больше для радиолокаторов с меньшей шириной луча (120 км для радиолокатора с шириной луча 0,65°) без внесения поправки.

При системе погоды в приземном слое атмосферы, которая преобладает в зимних условиях, эффект сглаживания луча (показан на рисунке 7.32) уменьшает отражаемость по мере увеличения дальности. Результатом этого являются накопленные значения (радиолокационная отражательная способность или производная интенсивности осадков), которые приобретают годовой характер, как это показано на изображении слева (рисунок 7.33). Неоднородное заполнение радиолокационного объема по мере изменения дальности также способствует быстрому уменьшению отражаемости. Сравнения с величинами, измеренными при помощи осадкомеров в течение сезона, показаны справа (соотношение радиолокационных измерений и измерений на месте при помощи осадкомеров) и являются иллюстрацией такого уменьшения измеряемых сумм осадков. В данном конкретном месте при ширине луча радиолокатора в 1° и при таком погодном режиме (Финляндия в зимний период) эффективная дальность (плоская часть кривой) составляет порядка 80 км для непосредственных оценок осадков. Поскольку дальний эффект является геометрическим, меньшая ширина луча увеличила бы эту эффективную дальность. Это проиллюстрировано для ширины луча в 0,65°, когда эффективная дальность увеличена почти до 110—120 км.

Ни один из методов осуществляемой в реальном масштабе времени компенсации эффектов вертикального профиля отражаемости не является широко признанным. Однако можно определить три метода компенсации, а именно:

a) корректировка зависимости от расстояния: эффект вертикального профиля связан с сочетанием возрастания высоты осей луча и его расширения при увеличении

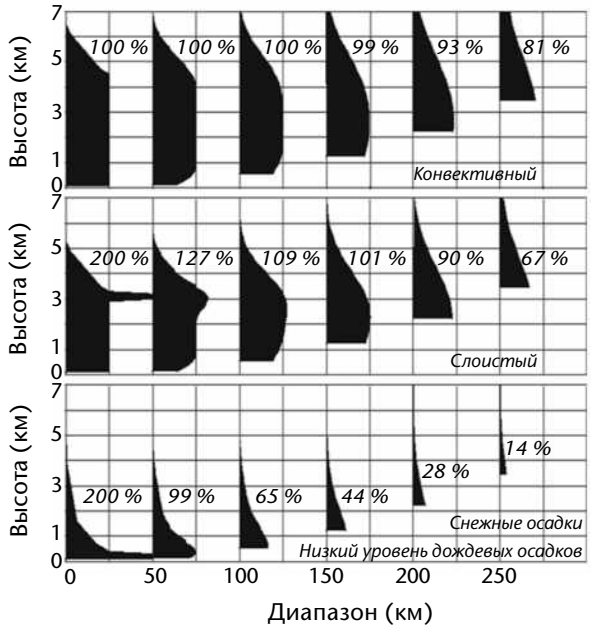


Рисунок 7.32. Сглаживание луча и характер его распространения изменяют внешний вид вертикального профиля отражаемости по мере изменения дальности. Показаны три ситуации с максимальной отражаемостью в вертикальном столбе атмосферы в виде процентной доли выпадения осадков на поверхность суши, при этом учитывается яркая полоса (заимствовано из работы Joss and Waldvogel, 1990).

дальности. Соответственно для получения корректировки первого порядка может применяться средний климатический коэффициент зависимости от расстояния. Разные коэффициенты могут быть приемлемыми для разных категорий штормов, например конвективный шторм в отличие от слоистообразного;

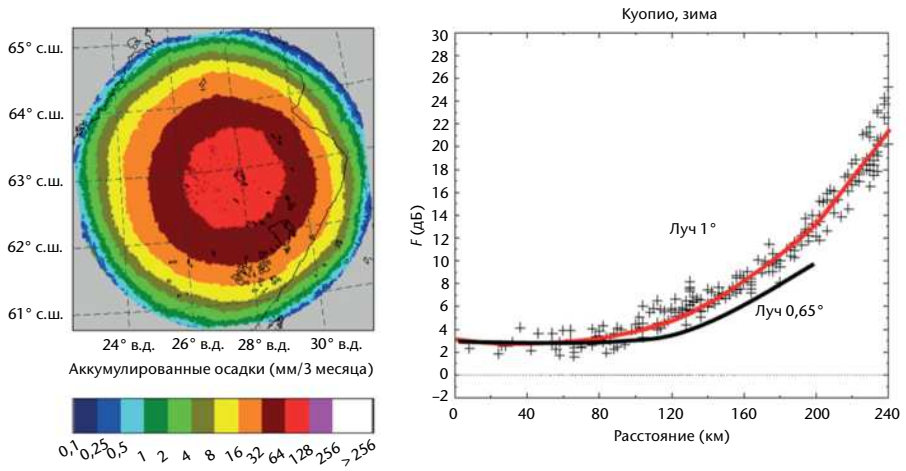


Рис. 7.33. На этом рисунке показаны аккумулированные за зимний сезон суммы осадков, рассчитанные по данным радиолокатора. Описание годового режима осадков объясняется, в первую очередь, отсутствием заполнения луча на дальних расстояниях для приземных метеорологических систем. На изображении справа показано, каким образом это представляется в виде погрешности определения дальности путем сравнения данных датчиков радиолокатора (рисунок любезно предоставлен Даниэлем Микельсоном из Шведского метеорологического и гидрологического института, а также использованы данные, предоставленные Финским метеорологическим институтом).

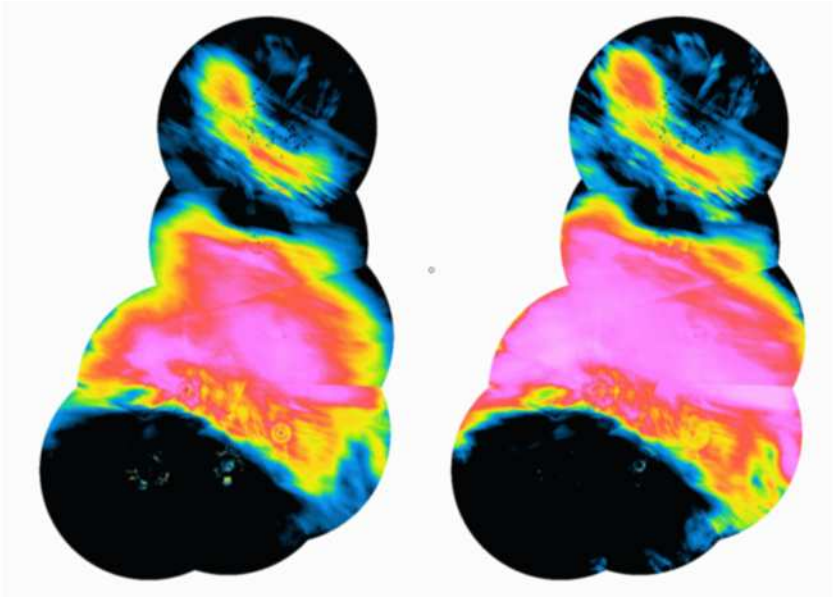


Рисунок 7.34. Этот рисунок показывает случай стационарного атмосферного фронта, ориентированного по направлению восток-запад. На изображении слева показано резкое снижение по мере увеличения дальности (см. рисунок 7.33). На изображении справа показана внесенная в данные корректировка дальности (рисунок любезно предоставлен Ярмо Коистиненом, Финский метеорологический институт).

b) пространственно изменяющаяся корректировка: в ситуациях, когда характеристики осадков систематически изменяются в зоне слежения или когда зона охвата радиолокатора является неоднородной из-за топографии или локальных препятствий, полезными могут быть поправки, изменяющиеся как по азимуту, так и по дальности. Если имеется достаточная справочная информация, то можно вносить средние поправочные коэффициенты в соответствующие справочные таблицы. В противном случае, поправки должны выводиться из самих данных об отражаемости или из сравнений с показаниями осадкомеров;

c) полные вертикальные профили: вертикальные профили в штормах изменяются по месту и времени, а самый низкий уровень, видимый для радиолокатора, обычно изменяется из-за нарушения радиогоризонта. Соответственно для получения наилучших результатов может понадобиться осуществляемый от точки к точке процесс корректировки с использованием репрезентативного вертикального профиля для каждой представляющей интерес зоны. Репрезентативные профили могут быть получены с помощью самих радиолокационных данных по объему сканирования, климатологических справочников или из моделей штормов. Это наиболее сложный подход, но он может быть осуществлен с помощью современных систем данных (Joss and Lee, 1993).

На рисунке 7.34 показан пример последнего упомянутого метода корректировки вертикального профиля отражаемости в случае эффекта расстояния, который в настоящее время используется в повседневной практике радиолокационной сети. На рисунке слева показано 24-часовое накопление значений интенсивности осадков, полученных при помощи радиолокатора, в течение прохождения стационарного атмосферного фронта. Предполагается, что общие характеристики будут весьма разнообразными. Рисунок справа создан посредством корректировки эффекта вертикального профиля на дальних расстояниях и соответственно увеличены накопления по краям. Различие в изображениях также иллюстрирует выгоды сетевого подхода к созданию продукции по осадкам, поскольку эффект вертикального профиля отдельных радиолокаторов не является столь очевидным внутри сети.

Улучшения в области цифровой обработки радиолокационных данных и интеграция в режиме реального времени с сетями осадкомеров привели к разработке новых количественных, основанных на данных радиолокаторов видов продукции для гидрометеорологических применений. Ряд европейских стран и Япония используют такие виды радиолокационной продукции наряду с численными моделями для оперативного прогнозирования паводков и контроля за ними (Berenguer et al., 2012; Cluckie and Owens, 1987). Синтез данных радиолокаторов и данных осадкомеров предоставляет весьма эффективный продукт прогнозирования текущей погоды для мониторинга дождевых осадков. Анализ радиолокационных данных об осадках (AMeDAS) является одним из видов продукции, представляемых в Японии (Makihara, 2000). Интенсивность эхосигнала, полученная от сети радиолокаторов, преобразуется в интенсивность осадков с использованием соотношения Z-R, а количество осадков, выпавшее за один час, оценивается по интенсивности осадков. Оценочные количества осадков затем калибруются с использованием значений количеств осадков, полученных при помощи осадкомеров, для подготовки с высокой точностью карты осадков, выпавших за один час.

7.10.4.2 ***Соотношение Z-R***

В оптимальных условиях (близко к радиолокатору, никаких ложных сигналов) осадки обычно оцениваются с использованием соотношения Z-R:

$$Z = A\,R^b \tag{7.13}$$

где A и b — постоянные величины. Это соотношение не является единственным, и для различных климатических условий или местоположений, а также типов штормов, было разработано очень много эмпирических зависимостей. Номинальные и типовые значения коэффициента и показателя степени составляют: A = 200, b = 1,60 (Marshall and Palmer, 1948; Marshall and Gunn, 1952). Эти значения могут применяться при точности коэффициента 2 как для дождя, так и снега. Данное уравнение выведено в рамках ряда допущений, которые не всегда бывают полностью справедливыми. Тем не менее история и опыт показали, что это соотношение в большинстве случаев дает надежную оценку осадков у земной поверхности, если только не присутствуют очевидные аномалии (рисунок 7.35). Обзор использования соотношений Z-R в мировом масштабе показал, что соотношение Маршалла-Палмера используются в 80 % оперативных метеорологических радиолокаторов, что является замечательным достижением, учитывая весьма малое число измерительных точек, использованных для формулирования первоначального соотношения (Sireci et al., 2010). Красной линией на рисунке 7.35 показано первоначальное соотношением Маршалла-Палмера (приводится в работе Marshall and Gunn, 1952, и Marshall and Palmer, 1948). В течение ряда лет предпринимались попытки внести улучшения; черные линии показывают эти другие соотношения (Battan, 1973). Примечательно, что первоначальное соотношение, полученное по незначительному числу измерений и в конкретном режиме метеорологических условий, прошло испытание временем.

Имеются некоторые общие положения, которые можно констатировать. При длинах волн 5 см и 10 см аппроксимация Рэлея действительна для большинства практических целей до тех пор, пока не появляются зародыши градин (Z > 57 дБZ во многих случаях принимается как линия раздела между дождем и градом). Большие концентрации ледяных кристаллов, смешанные с каплями, могут вызывать аномалии, особенно вблизи уровня таяния. Принимая во внимание коэффициент преломления для льда (т.е. $|K|^2$ = 0,208) и выбирая соответствующие соотношения между коэффициентом отражаемости и интенсивностью осадков (Z по отношению к R), можно достаточно точно оценить количество осадков при наличии снега (значение, равное 0,208 вместо 0,197 для льда, используется для учета изменения диаметра капель воды и ледяных кристаллов в эквивалентной массе). Однако измерения выпадающего снега при помощи осадкомеров являются проблематичными и имеется недостаточное количество всеобъемлющих исследований, посвященных соотношениям между радиолокационной отражаемостью и интенсивностью снегопада.

Интенсивность дождя (R) является производной от влагозапаса и скорости падения частиц в облучаемом радиолокатором объеме. Она примерно пропорциональна

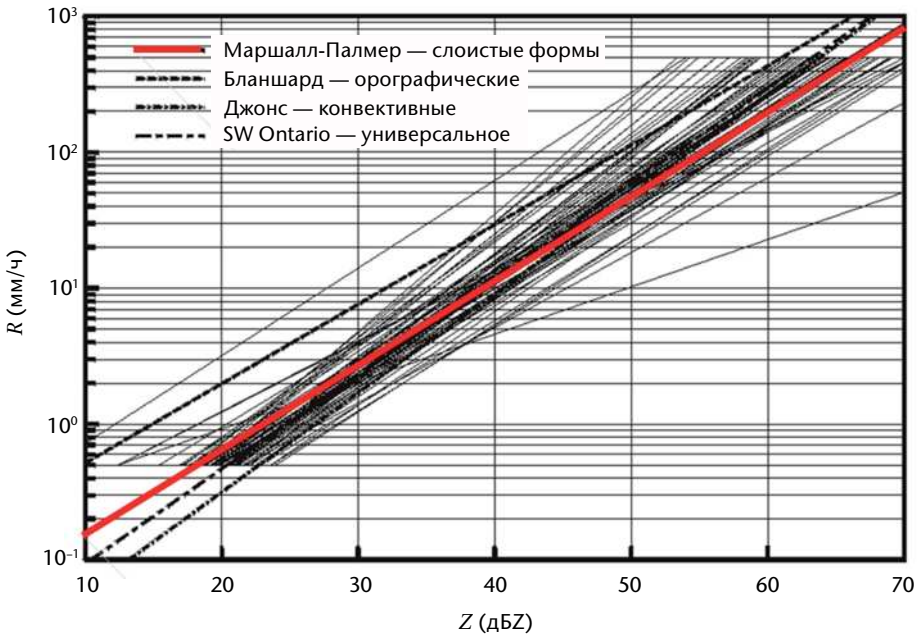


Рисунок 7.35. Графическое изображение множества соотношений Z-R из работы Battan (1973).

четвертой степени диаметров частиц. Поэтому не существует единого соотношения между радиолокационной отражаемостью и интенсивностью осадков, поскольку оно зависит от распределения частиц по размерам. Таким образом, естественная изменчивость распределений капель по размерам является важным источником неопределенности при радиолокационных измерениях осадков в тех случаях, когда учитываются другие факторы.

Эмпирические связи Z-R, а также их изменчивость от шторма к шторму или во время единичного шторма были предметом многих исследований на протяжении последних 40 лет, особенно в исследованиях штормовых событий. Соотношение Z-R может быть получено путем расчетов значений Z и R по измеренным распределениям капель по размерам, выполненным с помощью прибора, известного как дисдрометр. Альтернативой является сравнение величины Z, измеренной на высоте с помощью радиолокатора (тогда она называется эквивалентной радиолокационной отражаемостью и обозначается Z_e), с величиной R, измеренной у земной поверхности. В последнем подходе предпринимается попытка учесть любые различия между осадками на высоте и осадками, которые достигают земной поверхности. Он также может включать ошибки калибровки радиолокатора, поэтому результат не определяется строго соотношением Z-R. Дисдрометры используются в настоящее время в оперативных сетях для определения соотношения Z-R для целей климатологии, исследований штормов и корректировки в режиме реального времени; дисдрометры являются весьма чувствительными и могут обнаруживать очень слабые осадки.

Достаточно большое внимание уделялось эмпирическому соотношению Z-R в зависимости от классификации штормов по типу дождя (такого как конвективный, неячейковый, орографический). Несмотря на то, что изменения в распределении капель по размерам, бесспорно, являются важными, их относительная значимость часто переоценивается. После некоторого осреднения по времени и/или пространству ошибки определения интенсивности выпадения дождя, связанные с этими изменениями, редко превышают 100 % (в два раза). Они являются основными источниками ошибок в четко организованных экспериментах на малых дальностях.

7.10.4.3 *Корректировка осадкомеров*

Существует общее согласие в отношении того, что сравнение с данными осадкомеров следует производить регулярно, как и проверку эффективности работы радиолокатора, и вводить соответствующие поправки, если отклонения данных радиолокатора четко определены. Однако это следует делать осмысленно, поскольку внесение поправок в одну ситуацию может вызвать проблемы в другой ситуации. В ситуациях, когда радиолокационные оценки сильно расходятся с принятыми за эталон из-за калибровки радиолокатора или других причин, такие поправки могут привести к значительным улучшениям.

Оценки осадков на уровне земной поверхности, получаемые с помощью радиолокационных систем, осуществляются для площадей с пространственным разрешением, как правило, 1—4 км^2 и за последовательные 5—15-минутные интервалы с помощью индикатора кругового обзора (ИКО) при малом угле возвышения (углы возвышения < 1°), комбинированной продукции ИКО постоянной высоты или даже продукции более высокой категории сложности. Согласно полученным данным, радиолокационные оценки интенсивности осадков сравнимы с локальными измерениями по осадкомеру с коэффициентом в пределах 2. Осадкомер отбирает пробы на исключительно небольшой площади (100 см^2, 200 см^2), в то время как радиолокатор определяет среднее значение по объему в гораздо более крупном масштабе (1—4 км^2). Это различие объясняет значительную степень несоответствия. Имеются указания на то, что точность осадкомера может, для некоторых задач, оказаться гораздо ниже зачастую предполагаемой, особенно если оценки получены по данным относительно небольшого количества осадкомеров (Neff, 1977). Важным аспектом является система сбалансированных показателей. Сезонные средние значения могут быть приемлемыми в некоторых применениях и единое соотношение Z-R может быть достаточным. Однако для предупреждений о быстроразвивающихся бурных паводках может потребоваться введение поправок в режиме реального времени.

Следует обратить внимание на то обстоятельство, что такие поправки автоматически не обеспечивают улучшения радиолокационных оценок, и иногда скорректированные оценки хуже, чем исходные. Это в особенности справедливо для конвективных дождей, когда вертикальное расширение эхосигнала смягчает проблемы, связанные с вертикальным профилем, и данные осадкомеров являются сомнительными из-за нерепрезентативности измерений. Кроме того, пространственный радиус корреляции может быть малым, и соотношение осадкомер-радиолокатор становится все более неточным с увеличением расстояния от осадкомера. Общий принцип заключается в том, что поправки будут давать существенное улучшение только тогда, когда систематическая разница (т.е. отклонение) между оценками осадков по осадкомеру и радиолокатору больше, чем стандартное отклонение случайного рассеяния при сравнении данных осадкомера и радиолокатора. Такой принцип позволяет судить о том, следует ли использовать данные осадкомеров для корректировок, а также приводит к заключению, что имеющиеся данные необходимо проверять перед непосредственным введением любой поправки. Были исследованы различные методы выполнения этой процедуры, но к настоящему времени широко применяемого подхода не имеется.

7.10.4.4 *Методики измерения осадков с помощью радиолокаторов с двойной поляризацией*

Для использования радиолокатора с поляризационным эффектом в целях улучшения измерений жидких осадков предложены разные методики. В частности, было выдвинуто предположение о том, что различие между значениями отражаемости, измеренными при горизонтальной и вертикальной поляризации (Z_{DR}), или сдвиг по фазе (ϕ_{DP} или K_{DP}), может дать полезную информацию о распределениях капель по размерам (Seliga and Bringi, 1976). Эти методы зависят от гидродинамических возмущений формы больших капель дождя; более интенсивные дожди с более крупными каплями дают более сильные признаки поляризации. В первую очередь, должно быть скорректировано ослабление сигнала и затем вновь применена методика двойной поляризации. Однако все еще

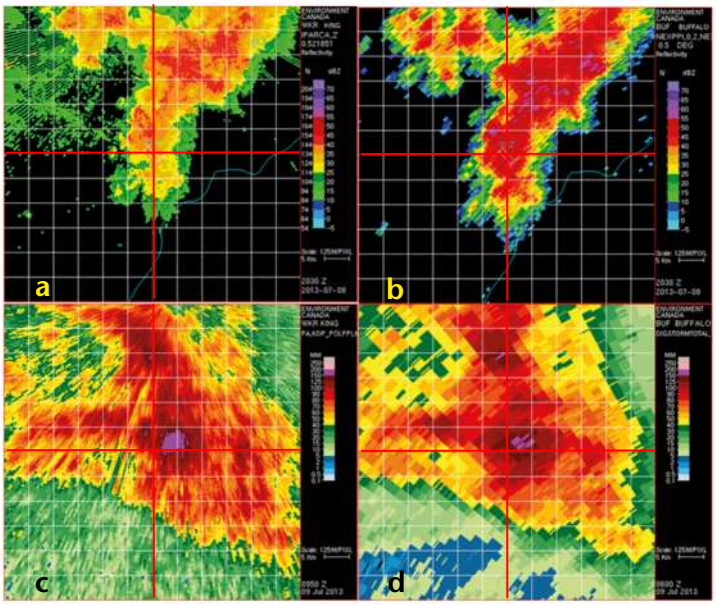


Рисунок 7.36. На верхних рисунках показано ослабление сигнала радиолокатора C-диапазона (a) по сравнению с радиолокатором S-диапазона (b) в фиксированный момент времени. На нижних рисунках представлены аккумуляции осадков равномерно в течение всего периода явления и продемонстрировано поразительное сходство после введения поправок с использованием метода поляризационного разнесения (см. также рисунок 7.37, любезно предоставленный Судешом Буду из Министерства окружающей среды Канады).

имеются значительные расхождения во мнениях по поводу того, имеет ли эта методика перспективу оперативного использования при измерениях осадков (English et al., 1991). На длинных волнах более высокими являются пороговые значения интенсивности дождя, при которых методика K_{DP} является эффективной (например, в S-диапазоне эта величина составляет порядка 20 мм·ч$^{-1}$, а в X-диапазоне — порядка 4 мм·ч$^{-1}$).

На малых дальностях (при высоком пространственном разрешении) радиолокаторы с поляризационным эффектом могут дать ценную информацию о распределениях частиц осадков и других параметрах, относящихся к физике облаков. На бóльших дальностях нельзя быть уверенным в том, что луч радиолокатора заполнен однородно распределенными гидрометеорами. Соответственно неопределенность эмпирической связи признака поляризации с распределением капель по размерам растет. Конечно, поможет увеличение знаний о соотношении Z-R, но даже если многопараметрические методики будут работать прекрасно, можно уменьшить ошибку, вызываемую соотношением Z-R, только с 33 % до 17 %, как это указывается в работе Ulbrich and Atlas (1984). Для гидрологических применений на малых дальностях поправки для других отклонений (уже описанных) обычно гораздо больше, возможно, на порядок величины или более.

Радиолокаторы с двойной поляризацией способны решать проблему ослабления сигнала, частичного заполнения луча и частичного затенения лучей. На рисунке 7.36 показан радиолокатор C-диапазона, в котором методика поляризации используется для корректировки ослабления сигнала. Параметры двойной поляризации чувствительно реагируют на размер и форму крупных частиц, и чем меньше длина волны, тем больше чувствительность радиолокатора. В этом примере наблюдения за системой осадков, которая вызвала локализованное наводнение, велись при помощи радиолокатора C-диапазона и радиолокатора S-диапазона. Радиолокатор C-диапазона (Кинг-Сити, с шириной луча 0,65°) находился на расстоянии порядка 40 км от места наводнения, а радиолокатор S-диапазона (Буффало, с шириной луча 1°) — на расстоянии примерно 100 км. На изображениях (a) и (b) показан один пример низкого уровня

радиолокационной отражаемости с обоих радиолокаторов. Красные сетевые линии — это базовые линии. Осадкомер находится в месте, расположенном около 7 км к юго-западу. Сигналы радиолокатора S-диапазона ослаблены по сравнению с сигналами радиолокатора S-диапазона (изображение (b) является более насыщенным по цвету по сравнению с изображением (a)). Во время этого явления происходило намокание антенного обтекателя радиолокатора C-диапазона, что также вызывало значительное затухание сигнала. На изображениях (c) и (d) показаны аккумуляции осадков, данные о которых основаны на соответствующей информации об осадках, полученной при помощи двойной поляризации за восьмичасовой период продолжительности этого явления (см. также рисунок 7.37). Различие в разрешении является очевидным, однако структуры аккумуляции осадков являются схожими. Это является иллюстрацией значительного потенциала радиолокатора S-диапазона с двойной поляризацией для преодоления существенного ослабления сигнала. Интересным является тот факт, что оценка осадков с двойной поляризацией посредством радиолокатора S-диапазона фактически является более низкой и более близкой к данным осадкомера (не показано) по сравнению с использованием традиционного соотношения Z-R, поскольку для предотвращения переоценки использовалась классификация частиц града в сопоставлении с дождевыми каплями.

На рисунке 7.37 показано сравнение разных оценок дождевых осадков, полученных при помощи радиолокаторов C- и S-диапазонов и данных осадкомера. Нижняя (C1) и верхняя (S1) линии — это аккумуляции, данные о которых основаны на традиционной простой отражаемости, преобразованной в интенсивность дождя ($Z = 300\ R^{1.4}$) по данным радиолокатора C-диапазона (40 км от площадки осадкомера) в Кинг-Сити и радиолокатора S-диапазона (100 км от площадки осадкомера) в Буффало. Оба радиолокатора хорошо откалиброваны, и к этим данным применялась только доплеровская фильтрация отражений от местных наземных предметов. Линия Z_{AC}-R (C2) — это только отражаемость с корректировкой ослабления сигнала Z_{DR}-, преобразованная в интенсивность дождя и суммарное накопление. Пунктирная (S2) и темно-синяя (C3) линии — это оценки осадков, полученные при помощи методики смешанной двойной поляризации по данным радиолокатора S-диапазона (S2) и методики K_{DP}-R по данным радиолокатора C-диапазона (C3) соответственно. Улучшенные результаты радиолокатора в Буффало S-диапазона объясняются устранением вызванной градом погрешности с использованием методики классификации частиц при помощи двойной поляризации. Точность оценок радиолокатора в Кинг-Сити C-диапазона повышается благодаря методике специальной дифференциальной фазы (K_{DP}-R), которая не реагирует на ослабление сигнала, частичное затенение луча и частичное заполнение луча. Это является иллюстрацией воздействия двойной поляризации на количественное использование радиолокаторов как S-, так и C-диапазона. Это также иллюстрирует более значительное влияние двойной поляризации на работу радиолокаторов C-диапазона.

Проведение различия между дождем/снегом/градом и другая классификация целей

В случае обычных или работающих только по принципу радиолокационной отражаемости радиолокаторов для получения грубой оценки природы метеорологической цели использовались структура и интенсивность эхосигнала. В летний период величины отражательной способности менее порядка 12 дБZ рассматривались в качестве эхосигналов отсутствующих осадков; слабый дождь характеризовался величинами до порядка 30 дБZ, а сильный дождь — величинами до порядка 50 дБZ и т.д. Величины отражаемости более 57 дБZ воспринимались как град. Снег обычно не различается отдельно этими типами радиолокаторов по горизонтали. По вертикали яркая полоса (область повышенной отражаемости вследствие больших накоплений мокрого снега) отделяла снег на высоте от выпадающего ниже дождя. Радиолокаторы с двойной поляризацией дают характеристики цели, используя информацию об отражательной способности из ортогональных каналов, их кросс-поляризованный сигнал и изменения в фазе распространения. Применялись также данные о приземной температуре и влажности, а также исследований с использованием моделей численного прогнозирования погоды. В случае методики нечеткой логики используются независимые оценки, полученные на основе разнообразных параметров двойной поляризации, с тем

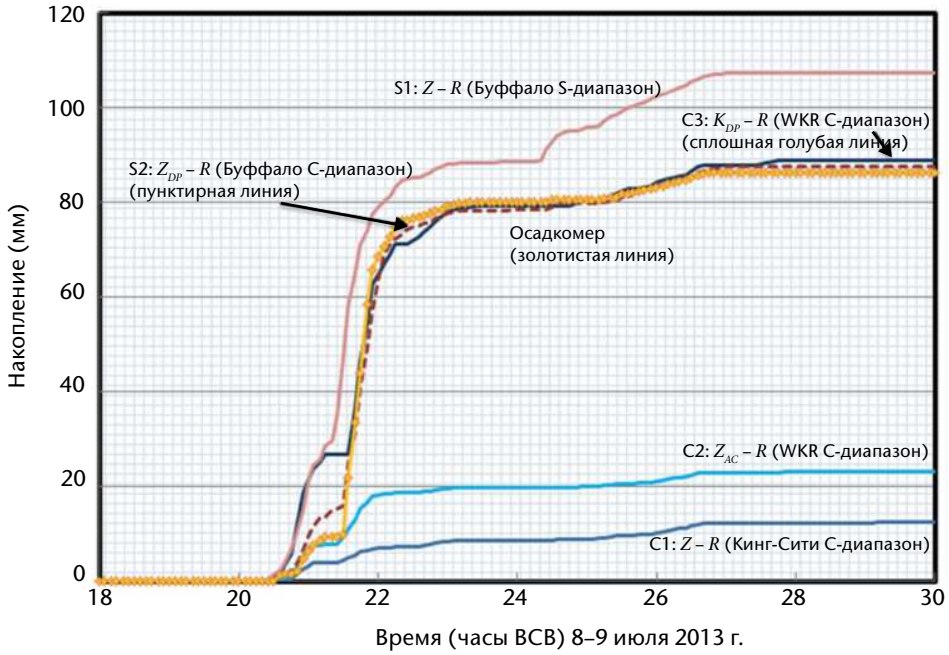


Рисунок 7.37. Метеограмма накопленных дождевых осадков, составленная по показаниям осадкомера (желтая линия с условными обозначениями), и оценки аккумулированных осадков — три в C-диапазоне (C1, C2, C3) и две в S-диапазоне (S1, S2) — с использованием разнообразных методов разнесения в диапазонах для одного места размещения осадкомерных пунктов; пункт находится приблизительно в 7 км к юго-западу от центра (см. также рисунок 7.36, любезно предоставленный Судешом Буду из Министерства окружающей среды Канады.

чтобы классифицировать тип эхосигнала по разнообразным категориям, в том числе: помехи от земной поверхности, дождь, снег, град, биологические рассеиватели и еще большие и маленькие капли (рисунок 7.29).

Самолеты идентифицировались как изолированные точечные аномалии, а отражения сигналов от земной поверхности идентифицировались как стационарные или постоянные эхосигналы на близком расстоянии вокруг радиолокатора. Отражательные способности самолетов и эхосигналы от наземных объектов могут значительно изменяться, поскольку небольшие изменения, в зависимости от угла обзора, приводят к существенным изменениям в обратном рассеянии.

Доплеровские радиолокаторы могут идентифицировать неподвижные цели, такие как отражения сигналов от земной поверхности и аномально проходящие эхосигналы, причем даже во время происходящих метеорологических явлений. Эти наземные цели могут быть эффективно отфильтрованы в процессе обработки сигналов для получения «скорректированной (для отражений от локальных наземных предметов) отражаемости». В большинстве, если не во всех современных радиолокаторах, используется доплеровский эффект, и они обладают такой возможностью. До появления доплеровских радиолокаторов использовались разнообразные методики для удаления эхосигналов мешающих отражений от наземных объектов, включая: (i) CAPPI; (ii) карты помех; и (iii) статистическую флуктуацию статистических данных об отражаемости.

7.10.5 Оценка скорости ветра/составление карт ветров

Доплеровские скорости — это радиальные скорости, и комбинация подлинных значений скоростей может дать ту же самую радиальную скорость. Соответственно сами по себе радиальные скорости являются неоднозначными и требуют упрощения предположений для их интерпретации. На обычных цветных дисплеях скорости между $\pm V_{max}$ обычно

отображаются теплыми/холодными цветами для указания обратного/встречного направления. Скорости, выходящие за пределы скорости Найквиста (неоднозначной или увеличенной), вводятся в цветовую шкалу с противоположного конца. Этот процесс может повторяться, если скорости накладываются более, чем на один интервал Найквиста.

7.10.5.1. ***Измерения профиля ветра***

Доплеровский радиолокатор может быть также использован для получения вертикальных профилей горизонтальных ветров синоптического масштаба. Когда антенна радиолокатора нацелена в горизонтальном направлении, увеличение расстояния влечет за собой увеличение высоты. Если предполагается, что ветер является относительно однородным или линейным над зоной сканирования, то его профиль по высоте может быть получен путем аппроксимации наблюдаемых данных синусоидальной кривой (именуемой индикатором «скорость-азимут» (ИСА) согласно Lhermitte and Atlas, 1961). Ветры в ячейках с нулевой радиальной скоростью являются перпендикулярными к осям луча радиолокатора. Для простой интерпретации данных ИСА, полученных от крупномасштабных систем осадков, может быть использовано цветное отображение. На типовых изображениях, полученных путем конического сканирования в обложных осадках, обнаруживается контур нулевой радиальной скорости, имеющей форму буквы S, поскольку средний ветер изменяет направление с высотой (Wood and Brown, 1986). В других случаях явно просматриваются замкнутые контуры, представляющие струйные течения. Выборку полей ветра синоптического масштаба, полученных при помощи доплеровского радиолокатора, см. на рисунке 7.12.

Если можно сделать предположение в отношении однородности, то в таком случае, применяя методику ИСА, можно также получить оценки дивергенции посредством подбора для уравнения кривой с постоянным членом. Эту методику невозможно с достаточной точностью использовать в периоды выпадения конвективных осадков в окрестностях радиолокатора, поскольку не будет соблюдаться предположение относительно однородности. С помощью доплеровских радиолокаторов были успешно получены данные ИСА профилей ветра и оценки дивергенции в оптически прозрачном пограничном слое в течение практически всех самых холодных месяцев до высот 3—5 км над уровнем земли. Представляется, что методика ИСА хорошо подходит для измерения ветров в системах осадков, связанных с внетропическими и тропическими циклонами. При использовании радиолокатора в режиме «безоблачная атмосфера» временные ряды измерений дивергенции и вычисленной вертикальной скорости являются особенно полезными при текущем прогнозировании вероятности глубокой конвекции.

7.10.5.2 ***Характеристики конвективного ветра***

В случае конвекции мелкомасштабные характеристики ветра обусловливаются дивергенцией, конвергенцией и ротацией, наблюдаемыми при фронтальных порывах, нисходящих потоках, мезоциклонах и т. д. Эти явления наблюдаются в виде небольших аномалий в масштабе от одного до десятков километров, которые являются частью основных потоков масштабами в сотни километров. Благодаря предположениям относительно потока воздуха, и в сочетании с концептуальными моделями и пониманием сути грозовых явлений или мезомасштабных конвективных систем, цветные отображения полей радиальной скорости, полученные с одного доплеровского радиолокатора, могут помочь в интерпретации данных и диагностике суровости грозового явления в режиме реального времени (Burgess and Lemon, 1990). Lemon (1978) составил перечень параметров и процедуру диагностики для идентификации сильных гроз (см. 7.10.2). Конвективные параметры ветра мешают интерпретации полей радиальной скорости, в частности, когда присутствуют мезомасштабные потоки в масштабе 40—100 км и трехмерные режимы, такие как наблюдаемые в гористой местности со сложным рельефом.

7.10.5.3 ***Составление карты ветров***

С середины 1970-х годов проводились эксперименты по измерению трехмерных полей ветра с использованием систем, состоящих из нескольких доплеровских радиолокаторов. Измерения, проведенные в данном месте внутри зоны осадков, могут быть объединены с помощью соответствующего геометрического преобразования в целях получения трех компонентов ветра. Подобные оценки также возможны с помощью только двух радиолокаторов при использовании уравнения непрерывности. Кинематический анализ поля ветра описан в работе Browning and Wexler (1968). Однако для получения точной оценки скорости радиолокаторы должны находиться в относительной близости друг к другу (40—80 км), а зона цели должна находиться в пределах двух боковых лепестков перпендикулярно к базовой направленности радиолокатора. В практическом плане невозможно найти радиолокаторы, расположенные столь близко друг к другу.

7.10.6 **Инициализация и модели численного прогнозирования погоды**

В ряде центров численного прогнозирования погоды для ассимиляции данных используются самые разнообразные данные и продукция радиолокаторов. Не во всех моделях используется одна и та же продукция. Осадки являются производным параметром в моделях численного прогнозирования погоды, и поэтому трудно непосредственно ассимилировать поля осадков или отражаемости. Ветры представляют собой непосредственные модельные переменные, и радиальные скорости могут быть ассимилированы с меньшими изощрениями. В число этих параметров входит ИСА профилей ветра, полученных при помощи радиолокаторов, усредненные поля осадков на поверхности суши в глобальных моделях и, в некоторых случаях, трехмерные поля радиолокационной отражаемости и радиальной скорости для локального района или мелкомасштабных моделей в полярных координатах. Lopez (2011) продемонстрировал большое значение ассимилирования данных радиолокатора об осадках над земной поверхностью в продукции, выпускаемой в рамках проекта США «Stage IV», применительно к погоде в Европе и Азии. Эти и другие применения (отслеживание тайфунов) являются главными стимулами для инициативы в области глобального обмена данными метеорологических радиолокаторов.

7.10.7 **Оценка влажности**

Перспективной инновацией является получение параметров влажности на основе различий в прохождении луча эхосигналов от повсеместных наземных целей (Fabry, 2004). Эта инновация является парадоксальной принципу размещения метеорологических радиолокаторов, поскольку их размещают так, чтобы минимизировать помехи от земной поверхности. Флуктуации показателя преломления вызывают изменения длины пути распространения луча, которые могут быть обнаружены в качестве изменений в фазе сигнала или сдвига Доплера. Посредством сопоставления сдвига в сухих условиях в сравнении с влажными условиями и учета неоднозначностей по дальности изменение длины пути может быть оценено и после этого, используя закон Снелла, соотнесено с показателем преломления. Показатель преломления зависит от температуры, давления и влажности, но, в первую очередь, от последнего параметра, и соответственно влажность может быть определена в непосредственной близости от радиолокатора. Несколько исследовательских радиолокаторов обладают этой способностью, и некоторые действующие системы (во Франции и СК) создают прототипы этого для оперативного использования.

7.11 **МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКАЯ ПРОДУКЦИЯ**

Радиолокационные данные могут обрабатываться для получения разнообразной метеорологической продукции с целью поддержки множества применений. Качество этой продукции зависит от типа радиолокатора, стратегии сканирования, его характеристик

Таблица 7.10. Перечень типовой радиолокационной продукции

Индикатор кругового обзора базовых параметров (низкий уровень)	Идентификация и отслеживание ячеек
Максимальная отражаемость в вертикальном направлении	Признак мезоциклона, вихревого торнадо
Высота радиоэха	Мощный нисходящий воздушный поток, микровихрь
Производная продукция по интенсивности грозы	Фронт порывов ветра, конвергенция
Интенсивность осадков над поверхностью	Текущий прогноз
Продукция по аккумуляции осадков на поверхности	Вероятность, размер градин
Продукция по бассейнам	Ограниченный регион слабого эхосигнала
Классификация гидрометеоров — град, дождь, снег и т. д.	Индикатор «скорость-азимут» профилей ветра
Произвольные разрезы различных параметров	Мозаика нескольких радиолокаторов

обработки сигнала и соответствующей системы контроля радиолокатора и анализа/генерирования данных. Эта продукция включает сетки необработанных или производных параметров радиолокатора, вертикальные профили ветра, координаты и характеристики проанализированных грозовых ячеек, их исторические траектории, прогнозы текущей погоды и т. д. Данные о полярных координатах преобразуются в двух- или трехмерные декартовые координаты с использованием методов интерполяции в сетках с разными географическими проекциями. На рисунке 7.24 показано несколько нижеперечисленных видов продукции. Перечень стандартной радиолокационной продукции представлен в таблице 7.10.

Ниже следует перечень выпускаемой продукции:

a) индикатор кругового обзора: отображение значений радиометеорологических величин, полученных за один полный оборот антенны при заданном угле места, в полярной системе координат. Это классический радиолокационный продукт, используемый прежде всего для наблюдений за погодой. Один из наиболее основных видов продукции. Следует отметить, что такую продукцию получают при постоянном угле места, и поэтому увеличение дальности означает, что данные поступают по мере увеличения высоты. В этом формате может быть отображен любой параметр;

b) индикатор кругового обзора постоянной высоты (CAPPI): отображение горизонтального разреза переменной на конкретной высоте, получаемого с помощью интерполяции объемных данных. Он используется для слежения за сильными штормами и их идентификации. Он также полезен для наблюдений за метеорологическими условиями на заданных эшелонах полета при обеспечении воздушного движения. Одним из обоснований для создания CAPPI является то, что благодаря тщательному выбору высоты практически свободная от отражений локальных объектов продукция может быть получена без использования доплеровского режекторного фильтра нулевой скорости;

c) псевдо-индикатор «дальность-высота» (RHI): визуальное отображение переменной, полученное в результате сканирования по объему, когда данные при том же самом азимуте выделяются и сопоставляются для получения информации по высоте в режиме погоды. Классически это делалось посредством физической вертикальной развертки антенны, как правило в диапазоне 0—90° при заданном азимуте. Для выбора азимута и принятия решения о том, когда проводить сканирование, требовалось вмешательство оператора. Преимуществом этого классического метода является то, что плотность информации является гораздо более высокой. Обычно

могут использоваться весьма малые изменения угла места (~0,1°). Качество при использовании метода псевдо-индикатора «дальность-высота» (RHI) зависит от стратегии сканирования, однако он характеризуется значительным преимуществом универсальности. Он используется для идентификации сильных штормов, града и яркой полосы;

d) вертикальный разрез: отображение значений метеорологических величин вдоль заданной потребителем линии сечения (не обязательно проходящей через точку установки радиолокатора). Оно получается в результате интерполяции объемных данных;

e) максимум в вертикальном направлении: отображенные на горизонтальной плоскости максимальные значения метеорологических переменных (обычно отражаемости) над каждой точкой наблюдаемой территории. Он полезен для идентификации максимальной отражаемости во время шторма и оценки его силы или для оценки максимальных осадков, выпадение которых может ожидаться. В некоторых случаях из-за проблем, связанных с размещением радиолокатора, при котором невозможно осуществлять наблюдение на низких уровнях (гористая местность), это использовалось для оценки поверхностных осадков. В некоторых случаях в отношении данных существует пороговое значение минимальной высоты, и поэтому высокие значения отражаемости в яркой полосе не оказывают чрезмерного влияния на использование этой продукции. Одним из вариантов является ограничение высоты данных для проведения быстрого анализа вертикальной структуры шторма;

f) интегральное содержание влаги в вертикальном сечении: показатель интенсивности сильных штормов. Он может быть отображен в горизонтальной плоскости для любого заданного слоя атмосферы. Поскольку этот показатель подвергается сильному влиянию самых высоких значений отражаемости, он является весьма аналогичным продуктом максимальной отражаемости по своей структуре, но выражен иными единицами;

g) высоты радиоэхо: отображение в горизонтальной плоскости значения самого высокого, поддающегося определению контура отражаемости, полученного в результате поиска в базе объемных данных. Этот индикатор является показателем мощности восходящих потоков и указывает на опасные явления погоды и град;

h) во многих случаях продукция отражаемости преобразуется в продукцию по осадкам посредством эмпирического соотношения между Z и R. Эта продукция по осадкам агрегируется в продукцию по аккумуляции разных временных интервалов;

i) современные компьютерные системы обладают значительными возможностями для обработки данных. Разработаны методы или алгоритмы для поиска трехмерных данных, с тем чтобы вычислять и количественно определять характеристики смежных районов высокой отражаемости, которые для аналитика связаны с опасными явлениями погоды в виде гроз (рисунок 7.24).

В дополнение к этим стандартным или базовым отображениям может быть произведена другая продукция, призванная удовлетворять особые требования различных пользователей (гидрология, прогнозирование текущей погоды или авиация):

a) аккумуляция осадков: оценка осадков, аккумулированных за период времени в каждой точке наблюдаемой территории;

b) суммы осадков над водосбором: количество аккумулированных осадков, проинтегрированное по территории;

c) индикатор «скорость-азимут»: оценка вертикального профиля ветра над радиолокатором. Профиль рассчитывается по данным, полученным за один полный оборот антенны при фиксированном угле места;

d) объемная обработка данных о скорости, при которой используется трехмерный массив объемных данных;

e) отслеживание шторма: продукция, полученная с помощью сложного программного обеспечения, для определения траекторий ячеек шторма и прогноза будущих местоположений штормовых центроидов;

f) сдвиг ветра: оценка радиального и тангенциального сдвига ветра на высоте, заданной пользователем;

g) профиль дивергенции: оценка дивергенции по данным о радиальной скорости с учетом некоторых допущений;

h) мезоциклон: продукт сложного программного обеспечения для распознавания ситуаций, с помощью которого определяются признаки вращения в рамках трехмерных данных о базовой скорости, находящиеся в масштабе исходной мезоциклонической циркуляции, которая часто связана с торнадо;

i) признак торнадообразующего вихря: продукт сложного программного обеспечения для распознавания ситуаций, с помощью которого идентифицируются признаки сдвига «от лотка до ворот» в рамках трехмерных данных о базовой скорости в масштабе циркуляций торнадообразующего вихря;

j) тип частиц: эхосигнал классифицируется по типу осадков и выводится из данных двойной поляризации.

Помимо этого, итогом обработки данных радиолокационной сети является получение мозаичного радиолокационного изображения. Вышеупомянутая продукция применяется на сетевой основе; фактически это является стандартной практикой. Соображения, касающиеся радиолокационной продукции, включают следующее: i) проекции используются для визуализации данных; ii) для районов с частичным дублированием охвата радиолокаторами используются разнообразные алгоритмы, основанные либо на данных ближайшего радиолокатора, максимальном значении, либо на сложной оценке качества данных. Если частичное дублирование является существенным, соседний радиолокатор может заполнить пустое пространство в «конусе молчания». При разработке сетевой радиолокационной продукции необходимо также учитывать внутрисетевую и межсетевую гомогенезацию данных. Это включает временную и пространственную гармонизацию, взаимную калибровку радиолокационных данных и проверку чувствительности радиолокатора, результатом которой может стать нарушение непрерывности в предоставлении сетевой продукции.

ПРИЛОЖЕНИЕ 7.A. МЕТЕОРОЛИЧЕСКИЙ РАДИОЛОКАТОР – ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТЬ И ЭКСПЛУАТАЦИЯ СИСТЕМЫ

(В этом приложении представлен текст общего стандарта ИСО/ВМО. Он также опубликован с идентичным содержанием в соответствии с ISO 19926-1:2018(E)).

ВВЕДЕНИЕ

Быстрое развитие метеорологических радиолокаторов произошло незадолго до и во время Второй мировой войны. Первоначально радиолокатор демонстрировался на длинных (от 10 до 50 м) волнах, но быстро перешел на более короткие длины волн (3 см и 10 см) с требованием и разработкой компактных и мощных передатчиков. Длины волн С-диапазона (5 см) стали доступны в конце 1950-х годов. Первые оперативные доплеровские радиолокаторы появились в середине 1980-х годов, когда была продемонстрирована возможность применения технологии в производственной деятельности и появились высокоскоростные, доступные процессоры и эффективные исходные коды программного обеспечения. В середине и конце 1990-х годов в оперативных радиолокаторах стали использоваться возможности двойной поляризации.

Радиолокаторы обеспечивают локализованное, высокодетализированное, своевременное и трехмерное зондирование и наблюдение, которое не может обеспечить ни одна другая система метеорологического мониторинга. Они способны измерять изменения в количестве осадков с разрешением в несколько квадратных километров или лучше и с временными циклами порядка нескольких минут. Они обеспечивают возможность мониторинга быстро меняющихся погодных явлений, что крайне важно для обеспечения заблаговременными предупреждениями о суровых и опасных погодных условиях. К ним относятся проливной дождь, град, сильный ветер (например, торнадо и тропические циклоны) и сдвиг ветра; условия, оказывающие наибольшее воздействие на общество из всех метеорологических элементов. Доплеровские и двухполяризационные радиолокаторы способны разрешить высокую изменчивость типов ветра и осадков и даже увидеть насекомых или турбулентность прозрачного воздуха, что используется для прогнозирования начала гроз и для измерения вертикальных профилей ветра. Двойная поляризация также используется для обеспечения качества и улучшения оценок осадков.

Благодаря высокоскоростным телекоммуникациям и обработке данных, радиолокационные системы сегодня объединены в сеть для более эффективного мониторинга крупномасштабных погодных явлений, таких как тропические циклоны и крупные внетропические штормы (как летом, так и зимой). Данные, полученные в результате объединения радиолокаторов в сеть, могут обеспечить более длительное время (от 60–90 минут до нескольких часов) для выпуска заблаговременных предупреждений. Системы численного прогнозирования погоды также продвинулись вперед, и усвоение данных об осадках, полученных с помощью радиолокаторов на континентальном уровне, глобальными моделями может значительно улучшить прогнозы осадков на 4–5 дней для прилегающих районов и континентов.

Обеспечение однородных, высококачественных данных начинается с установки и использования соответствующей радиолокационной технологии для погодной среды и условий на местах. Длина волны радиолокатора, ширина луча антенны, тип и мощность передатчика, чувствительность приемника и форма волны оказывают значительное влияние на разрешение и качество радиолокационных данных. Метеорологичесие радиолокаторы традиционно определяются и конфигурируются в соответствии с местными требованиями к мониторингу и наблюдению погоды, а также с учетом местных географических и других факторов, что приводит к глобальному разнообразию технологий и стратегий отбора проб. Все это влияет на различные показатели качества данных, такие как доступность, своевременность и точность. Эти показатели также зависят от эксплуатации и обслуживания радиолокационных систем путем соблюдения предписанных и стандартизированных процедур и практик. Это требует разработки

стандартов, технических спецификаций, передовой практики и руководящих принципов для проектирования сети, выбора площадки, калибровки, обслуживания систем и оборудования, отбора проб и обработки данных, а также их распространения.

Цель этого документа широка и адресована организациям во всех странах, использующих метеорологические радиолокаторы, с особым упором на страны, которые не имеют давних традиций эксплуатации и использования метеорологических радиолокаторов. Она предусматривает следующее:

– поддержка производителей в целях поддержания сопоставимого и высокого уровня конкурентоспособности метеорологических радиолокационных систем;

– помощь тендерным органам в учете современного уровня производительности систем, а также просто определений компонентов в их документации и, таким образом, помощь в сравнении различных поступающих тендерных предложений;

– предоставление достоверной документации о возможностях и ограничениях метеорологических радиолокационных систем, что способствует наращиванию потенциала во всем мире;

– консультации по общим требованиям к размещению, эксплуатации, техническому обслуживанию и задачам калибровки для поддержания радиолокационных систем на высоком уровне качества и доступности данных;

– описание необходимого круга задач по эксплуатации и обслуживанию метеорологических радиолокационных систем, чтобы руководители могли выделить для этой цели достаточные финансовые ресурсы и кадровый потенциал.

Дополнительную информацию, например, об основах метеорологических радиолокационных измерений, можно найти в [1].

1. СФЕРА ПРИМЕНЕНИЯ

Этот документ определяет системные характеристики наземных метеорологических радиолокационных систем, измеряющих атмосферу с использованием частот от 2 до 10 ГГц. Эти системы подходят для обнаружения осадков и других целевых метеорологических параметров на разных высотах по заданному району. В документе также описаны способы проверки различных аспектов производительности систем, включая инфраструктуру.

Этот документ ограничивается линейными поляризационными параболическими радиолокационными системами и радиолокаторами с двойной и одиночной поляризацией. Он не применяется к радиолокаторам с веерным лучом (узким по азимуту (AZ) и широким по высоте (EL)), включая морские и авиационные радиолокаторы наблюдения, которые используются, но не предназначены в первую очередь для метеорологических применений. Радиолокаторы с фазированными решетками с электронным формированием и наведением лучей, в том числе многолучевые, с некруговыми внествольными диаграммами направленности, являются новыми, а информации об их характеристиках недостаточно.

Этот документ не описывает технологию метеорологических радиолокаторов и их применений. Метеорологические радиолокационные системы могут использоваться для таких задач, как количественная оценка осадков (КОО), классификация гидрометеоров (например, града), оценка скорости ветра, обнаружение и наблюдение за суровыми метеорологическими явлениями (например, микропрорыв, торнадо). Некоторые из этих применений предъявляют особые требования к позиционированию радиолокационной системы или требуют специальных стратегий измерения. Однако процедуры калибровки и технического обслуживания, описанные в данном документе, применимы и здесь.

Этот документ адресован производителям и операторам радиолокаторов.

2. НОРМАТИВНЫЕ ССЫЛКИ

В этом документе нет нормативных ссылок.

3. ТЕРМИНЫ И ОПРЕДЕЛЕНИЯ

Термины и определения в данном документе не приводятся.

ИСО и МЭК ведут терминологические базы данных для использования в стандартизации по следующим адресам:

– Платформа ИСО для онлайн-просмотра: доступна на сайте https://www.iso.org/obp

– Электропедия МЭК: доступна на сайте http://www.electropedia.org/

4. СОКРАЩЕНИЯ:

АЦП	аналогово-цифровой преобразователь (на англ. яз. **A**nalog-to-**D**igital **C**onverter (ADC))
AZ	азимут (на англ. яз. **AZ**imuth)
BITE	встроенное испытательное оборудование (на англ. яз. **B**uilt-**I**n **T**est **E**quipment)
BPF	полосовой фильтр диапазонов (на англ. яз. **B**and-**P**ass **F**ilter)
CW	непрерывный режим (на англ яз. **C**ontinuous **W**ave)
EL	угол возвышения (на англ. яз. **EL**evation)
H/V	горизонтальный/вертикальный (**H**orizontal/**V**ertical)
HPBW	ширина луча половинной мощности (на англ. яз. **H**alf **P**ower **B**eam **W**idth)
ITU-R	Сектор радиосвязи Международного союза электросвязи
LDR	коэффициент линейной деполяризации (на англ. яз. **L**inear **D**epolarization **R**atio)
МШУ	малошумящий усилитель (на англ. яз. **L**ow **N**oise **A**mplifier (LNA))
MTBF	среднее время наработки на отказ (на англ. яз. Mean **T**ime **B**etween **F**ailures)
NF	число отказов (на англ. яз. **N**umber of **F**ailures)
НМГС	национальная метеорологическая и гидрологическая служба
PRT	период повторения импульсов (на англ. яз. **P**ulse **R**epetition **T**ime)
КОО	количественная оценка осадков (на англ. яз. **Q**uantitative **P**recipitation **E**stimation (QPE))
РЧ	радиочастота
SG	генератор сигналов (на англ. яз. **S**ignal **G**enerator)
ОСШ	отношение сигнал-шум (на англ. яз. **S**ignal-to-**N**oise-**R**atio (SNR))
STALO	стабильный локальный генератор (на англ. яз. **STA**ble **L**ocal **O**scillator)
STAR	синхронная передача и прием (на англ. яз. **S**imultaneous **T**ransmit **A**nd **R**eceive)
TR	передача-прием (на англ. яз. **T**ransmit/**R**eceive)
ЛБВ	лампа бегущей волны (на англ. яз. **T**ravelling **W**ave **T**ube (TWT))
ИБП	источник бесперебойного питания (электороэнергии) (на англ. яз. **U**ninterrupted **P**ower **S**upply (UPS)

5. ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ

5.1 Частотные диапазоны

Метеорологический радиолокатор – это система, предназначенная для измерения гидрометеоров на большой площади с использованием технологии дистанционного зондирования на основе микроволн. Микроволны S-, C- и X-диапазонов используются во многих случаях, и масштаб и характеристики наблюдения системы отличаются в зависимости от характеристик каждой частоты (длины волны). Системы S-диапазона имеют большие размеры и широкий диапазон наблюдения, а системы X-диапазона компактны и имеют узкий диапазон наблюдения. Полезный диапазон радиолокаторов S- и C-диапазонов обычно ограничен кривизной Земли (≥ 300 км), в то время как в X-диапазоне предел обычно зависит от затухания (от 50 км до 100 км). См. [1] для более подробной информации. В таблице 7.A.1 показаны типичные элементы для каждого частотного диапазона.

Необходимо выбрать частотный диапазон в соответствии с диапазоном наблюдения и масштабом системы в данном месте.

Таблица 7.A.1. Типичная спецификация для различных частотных диапазонов метеорологических радиолокаторов

Полоса частот	*Частотный диапазон*[a]	*Диаметр антенны*[b,c]	*Затухание дождя (двустороннее) при 30 мм/час*[d]
S	2 700 ГГц–3 000 ГГц	8,5 м	0,02 дБ/км
C	5 250 ГГц–5 900 ГГц	4,2 м	0,13 дБ/км
X	9 300 ГГц–9 800 ГГц	2,4 м	1,22 дБ/км

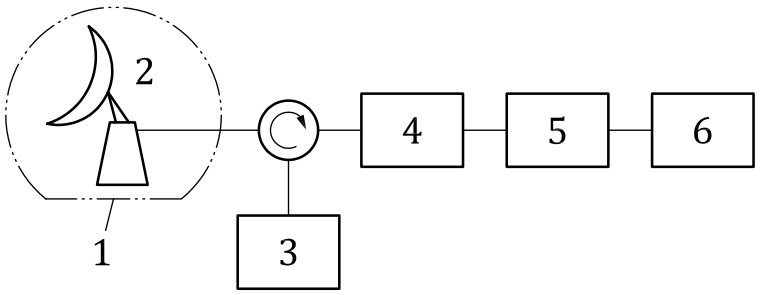
[a] Диапазон рабочих частот отличается в каждой стране.
[b] Более подробную информацию о частотном диапазоне и размере антенны см. в [1], глава 7.6.8
[c] Типичные значения для 1° HPBW.
[d] Затухание из-за дождя см. в [1], глава 7.2.3.

5.2 Системная конфигурация

5.2.1 *Обзор компонентных частей радиолокационной системы*

На рисунке 7.A.1 показана базовая конфигурация радиолокационной системы. В последнее время все чаще встречаются приемники (а в некоторых случаях и передатчики), установленные на антенне.

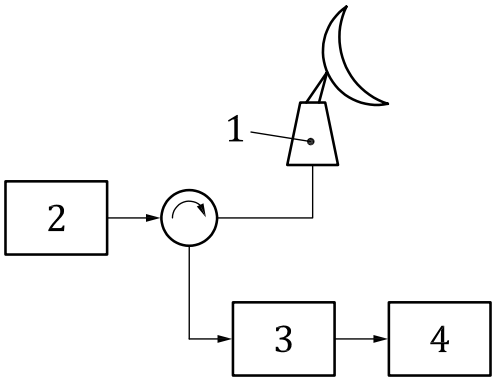
Системы метеорологических радиолокаторов делятся на однополяризационные, которые в большинстве случаев имеют горизонтальную поляризацию (см. рисунок 7.A.2), и двухполяризационные, в которых используются как горизонтальная, так и вертикальная поляризации излучаемых и принимаемых микроволн. Тип двойной поляризации далее подразделяется на тип распределительного излучателя двойной поляризации (см. рисунки 7.A.3 и 7.A.4), который распределяет один выход излучателя, и тип независимого излучателя двойной поляризации, который имеет две независимые системы излучателей (см. рисунок 7.A.5).



Условные обозначения:

1	Обтекатель антенны радиолокатора	4	Принимающее устройство
2	Антенна	5	Процессор обработки сигналов
3	Тип передатчика	6	Процессор обработки данных

Рисунок 7.A.1 Конфигурация и схема радиолокационной системы



Условные обозначения:

1	Антенна	3	Ограничитель TR
2	Тип передатчика	4	Приемное устройство

Рисунок 7.A.2 Системная схема одного поляризационного типа

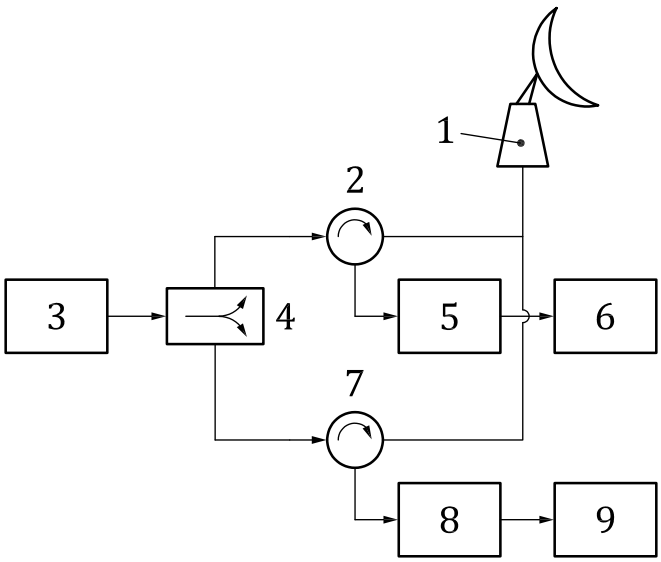
5.2.2 *Режимы передачи с двойной поляризацией*

5.2.2.1 Общая информация

В зависимости от системы излучателя (см. типы излучателя с двойной поляризацией или независимого излучателя, показанные выше) доступны различные режимы передачи.

5.2.2.2 Одновременная передача и прием или гибридный режим

В режиме одновременной передачи и приема (STAR) одновременно передается линейная горизонтальная и вертикальная поляризованная волна, и каждая волна принимается соответствующей цепью приемников. Преимущества этого метода заключаются в том, что его можно использовать с одним передатчиком (распределенный тип передатчика), не требуется дорогостоящий второй передатчик и достаточно простого разветвителя мощности на тракте передачи. Недостатком является то, что в случае деполяризующей среды (например, плавящегося слоя, влажного или тающего града) возникает



Условные обозначения:

1 Антенна
2 Канал горизонтальной поляризации (H)
3 Тип передатчика
4 Делитель мощности 3 дБ
5 Ограничитель TR
6 Приемник (канал H)
7 Канал вертикальной поляризации (V)
8 Ограничитель TR
9 Приемник (канал V)

Рисунок 7.A.3 Системная схема типового распределительного передатчика с двойной поляризацией

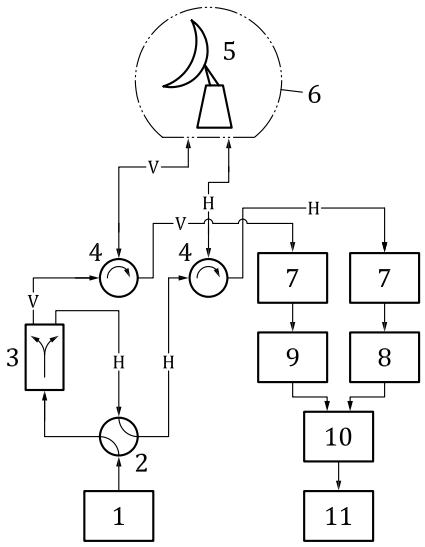
перекрестное взаимодействие между горизонтальными и вертикальными волнами и будет происходить ухудшение качества радиолокационной продукции (например, Z_{dr} с дифференциальной отражательной способностью).

5.2.2.3 Альтернативный режим H/V

В альтернативном режиме H/V горизонтально и вертикально поляризованные волны передаются попеременно от импульса к импульсу. Два приемника будут принимать ко-полярный и кросс-полярный сигнал для каждого импульса. Преимущество альтернативного режима H/V заключается в том, что можно измерять как ко-полярные, так и кросс-полярные компоненты матрицы рассеяния. Если радиолокатор относится к типу распределенного передатчика, вместо разветвителя питания потребуется переключатель поляризации. Быстрые мощные переключатели в настоящее время являются дорогостоящими и нестабильными. По этой причине альтернативный режим H/V обычно используется только для исследовательских радиолокаторов, которые не работают непрерывно. В случаях, когда в радиолокаторе используются два независимых передатчика, альтернативный режим H/V можно имитировать, передавая поочередно каждый второй импульс на каждый передатчик.

5.2.2.4 Режим линейного коэффициента деполяризации

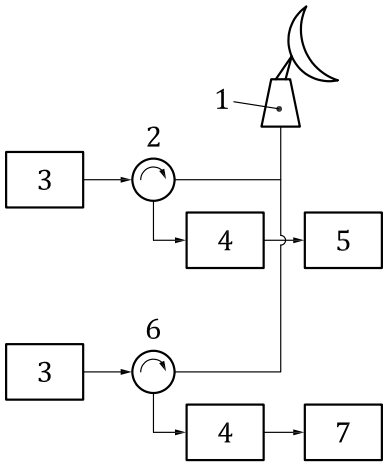
Режим LDR – это специальный режим, позволяющий радиолокаторам встроить конфигурацию типа распределительного передатчика (см. рисунок 7.A.4) для измерения LDR. LDR – это соотношение между кросс-полярной и ко-полярной отражательной способностью. LDR является хорошим индикатором расплавленного поверхностного слоя или подмоченного либо тающего града и помех на земной поверхности. Для включения режима LDR необходим обход разветвителя мощности. Это переключение будет передавать мощность передачи только на горизонтальную подачу. При получении



Условные обозначения:

1 Передающее устройство
2 Переключатель режима поляризации
3 Делитель мощности 3 дБ
4 Циркулятор
5 Антенна
6 Обтекатель антенны радиолокатора
7 Ограничитель TR
8 Канал приемника с горизонтальной поляризацией
9 Канал приемника с вертикальной поляризацией
10 Процессор обработки сигналов
11 Процессор обработки данных

Рисунок 7.A.4 Системная схема распределительного излучателя с двойной поляризацией плюс дополнительный режим линейного коэффициента деполяризации



Условные обозначения:

1 Антенна
2 Канал горизонтальной поляризации (H)
3 Тип передатчика
4 Ограничитель TR
5 Приемник (канал H)
6 Канал вертикальной поляризации (V)
7 Приемник (канал V)

Рисунок 7.A.5. Схема системы независимого передатчика с двойной поляризацией

приемник с горизонтальной поляризацией измеряет ко-полярный сигнал, а приемник с вертикальной поляризацией измеряет кросс-полярный сигнал. Как правило, используется медленный переключатель (время переключения примерно от 1 с до 3 с), и переключение между режимами STAR и LDR будет выполняться только после одного сканирования радиолокационного индикатора кругового обзора (ИКО). За исключением LDR, никакой другой продукт двойной поляризации не может быть измерен.

5.2.3 ***Описание компонентов***

5.2.3.1 **Антенна**

Направленная антенна используется для концентрации энергии в узкий луч. Обычно используется тип параболического отражателя. Размер антенны для получения одинаковой ширины луча отличается в зависимости от используемой частоты. Если длина волны меньше, то такая же ширина луча реализуется параболической антенной с меньшим диаметром. Как правило, одна антенна имеет двойное назначение – передачу и прием. Кроме того, антенна разделена на однополяризационный тип (один подающий рупор) и двухполяризационный тип (подающий рупор, способный разделять две ортогональные поляризации).

Фазированная антенная решетка – это новая технология для метеорологических радиолокаторов, где антенна представляет собой панель из нескольких твердотельных излучателей. См. Добавление F для более подробной информации.

5.2.3.2 **Обтекатель антенны радиолокатора**

Обтекатель используется для покрытия антенны и защиты ее от дождя, ветра, льда и снега. Обтекатель выполнен в виде сферического или купольного типа путем объединения нескольких панелей. Обтекатель бывает различных типов в зависимости от размера и цели наблюдения антенны.

Обтекатель для двойной поляризации разработан таким образом, чтобы демонстрировать как можно более равномерное поведение как горизонтальных, так и вертикальных поляризованных волн, пересекающих обтекатель. Это может быть достигнуто за счет правильного проектирования форм панелей, например, за счет использования геодезической или квазислучайной геометрии этих панелей.

Обтекатель приведет к некоторым потерям. См. подраздел A.3.9.2 для оценки потерь сухого обтекателя. Следует отметить, что вода, снег или лед на обтекателе могут привести к сильным потерям (несколько дБ).

5.2.3.3 **Передающее устройство**

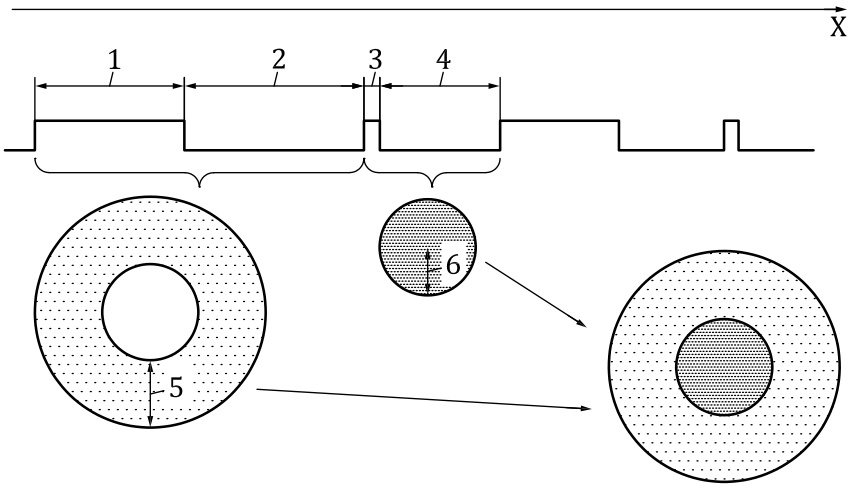
5.2.3.3.1 ***Общие аспекты***

Передатчик – это устройство для генерации передающих радиоволн. Он генерирует стабильный мощный микроволновый импульс и излучает радиоволны в воздух через антенну. Существует два типа передающих устройств: электронные трубки (магнетрон, клистрон, лампа бегущей волны (ЛБВ) и т. д.) и полупроводниковые (твердотельные). Для ЛБВ и твердотельных передатчиков применяется технология сжатия импульсов для получения точного разрешения и увеличения отношения сигнал/шум (ОСШ).

В радиолокаторах с компрессией импульсов длинный и короткий импульсы обычно передаются попеременно, поскольку при передаче длинного импульса генерируется слепой диапазон, и его необходимо охватить. Пример передачи длинного и короткого импульса показан на рисунке 7.A.6.

5.2.3.3.2 ***Рабочий цикл передатчика***

В импульсной радиолокационной системе мощность передатчика на радиочастотах (РЧ) включается лишь на небольшую часть времени. Остальное время тратится на получение



Условные обозначения:

1 Передача длинных импульсов
2 Прием длинных импульсов
3 Передача коротких импульсов
4 Прием коротких импульсов
5 Диапазон наблюдения по длинному импульсу
6 Диапазон наблюдения по короткому импульсу
X срок

Рисунок 7.A.6 Пример передачи по длинному/короткому импульсу

эха от атмосферы. Часть времени, в течение которого мощность передачи включена, называется «рабочим циклом» передатчика. Рабочий цикл вместе с пиковой мощностью определяют среднюю мощность или энергию, излучаемую в атмосферу.

В передающем устройстве метеорологического радиолокатора, использующем трубчатый передатчик (магнетрон или клистрон), рабочий цикл обычно составляет порядка 1 %. Это приводит к типичной средней мощности в несколько сотен Вт. В передатчиках типа ЛБВ пиковая мощность обычно ниже, и используются более длинные импульсы, аналогичные твердотельным передатчикам. Пиковая мощность ламповых передатчиков составляет от десятков кВт до МВт, в зависимости от области применения и частоты радиолокатора.

В передатчике метеорологического радиолокатора, использующем твердотельный (полупроводниковый) излучатель, рабочий цикл обычно составляет порядка 10 %, что снова приводит к аналогичной средней мощности в несколько сотен Вт (некоторые ламповые излучатели, например, излучатели ЛБВ, также полагаются на низкую пиковую мощность и высокий рабочий цикл, аналогичный твердотельным излучателям).

5.2.3.3.3 *Диапазон ширины системных импульсов*

В электронно-лучевых приборах обычно используются короткие импульсы с высокой пиковой мощностью. Ширина импульса составляет порядка 1 мкс (варьируется от 0,3 мкс до 5 мкс в магнетронных и клистронных передатчиках).

Ширина импульса твердотельного передатчика обычно составляет порядка 100 мкс (в диапазоне от 20 мкс до 200 мкс), что соответствует дальности действия 15 км. Для достижения такого же разрешения по дальности, как и при использовании коротких импульсов лампового передатчика, используется метод сжатия импульсов. Часто имеется также отдельный короткий импульс, охватывающий близкие расстояния, которые маскируются длинным передающим импульсом (см. рисунок 7.A.6).

5.2.3.3.4 *Частота повторения импульсов*

Частота следования импульсов, f_{PRF}, или интервал времени между запуском импульсов радиолокационной передачи, время следования импульсов (PRT), является параметром, который может быть определен оператором радиолокационной станции. Однако существует несколько ограничений для выбора f_{PRF}. Высокий f_{PRF} уменьшает однозначную максимальную дальность, r_{max}, радиолокатора. Эхосигналы от радиолокатора на расстояниях, превышающих r_{max}, будут отображаться как эхосигналы второго прохода. r_{max} определяется по формуле (7.A.1):

$$r_{\max} = \frac{c}{2 f_{PRF}} \tag{7.A.1}$$

где c – скорость света.

ПРИМЕР: Для максимальной дальности 250 км f_{PRF} не превышает 600 Гц.

С другой стороны, высокий f_{PRF} необходим для широкого однозначного доплеровского диапазона скоростей, v_a (часто называемого «интервалом Найквиста»), как показано в формуле (7.A.2):

$$v_a = f_{PRF} \frac{\lambda}{4} \tag{7.A.2}$$

где λ – длина волны импульса, излучаемого радиолокатором.

Для радиолокатора C-диапазона при f_{PRF} 600 Гц v_a будет порядка 8 м/с, что слишком мало для наблюдения большинства метеорологических явлений.

В современной обработке сигналов существует несколько методов, позволяющих преодолеть эти физические ограничения. Методы двойного f_{PRF} или ступенчатого PRT позволяют расширить интервал Найквиста в два-три раза или даже больше. Различные методы восстановления второго пути позволяют устранить или восстановить эхосигналы второго пути.

f_{PRF} передатчиков ограничивается рабочим циклом, см. раздел 5.2.3.3.2.

Типичные диапазоны f_{PRF} для радиолокаторов X-, C- и S-диапазонов составляют от 300 Гц до 2 000 Гц. Более высокий f_{PRF} необходим для радиолокаторов X-диапазона, чтобы компенсировать влияние длины волны на v_a в формуле (7.A.2). Это приводит к низкому значению r_{max} в формуле (7.A.1), поэтому для радиолокаторов X-диапазона удаление эхосигналов второго порядка часто является обязательным.

5.2.3.4 **Приемник**

Приемник – это устройство для усиления и обнаружения радиоволны, которая возвращается к антенне, и для извлечения информации об амплитуде и фазе из принятого сигнала. Приемник защищен от передаваемой мощности циркулятором и/или ограничителем TR.

Радиолокаторы с импульсной компрессией применяют частотную модуляцию при передаче длинного импульса и, при обработке импульсной компрессии в приемнике, достигают такого же ОСШ и разрешения по дальности в диапазоне, дискретизированном модулированным импульсом, как и радиолокаторы с ламповым передатчиком. ОСШ диапазона, выбранного коротким импульсом, ниже, чем диапазон, выбранный радиолокатором с трубчатым передатчиком.

Комбинация коротких и длинных импульсов увеличивает эффективный динамический диапазон от близкого до дальнего диапазона, аналогично регулированию чувствительности по времени (на англ. яз. **S**ensitivity **T**ime **C**ontrol (STC)).

Примечание: STC используется для ослабления сильных сигналов на близких расстояниях. Не требуется для систем приемников с большим динамическим диапазоном.

5.2.3.5 **Процессор обработки сигналов**

Процессор сигналов обрабатывает оцифрованные данные амплитудной и фазовой информации, полученные от приемника, и вычисляет ряд ключевых переменных, необходимых для наблюдения, таких как интенсивность осадков и радиальная скорость перемещения осадков.

Типичные выходные данные для радиолокатора с двойной поляризацией представлены следующим образом:

– коэффициент отражаемости (Z);

– дифференциальная отражаемость (Z_{dr});

– доплеровская скорость (V);

– ширина спектра (W);

– дифференциальная фаза (Φ_{dp});

– коэффициент корреляции между Z_h и Z_v (ρ_{hv}).

5.2.3.6 **Процессор обработки данных**

Процессор обработки данных генерирует метеорологические виды продукции в соответствии с назначением радиолокационной системы на основе множества ключевых переменных, которые извлекаются процессором обработки сигналов.

6. ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТЬ СИСТЕМЫ И ПАРАМЕТРЫ ИЗМЕРЕНИЯ

6.1 **Общие аспекты**

Производительность системы указывает на производительность метеорологической радиолаокационной системы в целом, а не на производительность каждого блока, входящего в состав радиолокатора.

Критерии эффективности производительности системы определены таким образом, что оценка по этим критериям может быть применена к различным типам метеорологических радиолокаторов, что принесет пользу пользователям, поскольку упрощает написание спецификаций системы. С другой стороны, принятие стандартного набора критериев приведет к справедливой конкуренции между производителями, поскольку это исключит радиолокаторы с недостаточной производительностью системы с мировых рынков. Для этой цели критерии должны быть измеримы общим способом для всех метеорологических радиолокаторов до их отгрузки с завода.

Чувствительность, пространственное разрешение, точность доплеровской скорости и точность измерения двойной поляризации выбраны в качестве главных критериев, наиболее ярко показывающих производительность системы метеорологического радиолокатора; эти параметры называются «основными параметрами».

Кроме того, выбираются параметры, которые не входят в фундаментальные параметры, но которые также очень важны для определения производительности системы; эти параметры называются «другими ключевыми параметрами». Сводные данные приведены в таблицах 7.A.2 и 7.A.3. Пояснения к основным параметрам приведены в разделе 6.2, а в разделе 6.3 объясняются другие ключевые параметры. Методы измерения этих величин приведены в добавлении A. Пример их регистрации приведен в добавлении C.

Таблица 7.A.2. Основные параметры

Категория параметра	*Цель*	*Показатель*
Чувствительность	Определяет, насколько далекое или насколько слабое эхо от радиолокатора, которое радиолокатор может обнаружить	Чувствительность отражения A dBz на расстоянии B км Чем меньше A на расстоянии B, тем слабее эхосигналы, которые может наблюдать радиолокатор, или наоборот, тем дальше радиолокатор может наблюдать то же самое эхо
Пространственное разрешение	Определяет степень детализации, с которой радиолокатор может различать	Разрешающая способность луча (в градусах), разрешающая способность по дальности (в м) Чем меньше значение, тем выше детализация, которую может наблюдать радиолокатор
Точность доплеровской скорости	Определяет способность устранения помех от земной поверхности с помощью метода доплеровской фильтрации	Стабильность фазы (в градусах) Чем меньше значение, тем больше способность удалять эхосигналы от земной поверхности
Точность измерения двойной поляризации	Определяет возможность точного наблюдения типов эхосигналов погоды с помощью поляриметрических параметров	Изоляция с перекрестной поляризацией (в дБ) Представлено в виде отрицательного значения; чем меньше значение, тем лучше система способна отделить горизонтальный сигнал от вертикального

Таблица 7.A.3. Другие ключевые параметры

Категория параметра	*Цель*	*Показатель*
Боковой лепесток антенны	Определяет достоверность значений радиолокатора из-за сильных внеосевых эхосигналов	Разность усиления (в дБ) относительно максимального усиления в центре главного лепестка Представлено в виде отрицательного числа; чем ниже значение, тем меньше помех наблюдается радиолокатором
Долевая часть с о стороны диапазона	Актуально для радиолокаторов с импульсной компрессией, определяет достоверность значений радиолокатора из-за сильных, выходящих за пределы объема разрешения, но радиально выровненных эхосигналов	Усиление (в дБ) относительно пиковой мощности импульса Представлено в виде отрицательного числа; чем ниже значение, тем меньше помех наблюдается радиолокатором
Максимальная скорость вращения	Определяет, с какой скоростью может вращаться антенна радиолокатора	Максимальная скорость вращения (в об/мин или градусах/с) Чем больше значение, тем быстрее радиолокатор может сканировать
Ускорение	Определяет, как быстро антенна может изменить свою скорость	Ускорение (в градусах/с^2)
Точность ориентации антенны	Определяет точность углового положения данных	Точность ориентации антенны (в градусах) Чем меньше значение, тем надежнее и точнее
Соосность направления луча	Определяет, насколько хорошо выровнены горизонтальные и вертикальные лучи	Выравнивание (в градусах) Чем меньше значение, тем лучше выравнивание
Согласование ширины луча	Определяет, насколько хорошо выровнены горизонтальные и вертикальные лучи	Соответствие (в градусах) Чем меньше значение, тем лучше выравнивание
Динамический диапазон	Определяет широту значений, которые может измерить радиолокатор	Динамический диапазон (в дБ) Чем больше значение, тем шире диапазон сигналов, которые может обнаружить радиолокатор
Нежелательные излучения	Определяет чистоту передаваемого спектра радиолокатора	A дБ на частоте B МГц Чем меньше значение, тем точнее и чище передаваемый спектр

6.2 Основные параметры

6.2.1 *Чувствительность*

6.2.1.1 Определение

Чувствительность определяется, насколько далеким или насколько слабым является радиолокационное эхо, которое может обнаружить радиолокатор. Установив A dBz как отражательную способность осадков и B км как максимальное расстояние для наблюдения A, чувствительность A dBz на B км рассчитывается по формуле (7.A.3):

$$A = 10\log(C_0 C_{1F}) + 20\log(B) \tag{7.A.3}$$

где:

C_0 является параметром, определяемым независимо от производительности системы;

C_{1F} является параметром, специфичным для каждой метеорологической радиолокационной системы, включая потери в системе.

Примечание: Радиолокатор со сжатием импульсов имеет две константы C_{1F}, одна для короткого импульса, а другая для длинного.

Рассчитывается настройка B, C_0, C_{1F} и A. Чем меньше A на расстоянии B, тем меньшие эхосигналы может наблюдать радиолокатор. Параметры, определяющие C_0 и C_{1F} в таблице 7.A.4 (например, λ, *ОСШ*, S_{min}, P_t), описаны в следующих подразделах.

Таблица 7.A. 4. Типичное значение C_0 (температура 20 °C)

Средства	*S-диапазон*	*C-диапазон*	*X-диапазон*
λ (м)	0,1	0,057	0,032
$\left\|\frac{\varepsilon-1}{\varepsilon+2}\right\|^2$	0,928	0,928	0,927
C_0	0,246 7	0,080 1	0,025 3

6.2.1.2 Вывод из формулы радиолокатора

Чувствительность, связанная с целью осадков, – это измерение того, насколько наблюдаема цель осадков.

Если полученная мощность, рассеянная от дождевой цели, равна P_r, а коэффициент радиолокационного отражения дождевой цели равен Z, то P_r выражается формулой (7.A.4):

$$P_r = \frac{C \cdot Z}{r^2} \tag{7.A.4}$$

с формулой (7.A.5) (см., например, [2]):

$$C = \frac{P_t G_t G_r h \theta_H \theta_V \pi^3}{2^{10}\left(\log_e 2\right)\lambda^2}\left|\frac{\varepsilon-1}{\varepsilon+2}\right|^2 \tag{7.A.5}$$

и формулой (7.A.6):

$$Z = \int N_D D^6 \mathrm{d}D \tag{7.A.6}$$

где:

P_t мощность передачи, в Вт;

G_t, G_r коэффициент усиления антенны (передача, прием);

h пространственная длина импульса, определяемая как $c \cdot \tau$, в м;

θ_H ширина луча антенны в горизонтальной плоскости, в рад;

θ_V ширина луча антенны в вертикальной плоскости, в рад;

λ длина волны, в м;

ε комплексная проницаемость частицы осадка;

D диаметр капли дождя, в м;

N_D количество капель дождя в единице объема, в 1/м^3;

r дальность рассеивания, в м;

C постоянная радиолокатора, в Вт/м [2].

Примечание: Для практического применения учитываются потери в системе (см. 6.2.1.4).

Когда P_r находится на минимальном уровне мощности, который может быть обнаружен, он может быть выражен как S_{min} (см. раздел A.3.6). Подставив это значение S_{min} в формулу (7.A.4), можно получить минимальный коэффициент отражения радилокатора, Z_{min}, на любом произвольном расстоянии *r*, как показано в формуле (7.A.7):

$$Z_{min}(r) = \frac{S_{min}}{C} r^2 \tag{7.A.7}$$

где $Z_{min}(r)$ – индекс чувствительности метеорологического радиолокатора.

Если элементы из правой части формулы (7.A.7), которые не нужно измерять для каждого радиолокационного устройства, поместить как C_0, а элементы, которые специфичны для радиолокационного устройства и должны быть измерены, поместить как C_1, формула (7.A.7) будет выражена как формула (7.A.8):

$$Z_{min}(r) = C_0 C_1 r^2 \tag{7.A.8}$$

C_0 включает следующие элементы из правой части формулы (7.A.7), как показано в формуле (7.A.9):

$$C_0 = \frac{2^{10}(\log_e 2)\lambda^2}{\pi^3 \left|\frac{\varepsilon - 1}{\varepsilon + 2}\right|^2} \tag{7.A.9}$$

Аналогично, поскольку в формуле (7.A.7) C_1 имеет P_t, G_t, G_r, h, θ_H, θ_V и S_{min}, она выражается формулой (7.A.10):

$$C_1 = \frac{S_{min}}{P_t G_t G_r h \theta_H \theta_V} \tag{7.A.10}$$

Значение C_0 связано с длиной волны и температурой. Типичные значения C_0 для каждой полосы частот *S*, *C* и *X* при температуре 20 °C приведены в таблице 7.A.4. Длина волны S-диапазона составляет 0,1 м, длина волны C-диапазона – 0,057 м, длина волны X-диапазона – 0,032 м.

Поскольку длина волны обычно задается частотой передачи f_0 (МГц), она рассчитывается по формуле (7.A.11), используя скорость света как 3 x 10^8 м/с:

$$\lambda = \frac{300}{f_0} \tag{7.A.11}$$

6.2.1.3 Базовый расчет

Единица (мм^6/м^3) используется для единицы коэффициента отражения радиолокатора Z и обычно выражается в децибелах относительно Z как dBz. С учетом этого получается общий логарифм с обеих сторон формулы (7.A.8), который умножается на 10, как показано в формуле (7.A.12):

$$10\log\left[Z_{\min}\left(r\right)\right] = 10\log\left(C_0\right) + 10\log\left(C_1\right) + 20\log\left(r\right) + 180 \tag{7.A.12}$$

10log(C_1) расширяется из формулы (7.A.10), как показано в формуле (7.A.13):

$$\begin{aligned} 10\log(C_1) = {} & 10\log\left(S_{\min}\right) - 10\log\left(P_{\mathrm{t}}\right) - 10\log\left(G_{\mathrm{t}}\right) - \\ & 10\log\left(G_{\mathrm{r}}\right) - 10\log\left(h\right) - 10\log\left(\theta_{\mathrm{H}}\right) - 10\log\left(\theta_{\mathrm{V}}\right) \end{aligned} \tag{7.A.13}$$

Для измеряемых объектов используются следующие единицы измерения:

- Минимальный обнаруживаемый сигнал: 10log(S_{min}), в дБм
- Мощность передачи: 10log(P_t), в дБм
- Коэффициент усиления антенны: 10log(G_t), 10log(G_r), в дБ
- Пространственная длина импульса: h, в м

Пространственная длина импульса – это значение ширины импульса σ(в *c*), умноженное на скорость света. Поскольку длительность импульса обычно измеряется в единицах *c*, пространственная длительность импульса получается по формуле (7.A.14):

$$h = 300\tau_{(\mu s)} \tag{7.A.14}$$

- $\theta_{\mathrm{H/V}}$, в рад

Поскольку ширина луча измеряется в градусах, она преобразуется в радианы, как показано в формуле (7.A.15):

$$\theta_{\mathrm{H/V}} = \frac{\pi}{180 \cdot \theta_{\mathrm{H/V(deg)}}} \tag{7.A.15}$$

6.2.1.4 Системные потери и затухание радиоволны

В реальной работе радиоволна ослабляется (потеря мощности) во время передачи. Поэтому необходимо учитывать потери мощности, вызванные компонентом радиолокатора, таким как волновод, и затухание, вызванное распространением радиоволны в пространстве (из-за воздуха и осадков). Эти потери и затухание приводят к ухудшению показателя чувствительности радиолокатора $Z_{\min}$ (увеличение). Если потери мощности, генерируемые компонентом радиолокатора, составляют F, то F включается в C_1, поскольку этот элемент специфичен для радиолокационного устройства и должен быть измерен. См. раздел A.3.9 для измерения потерь в системе.

Это рассчитывается как C_{1F} и получается из формулы (7.A.13), как показано в формуле (7.A.16):

$$\begin{aligned} 10\log(C_{1\mathrm{F}}) = {} & 10\log\left(S_{\min}\right) - 10\log\left(P_{\mathrm{t}}\right) - 10\log\left(G_{\mathrm{t}}\right) - 10\log\left(G_{\mathrm{r}}\right) - \\ & 10\log\left(h\right) - 10\log\left(\theta_{\mathrm{H}}\right) - 10\log\left(\theta_{\mathrm{V}}\right) + 10\log\left(F\right) \end{aligned} \tag{7.A.16}$$

Кроме того, учитывая ослабление атмосферой, водой и паром в виде L, L является функцией дальности распространения, *r*, и интенсивности осадков, R, и выражается формулой (7.A.17):

$$L\left(r, R\right) = 2\int_0^r \left(k_{\mathrm{a}} + k_{\mathrm{r}}R^{\alpha}\right)\mathrm{d}r \tag{7.A.17}$$

где:

k_a удельное затухание из-за воздуха, в дБ/км;

k_r, удельное затухание из-за дождя k_r, в дБ/км;

R интенсивность осадков, в мм/ч;

r дальность, в км.

Если интенсивность осадков вдоль пути распространения R постоянна (R_0), то в формуле (7.A.17) переменным является только расстояние, которое выражается формулой (7.A.18):

$$L(\mathrm{r}) = 2\left(k_{\mathrm{a}} + k_{\mathrm{r}} R_0^{\alpha}\right) r \qquad (7.A.18)$$

для упрощения оценки индекса чувствительности во время дождя.

Поскольку значения k_a, k_r и отличаются в зависимости от используемой частоты, установите для них типичные значения в соответствии с каждым частотным диапазоном, как показано в таблице 7.A.5 для оценки.

Таблица 7.A 5. Удельное ослабление за счет воздуха и дождя (одностороннее, *R* в мм/ч)

Полоса частот	*Удельное затухание из-за воздуха*[a]	*Удельное ослабление из-за дождя*[b]	
	k_a (дБ/км)	k_r (дБ/км)	α
S	0,005 89	0,000 343	0,97
C	0,007 07	0,001 8	1,05
X	0,008 835	0,01	1,21

[a] См. ссылку [3].
[b] См. Справочник [1], таблица 9.5, односторонние удельные ослабления при 18 °C.

Наконец, недостаточно использовать $S_{\min}$ в его нынешнем виде. Обычно следует добавить соответствующее значение ОСШ (в дБ). Это значение определяется пользователями. В случае, если пользователи не могут принять решение, используется 1 дБ.

Исходя из вышесказанного, формула (7.A.12) практически выражается формулой (7.A.19):

$$10\log\left[Z_{\min}(r)\right] = 10\log(C_0) + 10\log(C_{1\mathrm{F}}) + 20\log(r) + L(r) + SNR + 180 \qquad (7.A.19)$$

6.2.1.5 **Коэффициент усиления импульсной компрессии**

В радиолокаторах с импульсной компрессией для расчета индекса чувствительности по формулам (7.A.13) и (7.A.14) используются коэффициент усиления импульсной компрессии, G_c, и ширина импульса, τ_c, после обработки импульсной компрессии, как показано в формулах (7.A.20) и (7.A.21):

$$P_{\mathrm{t}} = P_t' G_{\mathrm{c}} \qquad (7.A.20)$$

$$10\log(P_{\mathrm{t}}) = 10\log(P_{\mathrm{t}}') + 10\log(G_{\mathrm{c}}) \qquad (7.A.21)$$

Где P_{t}' – исходная пиковая мощность передачи, умноженная на коэффициент усиления импульсной компрессии G_c, и G_c теоретически становится 10log(bT) (где b – ширина частотной модуляции, а T – ширина импульса передачи). h из формулы (7.A.14) рассчитывается с помощью τ_c.

Примечание: коэффициент усиления импульсной компрессии применяется только к длинному импульсу.

6.2.2 ***Пространственное разрешение***

6.2.2.1 **Определение**

Пространственное разрешение описывает детали, которые способен различить радиолокатор.

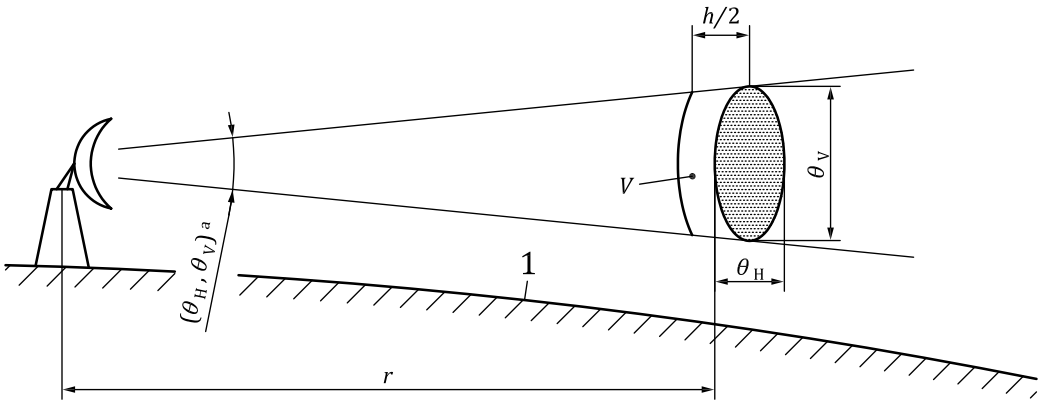
Как показано на рисунке 7.A.7, он представляет собой объем выборки радиолокатора, окруженный *h/2* (где *h* – пространственная длина импульса) и шириной луча. Чем меньше значение объема выборки, тем выше детализация, которую может наблюдать радиолокатор.

Пространственное разрешение разлагается на разрешение по лучу и разрешение по дальности.

Производительность этой системы оценивается в соответствии с таблицей 7.A.6.

Таблица 7.A. 6. Параметры производительности системы

Категория	*Параметр*	*Оценка*
Разрешение по лучу	$\theta_{\text{н}}$: HPBW антенны в горизонтальной плоскости (в рад) θ_{v}: HPBW антенны в вертикальной плоскости (в рад)	Чем меньше, тем лучше
Разрешающая способность по дальности	$\Delta R_{\text{рс}}$: Для импульсно-компрессионного радиолокатора (в м) $\Delta R_{\text{пр}}$: Для радиолокатора без импульсного сжатия (в м)	Чем меньше, тем лучше



Условные обозначения:

1	Состояние грунта	*V*	Целевой объем
H	Длительность импульса	a	Ширина луча
R	Диапазон		

Рисунок 7.A.7 Пространственное разрешение

6.2.2.2 **Разрешение по лучу**

Разрешение луча определяется на основе измерения главного лепестка антенны. Главный лепесток измеряется по полуширине (в точке снижения на 3 дБ, см. рисунок 7.A.8) и показывает, насколько узким является луч вокруг центра излучения. Тонкое разрешение луча достигается, когда полуширина главного лепестка меньше. Следует отметить, что разрешение луча ограничено наихудшим значением между главным лепестком передающего луча и угловым блоком обработки приемника.

6.2.2.3 **Разрешающая способность по дальности**

Разрешение по дальности связано с длительностью передаваемого импульса, но ограничивается узкими местами во всей системе, включая характеристики приемника, такие как полоса пропускания и интервал выборки. Их необходимо учитывать для расчета разрешения по дальности, а не просто использовать пространственную длину передаваемого импульса.

Поскольку в случае цифровой системы приемника принимаемый сигнал представляется как дискретное значение для каждого интервала дискретизации, ширина импульса в точке спада на 3 дБ формы сигнала принимаемой мощности не контролируется непосредственно так же, как измерение ширины импульса передачи.

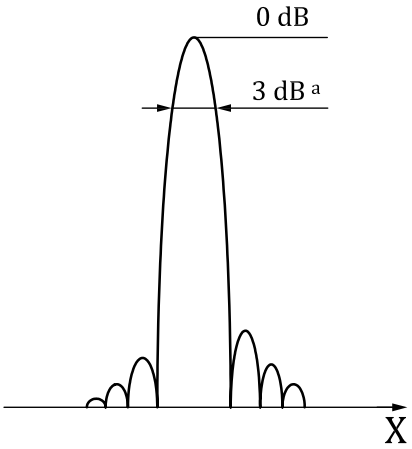
В связи с этим импульсно-компрессионные и неимпульсно-компрессионные радиолокаторы должны рассматриваться по-разному.

Для радиолокаторов без импульсной компрессии разрешение по дальности следует оценивать с помощью комбинации факторов, ограничивающих разрешающую способность, а именно: ширины полумощности передаваемого импульса, интервала времени выборки и полосы пропускания приемника.

Разрешение по дальности оценивается по формуле (7.A.22):

$$\Delta R_{\text{пр}} = \max\left(L_1, L_2, L_3\right) \qquad \text{(7.A.22)}$$

используя значения разрешения L_1, L_2 и L_3, рассчитанные на основе факторов узкого места, соответствующих полуширине импульса передачи, интервалу времени выборки и полосе пропускания приемника, соответственно.



Условные обозначения:
X Горизонтальный/вертикальный угол
[a] Точка падения: ширина луча

Рисунок 7.A.8. Разрешение по лучу

Что касается полуширины импульса передачи, L_1 рассчитывается с помощью измеренной полуширины импульса передачи τ_t, как показано в формуле (7.A.23):

$$L_1 = \frac{c}{2}\tau_t \tag{7.A.23}$$

где τ_t – ширина полумощности импульса передачи.

Интервал времени выборки принятого сигнала является интервалом времени обработки, t_s, на конечном этапе сигнального процессора. Используя временной интервал t_s, L_2 получается в соответствии с формулой (7.A.24):

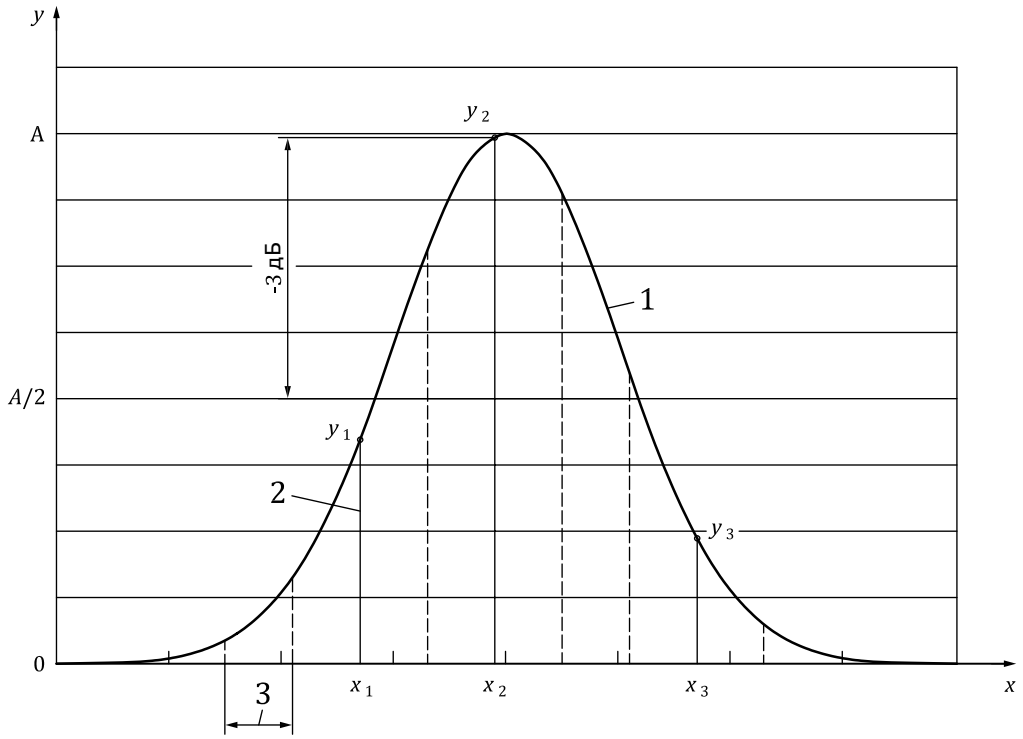
$$L_2 = \frac{c}{2}t_s \tag{7.A.24}$$

Наконец, из полосы пропускания приемника (точка спада на 3 дБ от пика), L_3 рассчитывается по формуле (7.A.25):

$$L_3 = \frac{c}{2}\frac{1}{\Delta f} \tag{7.A.25}$$

где Δf – полоса пропускания полосно-пропускающего фильтра (ППФ) приемника, измеренная на 3 дБ вниз от пика.

В радиолокаторе со сжатием импульсов формирование формы волны с помощью повышенного косинуса проводится на передаваемой волне для предотвращения расширения спектра. С другой стороны, для подавления бокового лепестка диапазона к принимаемой волне применяется функция оконной развертки. При таком формировании формы сигнала гауссовское приближение хорошо подходит к форме сигнала после сжатия импульса. На рисунке 7.A.9 показан пример схемы выборки принимаемых сигналов.



Условные обозначения:
1 Форма полученного импульса после сжатия импульса
2 Импульс дискретизации
3 Интервал выборки

Рисунок 7.A.9 Форма волны выборки принятого сигнала

Поскольку интервал выборки обычно недостаточно мал по сравнению с шириной импульса, ширина импульса оценивается по трем уровням выборки принятых сигналов, соответствующих пику передаваемого импульса и обеим сторонам точки спада импульса на 3 дБ.

Полученная форма импульсной волны $y(x)$ отображается формулой (7.A.26):

$$y(x) = A \cdot e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}} \tag{7.A.26}$$

где:

x время как ось абсцисс;

A максимальная амплитуда;

μ среднее значение;

σ^2 дисперсия.

Ширина импульса оценивается путем вычисления A, μ и σ^2 и с помощью трех измеренных значений (x_1, y_1), (x_2, y_2) и (x_3, y_3), которые выбираются из полученной формы импульса. Чтобы повысить точность оценки ширины импульса, y_2 должно быть почти пиковым значением, а y_1 и y_3 должны быть ниже и ближе к точке спада на 3 дБ от y_2.

Натуральный логарифм с обеих сторон формулы (7.A.26) превращается в формулу (7.A.27):

$$\ln\left[y(x)\right] = \ln(A) - \frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2} \tag{7.A.27}$$

Среднее значение, μ, дисперсия, σ^2, и максимальная амплитуда, A, получаются путем подстановки трех измеренных значений в формулу (7.A.27) и одновременного решения формул (7.A.28)–(7.A.30):

$$\mu = \frac{\ln\left(\frac{y_3}{y_2}\right)\left(x_1^2 - x_2^2\right) - \ln\left(\frac{y_2}{y_1}\right)\left(x_2^2 - x_3^2\right)}{2\ln\left(\frac{y_3}{y_2}\right)(x_1 - x_2) - \ln\left(\frac{y_2}{y_1}\right)(x_2 - x_3)} \tag{7.A.28}$$

$$\sigma^2 = \frac{\left(x_1^2 - x_2^2\right) - 2\mu(x_1 - x_2)}{2\ln\left(\frac{y_2}{y_1}\right)} \tag{7.A.29}$$

$$A = y_1 e^{\left[\frac{(x_1-\mu)^2}{2\sigma^2}\right]} \tag{7.A.30}$$

Если ширина импульса определяется как ширина точки спада на 3 дБ от максимальной амплитуды, A, то ширина импульса, τ_{pc}, определяется по формуле (7.A.31):

$$\tau_{pc} = 2(x_3 - \mu)\sqrt{\frac{3}{10\log(A) - 10\log(y_3)}} \tag{7.A.31}$$

Разрешающая способность импульсно-компрессионного радиолокатора по дальности, ΔR_{pc}, рассчитывается с использованием τ_{pc} по приведенной выше формуле (7.A.32):

$$\Delta R_{pc} = \frac{c}{2}\tau_{pc} \tag{7.A.32}$$

6.2.3 *Фазовая стабильность*

Точность доплеровской скорости радиолокационной системы зависит от фазовой стабильности частоты передачи и стабильности частоты повторения импульсов. Фазовый шум ухудшает возможности доплеровского наблюдения радиолокационной системы и, следовательно, влияет на устранение помех от наземного эха и оценку данных двойной поляризации. Стабильный локальный осциллятор (STALO) обычно считается наиболее доминирующим фактором фазовой неустойчивости [4] в системах с усилителями (клистрон, твердотельный). В идеале осциллятор генерирует одну частоту, но на самом деле нестабильность вызвана случайными колебаниями фазы вокруг несущей. Фазовый шум измеряется в единицах дБн/Гц как спектральная плотность мощности в каждой полосе пропускания 1 Гц, удаленной от несущей и отнесенной к мощности несущей частоты.

Имея $L(f)$ как спектральную плотность (выраженную как антилогарифм) полосы пропускания 1 Гц, вызванную случайными флуктуациями, пусть θ_{pc} будет определена как стабильность фазы в заданном диапазоне (a, b) в единицах градусов, которая рассчитывается по формуле (7.A.33):

$$\theta_{\text{ps}} = \frac{180}{\pi}\sqrt{2\int_{a}^{b} L\left(f\right)\mathrm{d}f} \tag{7.A.33}$$

где $\sqrt{2}$ означает, что фазовая стабильность должна рассчитываться как двухсторонняя полоса.

Как интегральный диапазон, (a, b) должен быть установлен на (100 Гц, 1 МГц) для расчета, учитывая типичные значения f_{PRF} для S-/C-/X-диапазонов. Что касается разности частот Δn, то увеличение фазового шума при умножении частоты генератора на N выражается формулой (7.A.34):

$$\Delta n = 20\log_{10}N = 10\log_{10}N^2 \tag{7.A.34}$$

Поскольку фазовый шум в терминах среднеквадратичного значения (СКО) является квадратным корнем интегрального значения в виде антилогарифма, существует пропорциональная зависимость между частотой колебаний и фазовым шумом в единицах градуса.

Приведенный выше метод предназначен только для оценки фазового шума, возникающего в результате работы STALO. В магнетронных радиолокаторах берется образец каждого передаваемого импульса, и фазовая информация из этого образца используется в приемнике для измерения доплеровского сдвига от последовательных импульсов. Это называется «согласованный прием». В таких системах необходимо учитывать дополнительные источники фазового шума. Метод, определяющий фазовую стабильность всей радиолокационной системы, заключается в использовании оптической линии задержки. Линия задержки создаст задержку, необходимую для доплеровского измерения. Другие варианты, такие как линии задержки поверхностных или объемных акустических волн, страдают от высоких вносимых потерь, снижающих ОСШ. Более того, присущие им задержки слишком малы для измерений на дальние расстояния.

Оптическая линия задержки состоит из РЧ-оптического и оптического РЧ-преобразователя с оптоволоконной катушкой между ними. РЧ-оптический передатчик состоит из лазерного диода незатухающей волны (CW), который обычно амплитудно модулируется микроволновым сигналом. Приемник оптического сигнала в радиочастотный преобразует оптический сигнал, прошедший через оптоволоконную катушку, обратно в радиочастотный сигнал с теми же характеристиками, но с уменьшенной амплитудой. Длина катушки определяет задержку принимаемого импульса передачи.

Используя существующее оборудование для обработки сигналов, сравнение фазы передаваемого сигнала (выборка передачи) с фазой принятого эха покажет присущий системе фазовый шум. Когерентность системы также будет рассчитываться блоком обработки сигнала приемника радиолокатора. Этот метод может быть использован не только для магнетронных радиолокаторов, но и обеспечивает интегральное измерение фазового шума для клистронов или твердотельных систем.

6.2.4 *Точность измерения двойной поляризации*

6.2.4.1 Двойная поляризация

Требования к точности радиолокаторов с двойной поляризацией выше, чем у обычных радиолокаторов, использующих только одну поляризацию. Двухполяризационные продукты основаны на различиях между двумя поляризациями, и смещение между двумя каналами может привести к большим ошибкам в полученных величинах, например, в расчетной интенсивности дождя. Например, предполагается, что коэффициент отражения может быть оценен с точностью около 1 дБ, тогда как для дифференциальной отражательной способности (Z_{dr}), разности коэффициентов отражения на линейной горизонтальной и вертикальной поляризации, требуется точность не менее 0,2 дБ [5].

6.2.4.2 Перекрестная поляризация и изоляция портов

Перекрестная поляризация – это характеристика антенны для отделения горизонтального сигнала от вертикального. Этот параметр обычно определяется производителем антенны на испытательном стенде в реальных условиях эксплуатации.

Изоляция порта описывает способность радиолокационной системы отделять горизонтальные сигналы от вертикальных после приема антенной системой. Этот параметр может быть легко определен для отдельных компонентов радиолокатора, таких как поворотные соединения или волноводный переключатель. Однако оценка интегральной изоляции порта для всех компонентов является технически очень сложной. Поскольку в современных радиолокационных системах изоляция порта на несколько порядков ниже, чем перекрестная поляризация, этот параметр имеет меньшее значение в контексте производительности системы.

6.3 Другие ключевые параметры

6.3.1 *Боковой лепесток*

Что касается боковых лепестков, следует измерить уровень подавления боковых лепестков антенны и боковых лепестков диапазона. Первые из упомянутых определяют достоверность значений радиолокатора из-за сильных внеосевых эхосигналов. Последние имеют отношение к радиолокаторам с импульсным сжатием и определяют достоверность значений радиолокатора из-за сильного, не разрешающего объема, но радиально выровненных эхосигналов.

6.3.2 *Соосность направления луча*

Этот параметр определяется как разница в градусах между пиками горизонтальной и вертикальной ко-поляризованных диаграмм антенны. Это мера для сравнения направления горизонтального и вертикального лучей.

6.3.3 *Согласование ширины луча*

Этот параметр определяется как разница в градусах между пиками горизонтальной и вертикальной ко-поляризованных диаграмм антенны (–3 дБ, –10 дБ). Это мера для сравнения симметрии излучаемого объема горизонтальным и вертикальным лучами.

6.3.4 *Максимальная скорость вращения*

Этот параметр связан с тем, насколько быстро может вращаться антенна. Чем больше значение, тем быстрее радиолокатор может сканировать.

6.3.5 *Ускорение*

Определяет, как быстро антенна может изменить свою скорость. Поскольку корректное измерение абсолютного ускорения в единицах градус/с^2 затруднено, в данном документе в качестве альтернативы определено время, необходимое антенне для полной остановки в обоих направлениях AZ/EL при полном движении.

Само по себе значение ускорения не полностью описывает, насколько быстро и точно антенна может изменить положение EL и AZ. Это называется «временем отклика шага», которое в данном документе более не рассматривается. Этот параметр определяет время, необходимое для перехода антенны из одного положения в другое в пределах заданного окна точности, чтобы обеспечить настройку. Важным применением является переход от одного EL к другому во время сканирования тома.

6.3.6 *Точность ориентации антенны*

Точность ориентации антенны затрагивает различные аспекты:

– способность устройства поворота антенны направлять ее с параболическим отражателем с определенной точностью на заданный угол AZ и EL по отношению к механической контрольной точке на позиционном блоке;

– способность системы неоднократно указывать на одну и ту же заданную позицию в течение длительного времени (месяцы, годы);

– точное выравнивание внутреннего (аппаратного) эталона AZ/EL с местной географической ориентацией для привязки измеренных данных к положению на Земле;

– согласование луча в обеих поляризациях (если применимо) с точкой фокусировки антенны.

На точность наведения влияет множество факторов, таких как тип системы позиционирования (шестеренчатая, ременная), механическая установка на площадке (нивелирование), конструкция башни (стальная, бетонная), выравнивание на север, монтаж тарелки и рупора подачи.

Географическое выравнивание антенны и ее стабильность в течение длительного периода времени можно проверить и проконтролировать с помощью программных средств от производителей радиолокаторов, которые используют электромагнитный сигнал солнца в качестве опорной точки положения. Необходимыми условиями для такого рода измерений являются наличие точного географического положения радиолокационной системы и соответствующего момента времени, поскольку оба эти параметра будут использоваться для оценки опорного положения солнца. Подробная информация о рекомендуемой частоте проверок наведения антенны на солнце приведена в добавлении D.

Из-за трудностей с получением абсолютной точности наведения на предприятии производителя радиолокатора возможным способом является измерение точности наведения с точки зрения повторяемости на предприятии производителя с последующей проверкой на солнце на месте. Повторяемость проверяет способность антенны указывать в одном и том же направлении после непрерывного движения.

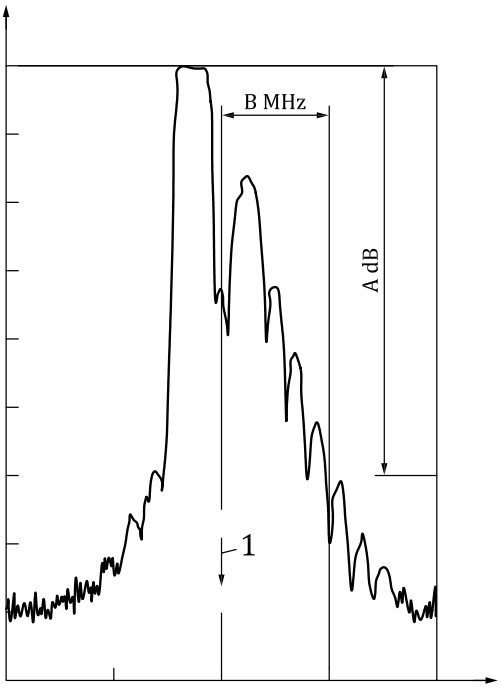
6.3.7 *Динамический диапазон*

Динамический диапазон, LV_d, – это отношение максимального и минимального уровней сигнала, который может измерить приемник радиолокатора. Это разница, в дБ, выходного сигнала приемника между минимальным обнаруживаемым сигналом (S_{min}) и точкой насыщения усилителя приемника. Насыщение также может произойти в цифровой области из-за переполнения. Измерение или расчет S_{min} описаны в разделе A.3.6. Определение максимального сигнала может быть выполнено с помощью точки сжатия приемника. Точка сжатия 1 дБ является очень распространенной при определении характеристик приемников. Это точка, в которой коэффициент усиления приемного устройства уменьшается на 1 дБ из-за сжатия. Когда усилитель работает в линейной области, увеличение входного сигнала на 3 дБ приведет к увеличению выходного сигнала на 3 дБ.

Для измерения рекомендуется использовать внешний и высокостабильный генератор сигналов (SG). Диапазон выходной мощности SG должен перекрывать ожидаемый динамический диапазон приемника. Динамический диапазон должен измеряться по всей цепочке приемника от входа приемника, который обычно находится на переходе от волновода к коаксиальному переходу. Это включает в себя аналоговую и цифровую обработку сигналов. Полная цепочка приемников включает в себя малошумящий интерфейс, понижающие преобразователи, фильтры, аналого–цифровой преобразователь (АЦП) и цифровую обработку сигналов.

6.3.8 *Нежелательные излучения*

Уровень нежелательных излучений характеризует чистоту передаваемого спектра радиолокатора (см. рисунок 7.A.10). Выражение A дБ на частоте B МГц показывает, что A дБ уменьшается от пикового значения спектра в точке B МГц от центральной частоты. Чем больше значение A, тем больше радиолокаторов могут работать в одном диапазоне благодаря узкой полосе частот.



Условные обозначения:
1 Центральная частота

Рисунок 7.A.10 Нежелательные излучения

Пределы нежелательных излучений определены несколькими национальными и международными стандартами, например, CEPT ERC Rec (02)05 (2012), CEPT ERC Rec 74-01E (2011), ITU-R SM.329-12 и ITU-R SM.1541-6.

7. КАЛИБРОВКА, МОНИТОРИНГ И ТЕХНИЧЕСКОЕ ОБСЛУЖИВАНИЕ

7.1 Общие аспекты

Термины «калибровка», «техническое обслуживание» и «мониторинг» связаны друг с другом, и зачастую нелегко провести четкое различие между ними. Во время калибровки (см. раздел 7.2) характеристики радиолокационной системы характеризуются для того, чтобы обеспечить радиолокационные данные с высокой точностью, то есть оценить отражательную способность с точностью выше чем 1 дБ. Техническое обслуживание (см. раздел 7.4) проводится для замены вышедших из строя частей радиолокатора (см. подраздел 7.4.3), профилактическое обслуживание (см. подраздел 7.4.2) обеспечит работоспособность радиолокатора и продлит время между отказами. После замены частей радиолокатора часто требуется калибровка. Мониторинг (см. раздел 7.3) описывает процесс, который обеспечивает высокое качество данных радиолокатора. Часто во время мониторинга принимаются решения о промежуточном техническом обслуживании или калибровке.

Калибровка и техническое обслуживание выполняются с регулярными интервалами, как описано ниже. В большинстве случаев обслуживание оборудования радиолокатора должно проводиться на месте, обслуживание программного обеспечения может осуществляться удаленно, в то время как калибровка может проводиться на месте (например, если необходимо отрегулировать настройки оборудования или задействовано специальное оборудование) или удаленно (например, если корректируются калибровочные константы). Мониторинг должен осуществляться как минимум ежедневно; поэтому мониторинг будет осуществляться удаленно для необслуживаемых постоянным персоналом объектов. Мониторинг осуществляется во время нормальной работы; не требуется прерывать работу радиолокатора.

Калибровка и техническое обслуживание любого радиолокатора должны осуществляться в соответствии с предписанными производителем процедурами. Краткое описание приведено в разделах 7.2–7.5.

7.2 Калибровка

7.2.1 *Общая информация*

Регулярная калибровка имеет решающее значение для хорошей работы системы.

7.2.2 *Типы калибровки*

В идеале для полной калибровки отражательной способности используется внешняя цель с известным коэффициентом отражения радиолокатора, такая как сфера с металлическим покрытием. Концепция состоит в том, чтобы проверить, имеют ли антенна и волноводы свои номинальные характеристики. Однако данный метод используется очень редко из-за практических трудностей подъема сферы и многочисленных отражений от наземных объектов, а также необходимого времени и квалификации персонала. Параметры антенны также могут быть проверены с помощью измерений солнечного потока. При обычной калибровке антенна, как правило, не проверяется, а калибруются волноводный тракт и приемо-передающая система. Обычно предписываются следующие мероприятия:

– измерение излучаемой мощности и формы сигнала в соответствующей полосе частот;

– измерение потерь при передаче и приеме;

– проверка передаваемой частоты и частотного спектра;

– введение известного микроволнового сигнала перед приемным каскадом, чтобы присвоить эталонную мощность заданному отсчету АЦП;

– измерение отношения сигнал-шум, которое должно быть в пределах номинального диапазона, соответствующего техническим характеристикам радиолокатора;

Если по результатам этих калибровочных проверок выявлены какие-либо изменения или отклонения, необходимо произвести корректирующие настройки. Доплеровская калибровка включает в себя: проверку и настройку фазовой стабильности с использованием фиксированных целей или искусственных сигналов; масштабирование реальной и мнимой частей комплексного видео; и тестирование сигнального процессора с известными искусственно сгенерированными сигналами.

Несмотря на то, что современные радиолокаторы обычно снабжаются очень стабильными электронными устройствами, калибровки необходимо проводить достаточно часто, чтобы гарантировать надежность и точность данных. Калибровка должна производиться либо квалифицированным персоналом, либо с помощью автоматических методик, например, с использованием контрольно-диагностичекого оборудования, которое работает в непрерывном режиме. В первом случае, когда требуется персонал, калибровку оптимально проводить не реже одного раза в год; во втором – может выполняться ежедневно или даже полунепрерывно. Простые сравнительные проверки по мощности и местоположению эхосигнала можно осуществлять часто, используя два или более радиолокаторов с перекрывающимися зонами обзора и следящих за соответствующей целью.

Радиолокационные системы необходимо регулярно калибровать для обеспечения постоянно высокого уровня точности измерений. Это включает в себя калибровку различных параметров в разные промежутки времени. Радиолокационная постоянная, C, должна измеряться с точностью ±1 дБ. Погрешность в коэффициентах отражения радиолокатора больше, поскольку, помимо радиолокационных констант, сюда входят дополнительные параметры (например, атмосферное затухание). В таблице в Добавлении D приведены параметры, подлежащие измерению; методы, используемые на практике, и требуемая частота калибровки.

7.2.3 *Элементы, процедуры и интервалы калибровки*

Частоты, предложенные в добавлении D, являются только ориентировочными значениями. Пользователи должны следовать инструкциям производителя.

7.3 Мониторинг

7.3.1 *Общая информация*

Мониторинг описывает процедуры контроля состояния, функциональности и качества данных радиолокационной системы. Это необходимо делать регулярно, по крайней мере, ежедневно, в соответствии с инструкциями и рекомендованными процедурами, данными производителем. На радиолокационных станциях без постоянного обслуживающего персонала мониторинг осуществляется из удаленных центральных офисов. Несоответствия, обнаруженные в ходе мониторинга, могут привести к промежуточному техническому обслуживанию, калибровке или другим действиям, описанным производителем.

Мониторинг радиолокационной системы оказывает значительное влияние на качество радиолокационных данных и, следовательно, на применение радиолокационных данных, таких как КОО и ассимиляция данных. Мониторинг качества данных будет включен в планируемый стандарт ISO 19926-2.

В зависимости от аппаратного и программного обеспечения радиолокатора, различные параметры системы могут контролироваться автоматически или вручную. Автоматический мониторинг предполагает выдачу текстовых сообщений обслуживающему персоналу. Ручной мониторинг регулярно проводится обслуживающим персоналом для обеспечения технических характеристик или метеорологом для радиолокационных видов продукции, таких как отражательная способность, интенсивность дождя или доплеровская скорость (для обмена радиолокационными данными см. добавление E). Простой мониторинг функциональности метеорологического радиолокатора будет включать частые проверки нескорректированных радиолокационных изображений и проверку интенсивности сигналов и местоположения наземных целей, создающих помехи. Внезапные изменения могут свидетельствовать о неисправности приемника или передатчика либо настройки направления наведения антенны. Даже простое сравнение радиолокационной интенсивности дождя с ближайшим датчиком дождя может дать представление о функциональности метеорологического радиолокатора. Что касается поляриметрического радиолокатора, то мониторинг максимального значения p_{HV} в условиях слабого дождя, выпадающего из слоистообразных облаков, во время нормальной работы радиолокатора дает хорошее представление об общем качестве и состоянии системы.

Несколько элементов, описанных в разделах 7.2 и 7.3, можно рассматривать как мониторинг. В частности, те элементы, которые рекомендуются для ежедневных или даже более частых проверок, могут рассматриваться как мониторинг, если автоматические процедуры будут выдавать сигналы тревоги, как только параметры отклоняются от заданных значений. Проверка калибровки по солнцу (см. подраздел 7.3.3) позволяет контролировать стабильность приемника и точность наведения в случае, если оценка данных выполняется в режиме реального времени и передается в удаленный центральный офис. Встроенное испытательное оборудование (BITE) может отслеживать большое количество технических параметров и выдавать сигнал тревоги в случае, если параметры выходят за пределы заданных границ. BITE также может контролировать внешние устройства, такие как кондиционеры или источники бесперебойного питания. Сигналы тревоги BITE должны автоматически отправляться в виде текстовых сообщений обслуживающему персоналу.

Кроме того, необходимо учитывать затухание в обтекателе до нескольких дБ в ситуациях, когда сильный дождь или снегопад приводит к попаданию воды, льда или таянию ледяного покрова на обтекатель. Старение обтекателя может увеличить время до стекания воды или ледяного покрова. Это можно улучшить с помощью гидрофобного покрытия обтекателя. Трещины в обтекателе могут привести к всасыванию воды из-под обтекателя и, следовательно, к увеличению потерь. Рекомендуется регулярно очищать и осматривать поверхность обтекателя.

7.3.2 ***Устойчивость радиолокационной системы***

С помощью современных радиолокационных технологий (например, малошумящих усилителей (МШУ), быстрых и точных АЦП) и при тщательной и регулярной калибровке можно достичь высокой стабильности системы: внутренние неопределенности, связанные с самой радиолокационной системой, меньше, чем неопределенности, связанные с внутренней изменчивостью отражательной способности радиолокационной цели.

Для количественных радиолокационных применений обязательны высокая стабильность и точная калибровка. Контроль стабильности только цепи приемника или цепи передатчика (односторонний) проще, чем контроль стабильности всей радиолокационной системы (двусторонний).

Для контроля стабильности цепи приемника на вход МШУ приемника подается опорный сигнал мощности (вместо принимаемой мощности, поступающей от антенны), и именно это значение (± заданная погрешность) используется для привязки заданного значения аналого-цифрового блока на выходе цифрового приемника к опорному значению мощности. Не производится измерение мощности обратного рассеяния данного объекта

на заданном расстоянии. Просто известно, что заданная мощность в логарифмическом масштабе (дБм) соответствует заданному логарифмически преобразованному аналого-цифровому блоку. В случае приемника, установленного на антенне, эффективное решение использует источник шума в качестве опорного сигнала, используя преимущества его высокой температурной стабильности [6].

Контроль устойчивости всей системы требует оценки потерь (приемной и передающей цепей, включая волновод, поворотное соединение, соединители, кабели, обтекатель и т. д.), коэффициента усиления антенны и точности угла наведения антенны. Обеспечение стабильности всей системы требует калибровки радиолокационной системы относительно некоторой известной эталонной цели (например, металлической сферы, уголкового отражателя с сертифицированным радиолокационным сечением) на различных расстояниях от самого датчика. Однако с пассивными рассеивателями, такими как большие сферы или уголковые отражатели, трудно иметь дело, особенно в условиях сильно изрезанного рельефа гористой местности.

Есть два способа преодолеть эту трудность:

– общая стабильность системы (двусторонняя) периодически [7] [8] или постоянно [9] [10] проверяется с помощью активных калибраторов;

– проблема разделена на две более простые, взаимодополняющие части:

– внешний приемник используется в качестве одностороннего пассивного калибратора для проверки цепи передачи (например, см. [7] и [11]);

– солнце используется для калибровки [12] и проверки [13] [14] приемной цепи.

Результаты последнего метода были получены с использованием данных, полученных в 2008 году [13] [14] в период спокойной активности солнечного потока. Совсем недавно было показано, что этот метод применим и в более активные периоды солнечной активности [15] [16]. Использование солнца является оптимальным с точки зрения затрат/выгод. Мониторинг солнечной активности может осуществляться непрерывно.

В случае, если регулярный мониторинг указывает на изменение стабильности, пользователь должен ознакомиться с инструкциями производителя для получения указаний по корректирующим действиям.

7.3.3 *Мониторинг стабильности приемника и электрического наведения с помощью солнца*

7.3.3.1 Общие замечания

Солнце является известным источником микроволновой энергии, и его можно использовать для проверки и мониторинга нескольких аспектов работы метеорологического радиолокатора. Эти проверки могут выполняться как отдельные задачи между оперативными сканированиями или во время технического обслуживания радиолокатора; также можно использовать наблюдения за солнцем во время обычных оперативных сканирований.

Подробные инструкции по проведению испытаний для отдельных радиолокаторов см. В руководящих документах к системам.

7.3.3.2 Точность ориентации антенны

Положение солнца в любой момент времени хорошо известно. Микроволновый сигнал от солнца можно использовать для проверки и калибровки точности наведения

антенны радиолокатора как в AZ, так и в EL. Как правило, это делается путем выполнения секторного сканирования вокруг солнца и вычисления смещения как в AZ, так и в EL с использованием известного положения солнца и информации об угле, полученной от управления антенной радиолокатора. Для смещения EL необходимо учитывать рефракцию при малых углах EL. В большинстве систем метеорологических радиолокаторов для этого предусмотрена автоматизированная процедура. Кроме того, были разработаны методы расчета смещений с использованием «попаданий» солнца во время обычных оперативных сканирований.

Использование солнечного излучения для контроля точности наведения антенны неявно требует точной синхронизации времени в системе управления радиолокатором.

Секторное сканирование вокруг солнца также может дать оценку коэффициента усиления антенны и ширины луча.

7.3.3.3 **Стабильность приемника**

Состояние цепи приемника радиолокатора также можно контролировать с помощью микроволнового сигнала от солнца. Однако следует отметить, что солнечный поток сильно колеблется во времени. Эталонные значения солнечного потока могут быть получены из солнечных обсерваторий.

В случае радиолокаторов с двойной поляризацией сигнал солнца виден в обоих каналах приемника. Горизонтальный и вертикальный сигналы должны иметь одинаковую величину, но быть некоррелированными (близкими к 0), поскольку солнце является неполяризованным источником.

7.4 **Техническое обслуживание**

7.4.1 ***Общие аспекты***

Техническое обслуживание радиолокаторов, которое имеет важное значение для обеспечения правильной и постоянной работы радиолокаторов, требует высококвалифицированных людских ресурсов и значительных финансовых ресурсов для поездок персонала, испытательного оборудования и соответствующих запасных частей.

Техническое обслуживание радиолокатора также требует наличия подробных руководств по техническому обслуживанию и документации, предоставленных изготовителем.

Современные радиолокаторы, если она надлежащим образом установлены и эксплуатируются, не должны часто выходить из строя. Некоторые производители утверждают, что их радиолокаторы имеют общее среднее время между (основными) отказами (MTBF) порядка одного года. Однако эти заявления зачастую являются оптимистичными, и реализация MTBF требует планового профилактического обслуживания. Для минимизации времени ремонта необходимы плановое повседневное обслуживание и достаточное количество технического персонала.

Продуманная организация обслуживания повысит регулярность работы радиолокатора до 96 % времени в течение года при наличии стандартного оборудования. Более высокая эффективность работы возможна при более высоких затратах.

Чтобы избежать отключений, связанных с техническим обслуживанием во время критических погодных условий, это заранее увязывается с прогнозом погоды. Обычно обслуживание длится всего несколько часов.

7.4.2 ***Профилактическое техническое обслуживание***

Профилактическое обслуживание должно включать, по меньшей мере, квартальную проверку всех подверженных износу частей радиолокатора, таких как редукторы, моторы, вентиляторы и объекты инфраструктуры. Местный обслуживающий персонал должен вносить результаты проверок в журнал обслуживания радиолокатора и, по мере надобности, посылать их в центральную обслуживающую организацию. Когда имеется много радиолокаторов, можно организовать, вероятно, централизованную службу материально-технического снабжения и ремонтный цех. Последний получает вышедшие из строя части радиолокаторов, ремонтирует их и передает их в службу материально-технического снабжения для хранения в качестве запасных частей, которые будут использоваться по мере необходимости в месте эксплуатации.

7.4.3 ***Профилактическое техническое обслуживание***

Для выполнения ремонтных работ служба должна быть достаточным образом укомплектована, а именно:

- Запасными частями для всех самых важных элементов радиолокатора с длительным сроком изготовления, такими как радиолампы, твердотельные компоненты, панели, шасси, моторы, редукторы, блоки питания и т. д. Опыт показывает, что желательно предусмотреть 30 % первоначальных затрат на радиолокатор для приобретения запасных частей, хранимых в месте его расположения. Если имеется много радиолокаторов, то эта процентная доля может быть снижена при соответствующем распределении между централизованным и местным техническим обслуживанием.

- Испытательным оборудованием, включая упомянутое выше калибровочное оборудование. Обычно затраты на это составляют приблизительно 15 % от стоимости радиолокатора.

- Хорошо подготовленным персоналом, способным определить проблему и быстро и эффективно произвести ремонтные работы, что является исключительно важным.

7.4.4 ***Варианты технического обслуживания***

Системы метеорологических радиолокаторов должны иметь, как минимум, следующие возможности технического обслуживания:

- удаленный доступ;

- переключатель включения/выключения (сброс);

- тестирование с использованием опорных сигналов;

- обновление программного обеспечения/прошивки;

- точность ориентации антенны;

- диагностика неисправностей и состояния.

Некоторые задачи по обслуживанию могут быть выполнены удаленно (требуется надежное соединение), другие требуют выезда на место.

7.4.5 *Элементы и интервалы технического обслуживания*

Методы и процедуры технического обслуживания зависят от изготовителя радиолокатора. Тем не менее, производители часто используют аналогичные средства обслуживания и измерительные приборы.

В первую очередь это включает регулярную, многократную проверку калибровок параметров, предоставляемых изготовителем. Параметры, отклоняющиеся от эталонного значения, должны быть перекалиброваны.

Результаты тестирования, такие как передаваемая мощность или динамический диапазон, должны быть в пределах допустимых значений для поддержания высокого качества данных. Однако четко определить эти значения допусков сложно, поскольку они зависят от цели наблюдения и конфигурации системы.

Рекомендуемый минимум оборудования для калибровки и обслуживания включает следующие виды:

– микроволновая система SG;

– микроволновый измеритель мощности и/или датчик мощности;

– мегагерцевый осциллограф;

– микроволновый счетчик частоты и/или анализатор спектра;

– микроволновые компоненты, включая нагрузочные устройства, блоки сопряжения, аттенюаторы, соединительные устройства, кабели, адаптеры и т. д.;

– стандартные электрические и механические инструменты и оборудование

– диодный детектор и аттенюатор 3 дБ для измерения ширины импульса.

Пример каждого элемента с соответствующими интервалами технического обслуживания для радиолокационной системы показан в Добавлении D. Поскольку некоторые из этих устройств используются для калибровки радиолокатора, их необходимо калибровать через регулярные интервалы.

Техническое обслуживание охватывает не только саму радиолокационную систему, но и другие технические узлы, жизненно важные для ее работы (например, вентиляция, ИБП и кондиционирование воздуха). Интервал их технического обслуживания может отличаться от интервала обслуживания самой радиолокационной системы. Оборудование, связанное с программным обеспечением, используемым в системах управления, сервис и производство продукции также подвергаются регулярным проверкам. Они должны проводиться каждые два года. Кроме того, поддержание запасов подходящих запасных частей на месте расположения РЛС и на центральном складе также вносит важный вклад в обеспечение непрерывной доступности.

7.5 **Управление данными на протяжении их жизненного цикла**

7.5.1 *Стратегия по запасным частям*

Высокие требования к доступности данных метеорологического радиолокатора требуют круглосуточной работы без длительных перерывов из-за трудоемкого обслуживания или сбоев в системе. Для обеспечения высокой доступности рекомендуется хранить критически важные запасные части на месте установки радиолокатора или на складе

оператора, где они могут быть быстро развернуты в случае сбоя. Такие запасные части могут включать, например, критически важные части передатчика радиолокатора, приемника, системы привода антенны, электропитания и интерфейсов связи.

Подробный перечень рекомендуемых запасных частей см. в документации производителя.

Менее важные запасные части могут быть заказаны по запросу у производителя. Многие производители предлагают сервисные контракты или услуги экспресс-доставки запасных частей для обеспечения быстрой доставки заводских запчастей.

Производитель должен быть в состоянии предоставить полный список всех запасных частей системы с указанием сроков поставки.

7.5.2 ***Доступность системы***

Доступность системы (*System availability*) должна определяться как процент удовлетворительной работы системы в течение определенного периода времени, включая время, затраченное на плановое профилактическое обслуживание и корректирующее обслуживание, и определяется по формуле (7.A.35):

$$System\ availability = \frac{\left(MTBF \cdot NF\right)}{\left(MTBF + MSRT\right) \cdot NF + TTPM} \cdot 100\% \qquad (7.A.35)$$

где:

NF общее количество отказов в течение периода эксплуатации системы; «отказ» определяется как потеря функциональности, при которой система не может выполнить системные требования; поэтому, даже если функциональный отказ происходит на определенном блоке, до тех пор, пока система выполняет системные требования благодаря такому резервированию, это не соответствует отказу;

$MTBF$ среднее время наработки на отказ; определяется как общее измеренное время работы, деленное на общее значение *коэффициента шума* системы *(NF)*;

$MSRT$ среднее время восстановления работоспособности;

$TTPM$ общее время профилактического обслуживания; определяется как общее время планового профилактического обслуживания в течение периода эксплуатации системы.

MSRT определяется по формуле (7.A.36):

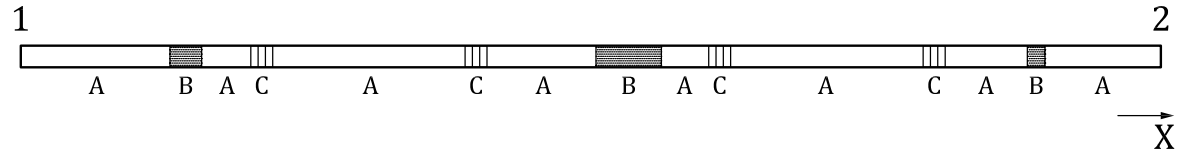
$$MSRT = MTTR + MRT \qquad (7.A.36)$$

где:

$MTTR$ среднее время наработки на отказ; определяется как общее измеренное время ремонта, деленное на общий *коэффициент шума* системы (*NF*) при условии наличия необходимых запасных частей на месте;

MRT это среднее время отклика, определяемое как среднее время, необходимое, начиная с момента сбоя, для того, чтобы техник был готов приступить к ремонту; при необходимости, поскольку запасных частей нет на месте установки радиолокатора, время транспортировки с центрального склада или производителя должно быть включено в *MRT*; наличие подходящих запасных частей и их инвентаризация также важны для обеспечения высокой эксплуатационной готовности.

Концептуальное изображение каждого параметра показано на рисунке 7.A.11.



Условные обозначения:

1	Начало работы	B	Время восстановления обслуживания при сбоях
2	Окончание работы	C	Плановое время профилактического обслуживания
A	Время нормальной работы	X	Срок

Рисунок 7.A.11 Пример расчета критериев доступности системы

7.5.3 *Затраты на обслуживание и ремонт*

Доплеровский радиолокатор – это сложный инструмент, способный обнаружить объект и определить его положение и радиальную составляющую его скорости в определенный момент времени. Доплеровский метеорологический радиолокатор – это очень сложный, но уникальный инструмент, способный в режиме реального времени получать обзор текущих полей осадков. Он четко показывает, где и когда что-то происходит. Однако точно описать происходящее и точно определить скорость выпадения осадков гораздо сложнее. Исходя из этого, неудивительно, что общая рекомендация данного документа в отношении требуемого персонала заключается в том, что соотношение между эквивалентом полной занятости (FTE) инженеров/научных сотрудников РЛС и количеством РЛС в сети должно быть больше 1. Стоимость жизненного цикла метеорологического радиолокатора также включает расходы на запасные части и базовое эксплуатационное обслуживание.

8. ПЕРСОНАЛ, КОМПЕТЕНЦИИ И ОБУЧЕНИЕ

Выбор, проектирование, эксплуатация, обслуживание и использование сети метеорологических радиолокаторов требуют широкого понимания технологии, ее ограничений и требований к применению.

Проектирование радиолокационной сети и выбор радиолокационной технологии требуют проведения комплексных исследований и учета широкого спектра пользовательских применений. Пользователям радиолокационных данных и продукции требуются знания применений конечных пользователей и в области мезомасштабной метеорологии. По мере накопления опыта и знаний о возможностях радиолокаторов могут появиться дополнительные разработки для устойчивого и расширенного метеорологического обслуживания.

В радиолокаторе используются передатчики высокой мощности, очень чувствительные приемники, сложная обработка сигналов, тяжелые вращающиеся опоры и антенны, а также инструменты самоконтроля. Радиолокационная станция чаще всего располагается как автономное удаленное сооружение с оборудованием для отопления/охлаждения, укрытиями, телекоммуникациями, вспомогательными энергетическими установками и вопросами технического обслуживания объекта. Для получения надежных измерений радиолокатор требует калибровки и технического обслуживания. Небольшие изменения в калибровке и интерпретации могут существенно повлиять на результаты. Менеджмент качества требует мониторинга и регистрации изменений в системе.

Таким образом, для эксплуатации и использования радиолокатора и радиолокационной сети существует широкий спектр компетенций, включая научные, метеорологические, технические и логистические навыки. Эти компетенции показаны в таблице 7.A.7.

Операторы радиолокаторов также поддерживают другие технологии мониторинга. ВМО развивает всесторонние компетенции по целому ряду таких технологий.

Таблица 7.A 7. Персонал, компетенции и обучение

Наименование	*Описание*
Руководство и управление проектами	Организация должна «владеть» проектом. Понимание общих целей и способность руководить и управлять сквозным проектом имеют решающее значение. Необходим общий подход, переговоры о выделении средств и управлении ими, а также руководство людьми и контрактами. Многие компетенции могут быть предоставлены творческими способами (например, командами, внешними консультантами или другими лицами), но ответственность за проект должна лежать в рамках организации. Образование/опыт: навыки лидерства и управления проектами.
Научные и метеорологические компетенции	Стратегическое планирование необходимо для определения сервиса и уровня обслуживания, а также для проектирования радиолокационной сети и ее применений. Это необходимо в начале проекта и может быть предоставлено консультантами, работающими в тесном сотрудничестве с НМГС. Конкретные компетенции: – понимание стратегического плана организации и предполагаемых уровней обслуживания и обслуживания; – понимание погоды (климатология интенсивности осадков, высота соответствующих погодных систем, характеристики суровой погоды) в зоне покрытия; – базовое понимание требований пользователя или применения (систематическая ошибка, точность, качество данных); – базовое понимание радиолокационных технологий (ослабление, ширина луча, стратегия сканирования, уменьшение помех от земной поверхности) и преимуществ и недостатков. Образование/опыт работы (в команде): – мезометеорологические и гидрологические знания (мезомасштабная метеорология, распределенный водораздел); – понимание применения радиолокационных технологий; – понимание стратегического направления деятельности НМГС; – умение проводить анализ требований; – научные знания об ограничениях радиолокации.
Научные и инженерные компетенции	Техническая поддержка необходима для преобразования пользовательских спецификаций в технические спецификации, а также для технического и технологического планирования. Это может быть команда людей или предоставляемая консультантами, работающими с НМГС и разработчиками систем. Конкретные компетенции: – понимание технологии радиолокаторов и ее преимуществ и недостатков; – понимание влияния на уровни обслуживания и применений; – понимание организационных компетенций (управление проектами, технические возможности); – понимание техники безопасности, лицензирования и практики строительства. Образование/опыт: – промышленная, электромеханическая инженерия для планирования; – знание радиолокационного оборудования; – организационные знания; – знание принципов проектирования управления качеством.

Наименование	*Описание*
Технические вопросы – поддержка и обслуживание	Требуется непрерывное обслуживание, калибровка и поддержка. Можно привлечь подрядчика, но это может быть чревато проблемами (например, трудно найти компетентного специалиста по радиолокаторам). Конкретные компетенции: – общие знания и практика процедур по охране труда при работе с мощными системами и тяжелым оборудованием; – общее понимание электроники (необходимость работы с вольтметрами, SG, осциллографами, анализаторами спектра); – уверенная работа с компьютерами, настройка сетей, резервное копирование данных и компьютеров; – общие знания по техническому обслуживанию объекта (ремонт дорог, дизельные и электрические системы, кондиционеры, системы отопления); – базовые знания систем большой мощности, тяжелой техники, электронных компонентов на уровне линейных запасных блоков, телекоммуникаций; – диагностические и аналитические навыки; – понимание культуры управления качеством; – базовые знания в области применения радиолокаторов. Образование/опыт: – продвинутые технические навыки работы с мощными электрическими радиочастотными системами, электронными и компьютерными системами, а также тяжелыми механическими системами; – знания в области вспомогательных энергетических систем и общего технического обслуживания на объекте.
Менеджмент качества	Функции заключаются в управлении качеством радиолокационного оборудования, функционированием и обслуживанием радиолокационной сети, включая инженерное (техническое обслуживание, тестирование, планирование наличия резервного оборудования) и научное (поддержка аппаратной диагностики) обеспечение, управление метаданными, архивирование, мониторинг и обновление систем радиолокации и обработки. Образование/опыт (навыки коллективной работы и различные профессиональные знания): – базовые технические навыки для мониторинга и диагностики операционных систем, а также составления отчетов об изменениях в системе; – навыки работы с компьютерными технологиями для архивирования и поиска метаданных и данных; – навыки установки компьютерного программного обеспечения и систем для обновления систем обработки и аппаратуры радиолокатора.

Наименование	*Описание*
Разработчик метеорологических и/или прикладных программ и исследований	Роль заключается в оптимизации использования радиолокационных данных и их интеграции в системы прогнозирования, а также в обучении конечных пользователей. Это включает в себя менеджмент качества радиолокационной системы. Это может быть широкая группа людей («местный специалист»), и она может развиваться с течением времени. Конкретные компетенции: – обучение и продукция, которые на начальном этапе могут быть выполнены программным обеспечением производителя радиолокатора; – опыт работы с технологиями, приводящий к постоянному наращиванию потенциала, что лучше всего делать собственными силами; – высокий уровень развития технологии приводит к увеличению или расширению требований, что может потребовать изменения конфигурации радиолокатора или выработки продукции либо обмена данными; – широкие знания в области применения радиолокаторов, включая знание физики облаков, мезомасштабной метеорологии, измерения осадков и гидрологического применения; – разработка применений, которая является открытой и может быть связана с коммерческими услугами, обменом данными, программными приложениями для радиолокаторов, интегрированными системами наблюдений, прогнозированием, а также с улучшением и совершенствованием продукции. Образование/опыт: знание разработки применения для конечных пользователей и научных/программных приложений, включая интеграцию в прогностические системы или другие прикладные системы.

9. РАЗМЕЩЕНИЕ И УСТАНОВКА

9.1 Общие аспекты

В планируемом стандарте ISO 19926-2 будет представлена информация о последствиях, снижающих качество измерений осадков с помощью радиолокатора и их обнаружения, а также о соответствующих контрмерах, таких как последующая обработка радиолокационных данных.

9.2 Выбор места и подготовка площадки для размещения радиолокатора

Выбор площадки для радиолокационной системы зависит от планируемого применения.

В том случае, если радиолокационная сеть предназначается прежде всего для синоптических применений, в средних широтах, радиолокаторы следует располагать на расстоянии приблизительно 150–200 км от каждого. Если радиолокационная сеть используется для количественных измерений осадков, где крайне важно использовать радиолокационные лучи на небольшой высоте, это расстояние не должно превышать 100 км. Расстояние может быть увеличено на широтах ближе к экватору, если интересующие радиолокационные сигналы часто достигают больших высот. Во всех случаях радиолокаторы с узким лучом будут давать наилучшую точность для измерения осадков.

Когда существует определенная зона, требующая штормовых предупреждений, лучшим компромиссом обычно является размещение оборудования на расстоянии от 20 до 50 км от интересующей области и, как правило, с подветренной стороны от нее в соответствии

с основным штормовым следом. Рекомендуется устанавливать радиолокатор немного в стороне от основной трассы шторма, чтобы избежать проблем с измерениями, когда штормы проходят над радиолокатором. В то же время это должно привести к хорошему разрешению в интересующей области и позволить лучше предупреждать о приближающихся штормах [17].

Радиолокационные станции в высокогорных районах мало полезны для обнаружения осадков вблизи земли. Измерения с отрицательным EL дают сильное эхо от земной поверхности, поэтому они имеют смысл только в исключительных случаях. Поэтому в горных районах в большинстве случаев невозможно достичь компромисса между хорошей дальностью видимости и приземными измерениями. Здесь вспомогательная установка небольших систем в больших горных долинах может сыграть ценную дополнительную роль.

На выбор места установки радиолокатора влияют многие экономические и технические факторы, а именно:

– Существование дорог для подъезда к радиолокатору.

– Наличие электролиний и линий связи. Часто необходимо добавлять серийно выпускаемые установки для защиты от молний. Установка громоотводов должна быть тщательно продумана, поскольку характеристики антенны (в частности, ослабление боковых лепестков) могут серьезно пострадать, когда луч радиолокатора перехватывает такие стержни.

– Стоимость земли.

– Близость к объекту мониторинга и технического обслуживания.

– Наличие как можно меньшего количества помех для луча радиолокатора, чтобы максимизировать видимость радиолокатора и минимизировать количество помех на местности и блокирование луча. Никакое препятствие не должно находиться под углом, превышающим половину ширины луча над горизонтом, или при горизонтальной ширине, превышающей половину ширины луча. Это относится как к расстояниям непосредственной близости, так и к более дальним расстояниям. В случае применения в небольших масштабах особое внимание следует уделять предотвращению эхосигналов от земли в целевой зоне. В крупномасштабных применениях, напротив, неограниченная видимость является главным приоритетом. Программное обеспечение для моделирования может быть использовано для оценки качества радиолокационной станции-кандидата в отношении помех и препятствий на земле. Вход такого программного обеспечения представляет собой подробную модель рельефа EL (включая, по возможности, антропогенные помехи) и характеристики антенны и радиолокационного импульса: высота над землей сигнала подачи, частота импульсов, коэффициент усиления антенны, ширина луча 3 дБ, мощность импульса и антенна EL.

– Препятствия на территории радиолокационной станции подвержены изменениям, например, появляются новые здания или растут деревья. Оператор радиолокатора часто располагает законными средствами для ограничения будущего увеличения количества препятствий и их размеров и должен использовать их в полной мере.

– Для радиолокатора, который будет использоваться для работы на относительно малой дальности, после внимательного обследования места установки и изучения подробных топографических карт, иногда можно найти относительно плоскую территорию внутри небольшого понижения, края которого будут служить естественной защитой от помех для боковых лепестков диаграммы направленности антенны при минимуме блокирования основного луча. Во всех случаях обследование участка должно включать в себя проверку камеры и оптического теодолита на

наличие потенциальных препятствий. В некоторых случаях полезно использовать мобильную радиолокационную систему для подтверждения пригодности объекта [18].

– когда радиолокатор используется в целях обнаружения метеорологических объектов на больших расстояниях, как это может быть в случае тропических циклонов или других применений на побережье, то его обычно устанавливают на вершине холма. Он увидит много радиолокационных помех от местных предметов, что может быть не так важно при наблюдении на дальних дистанциях.

Каждое обследование потенциальных мест установки радиолокатора должно включать тщательную проверку на наличие электромагнитных помех в целях максимально возможного исключения взаимного влияния с другими системами связи, такими как телевидение, микроволновые линии или с другими радиолокаторами. Также должно быть подтверждение того, что микроволновое излучение не представляет опасности для здоровья населения, проживающего вблизи предполагаемой радиолокационной площадки [17] [19]. В большинстве случаев существуют правовые нормы по этим темам, которые необходимо соблюдать. Чтобы избежать помех, на волноводе могут быть установлены фильтры излучения и/или приема, поскольку они вносят дополнительное затухание в сигнал.

Может даже потребоваться работа радиолокатора без излучения в определенном угловом секторе («глушение сектора»), чтобы не превысить установленный законом уровень воздействия микроволн. Функция перекрытия сектора радиолокатора должна контролироваться специальной системой контроля безопасности. Система контроля безопасности прервала бы работу передатчика, если бы он непреднамеренно попытался передать сигнал в сектор.

9.3 Вспомогательная инфраструктура

Вспомогательная инфраструктура для площадки метеорологического радиолокатора может включать:

– радиолокационную вышку (которую, возможно, придется построить);

– источник электрического питания;

– средства передачи данных (приблизительно 8 Мбит/с для радиолокатора с двойной поляризацией);

– контролируемая среда в помещении для операторов (влажность и температура);

– ИБП (размер, требуемое доступное время поддержки и генератор);

– доступность (там, где требуется эксплуатация в отсутствие постоянного персонала, оборудование должно быть более качественным).

Радиолокационная вышка значительной высоты может потребоваться для преодоления слишком большой блокировки луча и помех на земле в непосредственной близости от радиолокатора. Горизонтальность опорной плоскости радиолокатора должна поддерживаться даже в случае сильного ветра.

Непрерывный источник питания необходим для радиолокатора, для которого данные, как ожидается, будут доступны в любое время. Если радиолокационная станция изолирована, может оказаться недостаточно полагаться на электросеть. В этом случае необходим электрогенератор с ИБП.

Кондиционирование воздуха в помещении электронного шкафа необходимо большую часть времени для поддержания безопасных пределов температуры и влажности электроники. Часто бывает необходимо расширить его до внутренней части обтекателя, чтобы избежать, например, образования плесени.

Телекоммуникационные и компьютерные технологии позволяют передавать радиолокационные данные (обычно) в центральный центр обработки данных. Здесь собираются и интегрируются данные со многих радиолокаторов и из других источников данных, таких как спутники. Работа каждого радиолокатора должна контролироваться удаленно, чтобы можно было определить действия дистанционного управления или действия на месте с расстояния.

Передача может осуществляться по волоконно-оптическим линиям связи или другим высокоскоростным наземным линиям связи, радио-или микроволновым линиям связи и спутниковым каналам связи. Следует иметь в виду, что радиолокаторы часто располагаются на удаленных объектах, где доступны не все телекоммуникационные системы.

9.4 Зона покрытия

Дальность физического наблюдения любого метеорологического радиолокатора практически ограничена примерно 450 км, поскольку даже летние штормы за пределами этого диапазона обычно находятся ниже горизонта. Фактически, без блокировки луча и со стандартной рефракционной способностью высота горизонта в 450 км составляет 12 км. Таким образом, обнаруживаются только вершины сильных конвективных бурь.

Для качественного непрерывного мониторинга большинства погодных явлений, связанных с погодой, типичная максимальная дальность составляет 230 км, для которых самая низкая высота, которую радиолокатор может наблюдать без блокировки луча, составляет около 3 км. Кроме того, антенна с карандашным лучом мощностью 1° HPBW обеспечивает угловое разрешение 4 км на расстоянии 230 км. Следовательно, количественные оценки при таких диапазонах невозможны.

Следовательно, КОО обычно ограничивается максимальным диапазоном около 90 (150) км для HPBW = 1° (0,6°). Без блокировки луча самая низкая высота, которую может наблюдать радиолокатор с углом EL, равным 0°, на дальности 90 (150) км, составляет 500 (1 300) м.

Ситуация значительно усложняется в горной местности, где эхосигналы отражения от облаков или атмосферных осадков могут быть обнаружены только на большой высоте из-за экранирования лучей рельефом. В этом случае блокирование местности в сочетании с небольшой глубиной осадков в холодное время года и низкими уровнями таяния приводит к недостаточному радиолокационному покрытию для поддержки КОО в диапазоне от 60 до 90 км. В связи с этим возникает вопрос о том, как решить возникающую потребность в улучшении охвата на малых высотах. Стоимость, радиационная безопасность и эстетические проблемы поощряют использование радиолокаторов малой дальности, оснащенных небольшими антеннами и маломощными передатчиками, которые могут быть установлены либо на недорогих вышках, либо на существующей инфраструктуре. Недорогие, маломощные радиолокаторы малой дальности X-диапазона могут быть эффективным решением для дополнения радиолокаторов большой дальности. В этом случае типичная максимальная дальность действия составляет порядка 50 км.

Радиолокаторы могут обеспечить практически непрерывный мониторинг погоды, связанной со штормовыми возмущениями синоптического масштаба и мезомасштаба на большой территории (например, радиус 220 км и площадь обзора 125 000 км^2), если им не мешают здания, холмы, горы и т. п. Из-за помех на земле на малых расстояниях, кривизны Земли и расширения луча радиолокатора количественное обнаружение осадков на расстоянии более 100 км от радиолокатора возможно только в ограниченной степени, а максимальная практическая дальность наблюдения за погодой составляет около 200 км.

На больших незаселенных территориях другие средства наблюдения часто недоступны или невозможны. В регионах, где часто выпадают очень сильные и обильные осадки, рекомендуется использовать радиолокатор S-диапазона. В других районах, например, в средних широтах, радиолокаторы C-диапазона могут быть эффективными при гораздо меньших затратах. Радиолокаторы X-диапазона страдают от затухания и могут использоваться только на коротких расстояниях.

9.5 Видимость и помехи

На всех радиолокационных станциях должна быть обеспечена неограниченная радиолокационная видимость. Это относится как к непосредственной близости, так и к большим расстояниям.

В случае применения в небольших масштабах особое внимание следует уделять предотвращению эхосигналов от земли в целевой зоне. В крупномасштабных применениях, напротив, неограниченная видимость является главным приоритетом.

Эхо от земли (помехи на земле) – это отражения луча радиолокатора от естественной топографии (например, гор, деревьев) и/или препятствий (например, зданий, ветряных электростанций), расположенных в непосредственной близости от метеорологического радиолокатора. Боковые лепестки вызывают эхо от земли.

Топографические карты могут быть использованы в качестве отправной точки для поиска подходящего места для метеорологического радиолокатора. Идеально место, где боковые лепестки могут быть удалены естественным рельефом или деревьями. Обследование участка должно включать в себя проверку камеры и оптического теодолита на наличие местных препятствий, таких как башни или высокие деревья. В крайних случаях полезно использовать мобильную радиолокационную систему для подтверждения пригодности объекта. Необходимо провести наблюдение за электромагнитными помехами.

ДОБАВЛЕНИЕ А. ИЗМЕРЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ СИСТЕМЫ

(нормативная деятельность)

А.1 Общая информация

В зависимости от конфигурации, описанной в п. 5.2.1, доступны три схемы измерений. В качестве типичной конфигурации в данном приложении показаны методы измерения параметров независимого излучателя с двойной поляризацией.

А.2 Стандартный формат спецификации

На основе раздела 6 в таблице А.1 перечислены важные параметры работы метеорологического радиолокатора и соответствующие им пороговые значения. Поскольку некоторые параметры зависят от длины волны радиолокатора, при необходимости приводятся отдельные пороговые значения для X-, C- и S-диапазонов. Кроме того, пороговое значение каждого параметра приведено для трех категорий, представляющих различные уровни технической точности, доступные на момент публикации. Уровень «порог» представляет собой минимальные требования к количественной системе метеорологического радиолокатора. Уровень «общий» относится к типичным требованиям к метеорологическим радиолокаторам. Уровень «достижимый» требует высококлассного оборудования, а также высококлассного проектирования и производства, чтобы соответствовать пороговым значениям. Соответственно, последние системы значительно дороже радиолокационных систем «общего» уровня.

Поскольку Таблица А.1 посвящена количественным метеорологическим радиолокаторам, могут быть и другие применения, которые не требуют, чтобы все параметры были на уровне «порогового» или лучше. Рекомендуется измерять параметры, приведенные в таблице А.1, с разрешением лучше, чем 1/10 от заданного значения.

В таблице в Добавлении В приведены примеры распространенных технических характеристик метеорологических радиолокаторов на современном рынке (по состоянию на 2016 год).

Таблица А.1. Стандартный формат спецификации

Требования к производительности системы для метеорологического радиолокатора		*Категория*		
Основные параметры	*Критерии*	*Достижимая*	*Типовая*	*Пороговое значение*
Чувствительность	Чувствительность к отражению должна быть *A* dBz или менее на расстоянии до *B* км, где максимальная однозначная скорость более ±48 м/с достигается с 2-ступенчатым f_{PRF} либо 2:3, либо 3:4, или 4:5			
	Для S-диапазона	< 10; 240	< 18; 240	< 23; 240
	Для C-диапазона	< 5; 120	< 13; 120	< 18; 120
	Для X-диапазона	< 0; 60	< 8; 60	< 13; 60

Требования к производительности системы для метеорологического радиолокатора		*Категория*		
Основные параметры	*Критерии*	*Достижимая*	*Типовая*	*Пороговое значение*
Пространственное разрешение	Разрешение луча должно быть θ_H и θ_V (в градусах) или меньше	< 0.55[a]	< 1	< 2
	Разрешение диапазона должно быть *RR* (в м) или меньше	≤ 75	≤ 150	≤ 1 000
	Боковой лепесток антенны должен быть ΔV_{pa} (в дБ) или меньше	< –27	< –23	< –20
	Боковой лепесток диапазона должен быть ΔV_{pr} (в дБ) или меньше для радиолокатора с импульсным сжатием	< –70	< –50	< –30
Фазовая стабильность	Фазовая стабильность должна быть θ_{ps} (в градусах) или меньше			
	Для S-диапазона	< 0,1	< 0,3	< 1
	Для C-диапазона	< 0,2	< 0,6	< 2
	Для X-диапазона	< 0,4	< 1,2	< 4
Точность измерения двойной поляризации	Коэффициент перекрестной поляризации должен быть XPD_{sys} (в дБ) или меньше	< –35	< –30	< –20
Максимальная скорость вращения	Максимальная скорость вращения антенны должна быть R_{max} (в об/мин) или больше	≥ 10	≥ 6	≥ 2
Ускорение	При ускорении антенны EL время движения EL от 0 до 90 градусов и от 90 до 0 градусов должно быть меньше, чем t_{aEL} (в сек)	< 10	< 20	< 40
	Как ускорение антенны AZ, время от максимальной скорости до полной остановки должно быть меньше, чем t_{aAZ} (в сек)	< 3	< 5	< 10
Точность ориентации антенны	Точность наведения антенны должна быть θ_{ps} (в градусах) или меньше	< 0,05	< 0,1	< 0,2
Точность ориентации антенны	Точность наведения антенны должна быть θ_{ps} (в градусах) или меньше	< 0,05	< 0,1	< 0,2
Динамический диапазон	Динамический диапазон должен быть LV_d (в дБ) или больше	> 120	> 100	> 80

Требования к производительности системы для метеорологического радиолокатора		*Категория*		
Основные параметры	*Критерии*	*Достижимая*	*Типовая*	*Пороговое значение*
Нежелательные излучения	Уровень нежелательных излучений должен составлять A дБ или менее на расстоянии B МГц от центральной частоты f_0 (в МГц)	Значения не указаны[b]		

[a] За исключением S-диапазона. [b] В зависимости от национальных нормативов.

A.3 Измерение основных параметров

A.3.1 *Общая информация*

Параметры работы системы, приведенные в таблице A.2, отсортированы по компонентам радиолокатора. Для некоторых элементов существуют различия в измерениях между импульсно-компрессионными и неимпульсно-компрессионными радиолокаторами.

A.3.2 *Ширина полумощности импульса передачи*

A.3.2.1 Схема измерения

Испытательное оборудование должно быть защищено, так как выборочная мощность передатчика может быть достаточно высокой.

A.3.2.2 Устройство для измерения

Устройство для измерения приведено в таблице A.3.

Таблица A.3. Устройство для измерения ширины половины мощности передающего импульса

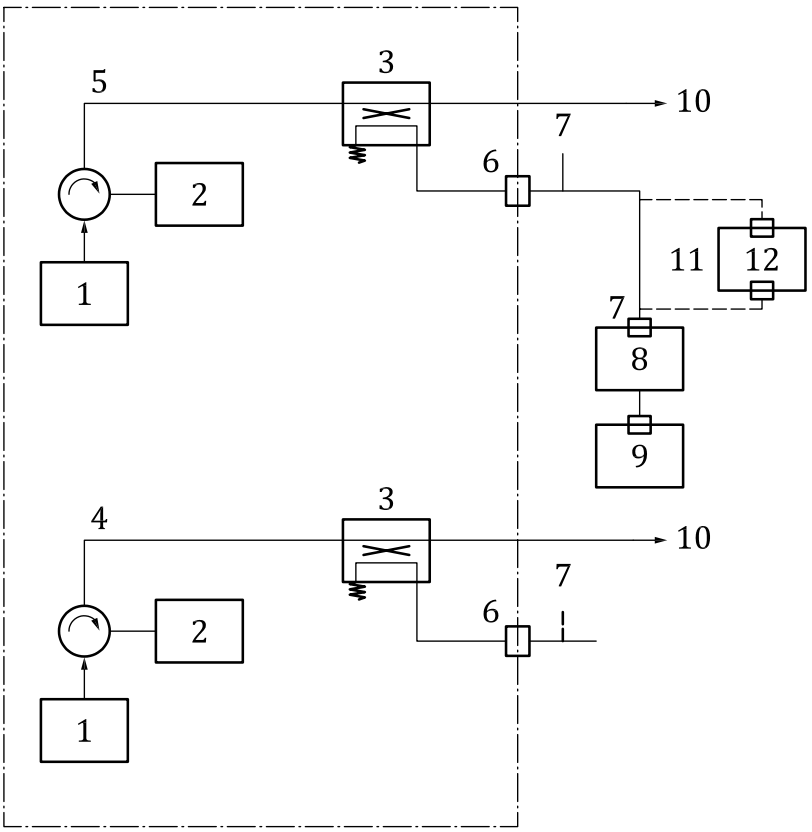
№	*Название устройства*	*Замечания*
1	Осциллограф	
2	Детектор	
3	Аттенюатор	Аттенюатор 3 дБ

A.3.2.3 Метод измерения

Подключите детектор и осциллограф к точке контроля выхода передачи, как показано на рисунке A.1. Сначала измерьте грубый пик $P_р$, как показано на рисунке A.2. Затем запишите 10 % $P_р$, где $P_р$ становится 10 %. Из средней точки между двумя 10 % $P_р$ проведите линию вверх. Точка пересечения задается как $P_р'$.

Затем измерьте точку, где $P_р'$ становится 50 %, используя ступенчатые аттенюаторы. При этой амплитуде проведите линию по оси времени, чтобы получить ширину импульса τ.

В качестве альтернативы ширина импульса может быть измерена с помощью датчика/измерителя пиковой мощности вместо осциллографа/шаговых аттенюаторов.



Условные обозначения:

1 Передающее устройство
2 Поглощающая нагрузка
3 Направленный ответвитель
4 Канал вертикальной поляризации (V)
5 Канал горизонтальной поляризации (H)
6 Точка контроля выхода передатчика
7 Кабель для измерения
8 Детектор
9 Осциллограф
10 Опорно-поворотное устройство
11 Вставка
12 Аттенюатор 3 дБ

Рисунок А.1. Диаграмма измерения ширины полумощности импульса передачи (τ) (тип независимого передатчика с двойной поляризацией)

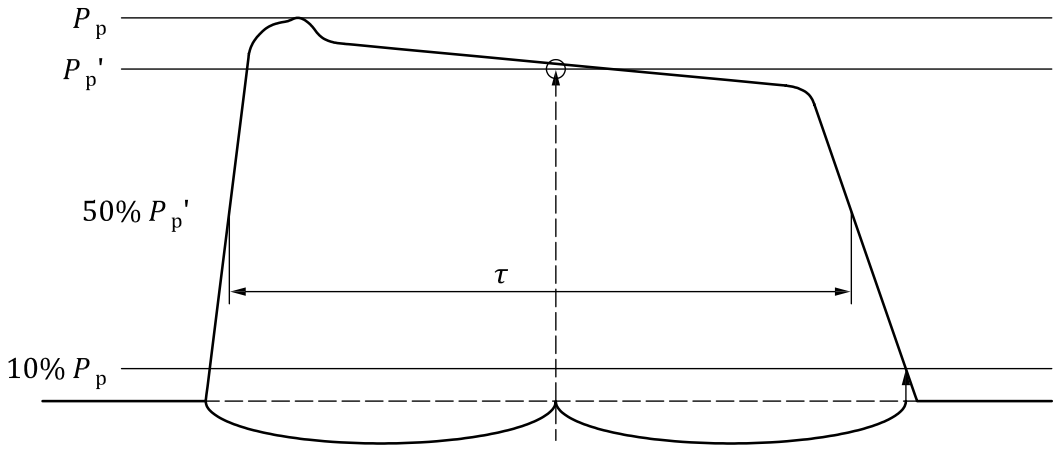


Рисунок А.2. Определение ширины импульса

Таблица А.2. Параметры производительности системы

Компонент	*Параметр измерения*	*Категория параметра*	*Применение*	*Примечания*	*Раздел*
Тип передатчика	Пиковая мощность передачи (P_t)	Чувствительность	Типовой		А.3.3
	Ширина передающего импульса (τ)	Чувствительность	Типовой	Также связано с разрешением диапазона	А.3.2
Антенна	Коэффициент усиления (Gt, Gr)	Чувствительность	Типовой		А.3.4
	Ширина луча ($\theta_{H/V}$)	Чувствительность и пространственное разрешение	Типовой		А.3.4
	Коэффициент перекрестной поляризации (XPD)	Точность измерения двойной поляризации	Типовой	Измеряется вместе с «изоляцией» в категории приемников	А.3.5
Приемник	Минимальный обнаруживаемый сигнал (S_{min})	Чувствительность	Различие для радиолокатора с импульсным сжатием и без импульсного сжатия		А.3.6
	Коэффициент сжатия импульсов	Чувствительность	РЛС со сжатием импульсов		А.3.7
	Разрешение по дальности (РЛС без импульсной компрессии)	Пространственное разрешение	РЛС без сжатия импульсов		А.3.8.2
	Разрешение по дальности (РЛС со сжатием импульсов) Равна ширине принимаемого импульса (τ)	Чувствительность и пространственное разрешение	РЛС со сжатием импульсов		А.3.8.3
	Изоляция H/V	Точность измерения двойной поляризации	Типовой	Связанные с «коэффициентом поперечной поляризации (*XPD*)» в категории антенны	А.3.5

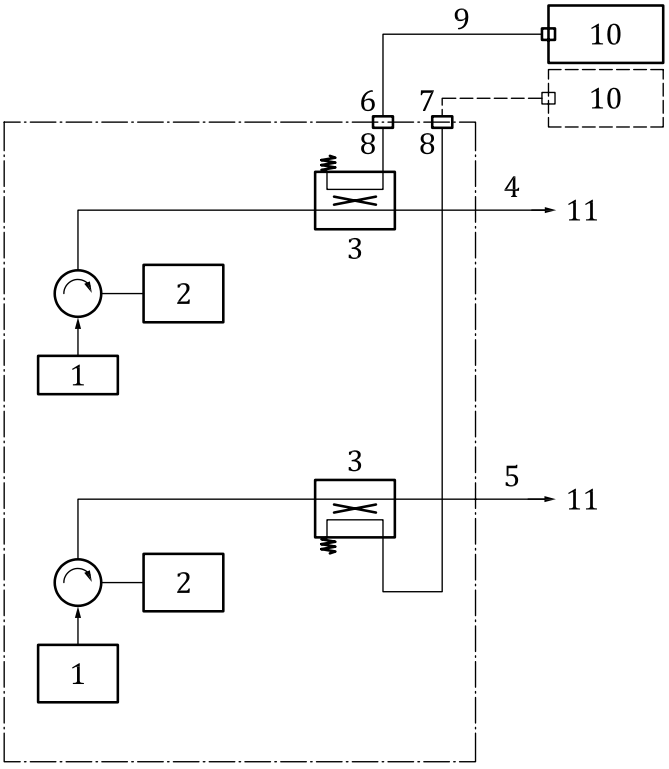
Компонент	*Параметр измерения*	*Категория параметра*	*Применение*	*Примечания*	*Раздел*
Потеря системы	Тракт передачи	Чувствительность	Типовой		A.3.9
	Тракт приема		Типовой		A.3.9
	Согласованные потери фильтра		Различие для радиолокаторов с импульсным сжатием и без импульсного сжатия		A.3.9.4
	Потеря передачи обтекателя		Типовой		A.3.9

A.3.3 ***Пиковая мощность передачи,*** P_t

A.3.3.1 **Схема измерения**

Схемы измерений приведены на рисунках A.3 и A.4.

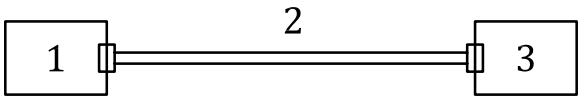
Испытательное оборудование должно быть защищено, так как мощность измеряемого передатчика может быть довольно высокой.



Условные обозначения:

1 Передающее устройство
2 Поглощающая нагрузка
3 Направленный ответвитель
4 Канал вертикальной поляризации (V)
5 Канал горизонтальной поляризации (H)
6 Канал H
7 Канал V
8 Точка контроля выхода передатчика
9 Кабель для измерения
10 Измеритель мощности
11 К опорно-поворотномуустройству

Рисунок A.3. Схема измерения Pt (тип независимого передатчика с двойной поляризацией)



Условные обозначения:

1 SG
2 Кабель для измерения
3 Измеритель мощности

Рисунок A.4. Диаграмма измерения потерь в кабеле

A.3.3.2 **Устройство для измерения**

Устройство для измерения приведено в таблице A.4.

Таблица A.4. Диаграмма измерения потерь в кабеле

№	*Название устройства*	*Примечания*
1	Измеритель мощности	
2	Генератор сигналов	
3	Измерительный кабель	

A.3.3.3 **Метод измерения**

A.3.3.3.1 ***Общая информация***

Передний порт соединителя передатчика должен использоваться для измерения пиковой мощности передачи. Обычно он расположен очень близко за выходом передатчика и является первым ответвителем в волноводе радиолокационной системы. Важно знать коэффициент сцепления муфт. Если возможно, измеритель мощности должен быть напрямую подключен к соединителю передатчика без дополнительного кабеля. Измерения мощности передатчика должны проводиться при всех доступных настройках длительности импульса. Соответствующий f_{PRF} должен быть выбран для того, чтобы получить одинаковый рабочий цикл для каждой настройки длительности импульса.

A.3.3.3.2 ***Измерение потерь в кабеле***

Если измеритель мощности не может быть напрямую подключен к ответвителю передатчика и необходимо добавить кабель, необходимо измерить потери в кабеле и добавить их к измерению пиковой мощности. В противном случае измеритель мощности должен быть подключен непосредственно к ответвителю.

Заранее измерьте потери кабеля L_c, которые будут использоваться для измерения P_t.

Установите частоту SG на частоту передачи f_0 радиолокационного оборудования с достаточным уровнем выходного сигнала P_{SG} (например, 0 дБм). Подключите один конец кабеля к SG, а другой – к измерителю мощности, как показано на рисунке A.4.

Показания измерителя мощности показывают затухание L_c кабеля отрицательными числами.

A.3.3.3.3 ***Измерение Pt***

Быстрые датчики пиковой мощности обычно менее точны с точки зрения абсолютной мощности, чем медленные датчики средней мощности. Датчик пиковой мощности используется для определения грубой пиковой мощности и точной ширины импульса (см. A.3.2). С другой стороны, средняя мощность передачи измеряется измерителем средней мощности. Затем, используя эти значения, определяется пиковая мощность.

Подключите измеритель мощности напрямую или с помощью кабеля к ответвителю передатчика и переведите передатчик в режим передачи. В зависимости от типа передатчика измерьте среднюю мощность, используя методы, показанные на

рисунках А.1–А.4. Определите потери L_t (включая степень связи направленного ответвителя) с выхода передачи на ответвитель передатчика. Если показания измерителя мощности равны P_m' (в дБм), то мощность передачи P_A получается по формуле (А.1):

$$P_A = P_m' + L_t + L_c \quad (A.1)$$

Чтобы преобразовать среднюю мощность P_A в пиковую мощность передачи P_t, используйте рабочий цикл передатчика, который определяется шириной импульса (τ) и частотой следования импульсов (f_{PRF}). f_{PRF} измеряется с помощью схемы, показанной на рисунке А.1 (вместо осциллографа можно использовать счетчик частоты).

Мощность передачи, которая будет использоваться в качестве калибровочного значения, рассчитывается по формуле (А.2):

$$P_t = \frac{P_A}{\tau \cdot f_{PRF}} \quad (A.2)$$

См. подраздел А.3.2 для измерения ширины импульса.

А.3.4 *Коэффициент усиления антенны, ширина луча*

А.3.4.1 Общая информация

Существует три метода точной характеристики антенны, которые существенно различаются: метод дальнего диапазона, метод компактного диапазона и метод измерения ближнего поля. В этом подразделе описывается только метод дальнего диапазона.

А.3.4.2 Схема измерения

Схема измерения приведена на рисунке А.5.

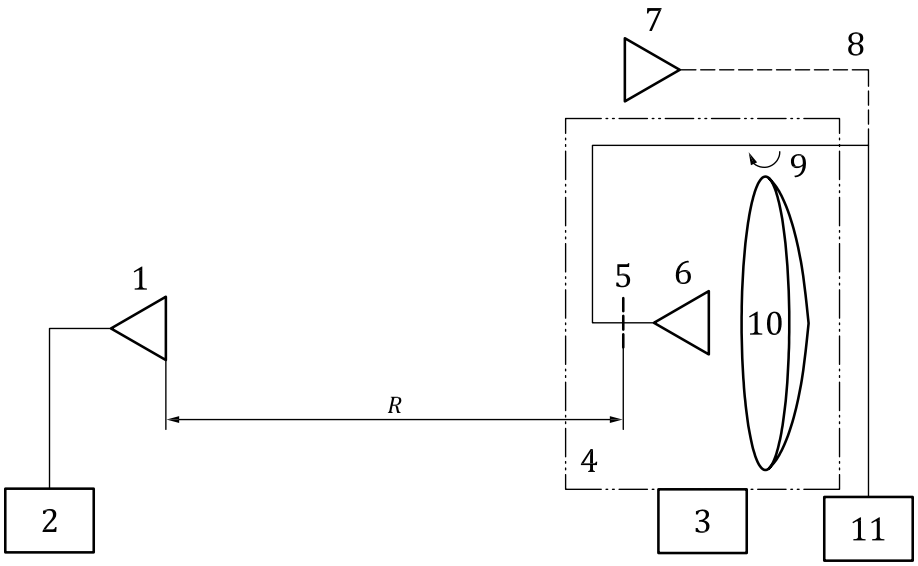
Расстояние R от измеряемой антенны до передающей антенны должно быть в основном дальним полем, а именно $R > 2D^2/\lambda$ (где D – диаметр антенны, а λ – длина волны), но если можно доказать производительность, равную или лучшую, чем в случае дальнего поля, измерение ближнего поля также приемлемо.

А.3.4.3 Устройство для измерения

Устройство для измерения приведено в таблице А.5.

Таблица А.5. Диаграмма измерения потерь в кабеле

№	*Название устройства*	*Примечания*
1	Приемник	
2	Регистратор шаблонов	
3	Стандартная рупорная антенна	
4	Генератор сигналов	
5	Передающая антенна	
6	Смеситель	



Условные обозначения:

1	Передающая антенна	7	Стандартная рупорная антенна
2	SG	8	Заменена антенной для измерения коэффициента усиления
3	Вращающаяся платформа	9	Вращение Az для измерения G0
4	Антенна, подлежащая измерению	10	Отражатель
5	Точка измерения	11	Приемник
6	Рупорный облучатель		

Рисунок A.5. Диаграмма измерения потерь в кабеле

A.3.4.4 Метод измерения

A.3.4.4.1 *Коэффициент усиления антенны*

Принять выходной сигнал SG, излучаемый передающей антенной, установленной на достаточно удаленном расстоянии, как показано на схеме измерений на рисунке A.5, с помощью измеряемой антенны, помещенной на вращающийся стол, и записать уровень принимаемого сигнала в регистратор шаблонов через приемник. Если регистратор диаграммы направленности записывает уровень принимаемого сигнала в масштабе дБ, то результат диаграммы усиления (G_1) измеряемой антенны строится, как показано на рисунке A.6. Затем замените питающий рупор на стандартный рупор и закрепите его в направлении передающей антенны. Таким же образом запишите уровень принимаемого сигнала в регистратор шаблонов.

После этого сравните G_1 и G_s и считайте максимальную разность уровней (разность усиления ΔG) с записи самописца.

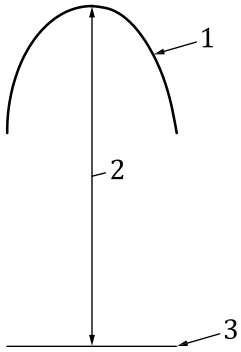
Коэффициент усиления G_s стандартного рупора, который измеряется заранее, добавляется к ΔG для получения коэффициента усиления антенны $G(G_t\, G_r)$.

Этот показатель может быть рассчитан по формуле (A.3) (в дБи):

$$G = \Delta G + G_s \qquad \text{(A.3)}$$

Измерьте значения H и V поляризации в случае двухполяризационного типа. Если указана частота, используемая для измерения, измерьте уровень на указанной частоте. Если указан диапазон частот, измерьте уровень на верхнем/нижнем пределе, а также среднее значение.

Заранее измерьте потери соединительного волновода (компонента антенны) и вычтите их, чтобы получить коэффициент усиления антенны.



Условные обозначения:
1 Диаграмма усиления измеряемой антенны (G_1)
2 Разница усиления ΔG (считывается с регистратора шаблонов)
3 Коэффициент усиления стандартной рупорной антенны G_s (базис)

Рисунок А.6. Пример диаграммы направленности антенны

А.3.4.4.2 *Ширина луча антенны,* $\theta_{\mathrm{H/V}}$

Аналогично коэффициенту усиления антенны, примите выходной сигнал SG, излучаемый передающей антенной, установленной на достаточно удаленном расстоянии, с помощью измеряемой антенны, размещенной на вращающемся столе, и одновременно измерьте выходной сигнал приема в направлении вращения с помощью эталонной антенны.

Считайте значение в точке уменьшения ширины луча на 3 дБ с графика принимаемого усиления, который был записан регистратором (см. рисунок А.7).

А.3.5 *Изоляция с перекрестной поляризацией*

А.3.5.1 Схема измерения

Схемы измерений приведены на рисунках А.7 и А.8.

А.3.5.2 Устройство для измерения

См. подраздел А.3.4.

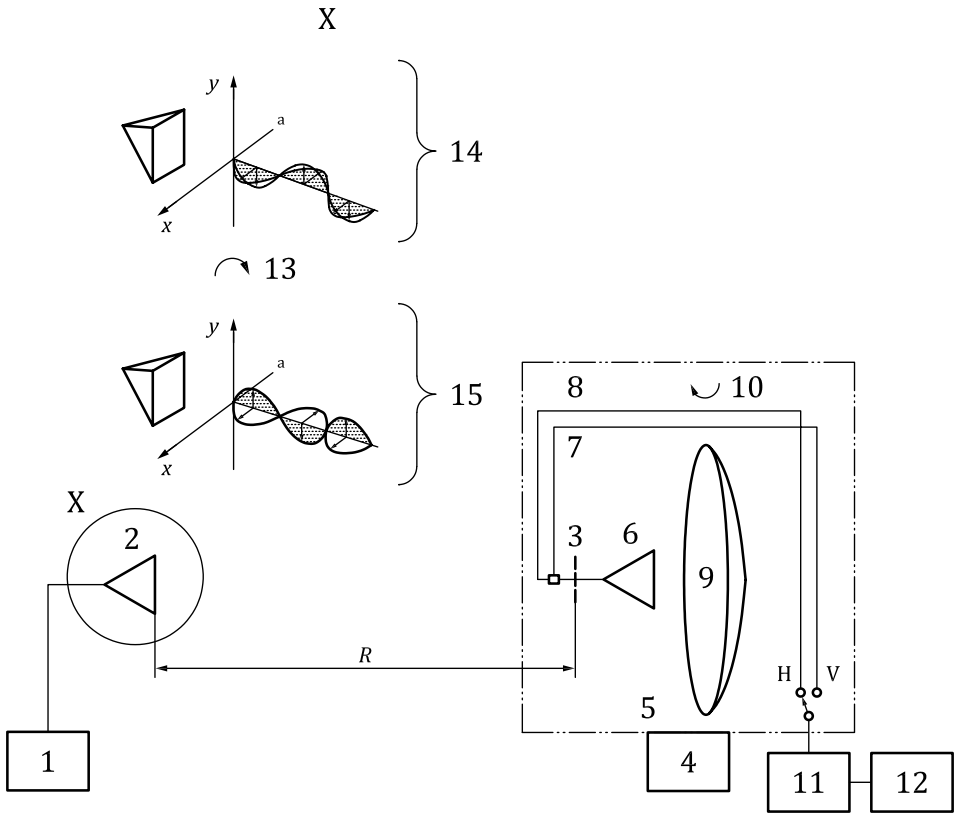
А.3.5.3 Метод измерения

Ссылаясь на пункт 6.2.4, измеряется точность двухполяризационной, кросс-поляризационной изоляции. Изоляция для приемника включена, поскольку плохая изоляция в приемнике ухудшает производительность системы, даже если коэффициент кросс-поляризации антенны высок.

Как показано на рисунке А.8, коэффициент кросс-поляризации на антенне измеряет отношение пикового значения ко-полярного передаваемого сигнала, принимаемого кросс-полярным приемником, к пиковому значению принимаемого ко-полярного сигнала. Коэффициенты кросс-поляризации для H/V поляризации выражаются формулами (А.4) и (А.5):

$$XPD_{\mathrm{h}} = Peak_{\mathrm{cross,h}} - Peak_{\mathrm{co,h}} \quad \text{(А.4)}$$

$$XPD_{\mathrm{v}} = Peak_{\mathrm{cross,v}} - Peak_{\mathrm{co,v}} \quad \text{(А.5)}$$



Условные обозначения:

1 SG
2 Передающая антенна
3 Точка измерения
4 Вращающаяся платформа
5 Антенна, подлежащая измерению
6 Рупорный облучатель
7 V-порт
8 H-порт
9 Отражатель
10 Вращение Az для измерения направленности
11 Приемник
12 Регистратор шаблонов
13 Поворот антенны на 90 градусов
14 Канал горизонтальной поляризации
15 Канал вертикальной поляризации

Рисунок A.7. Диаграмма измерения коэффициента поперечной поляризации антенны

где:

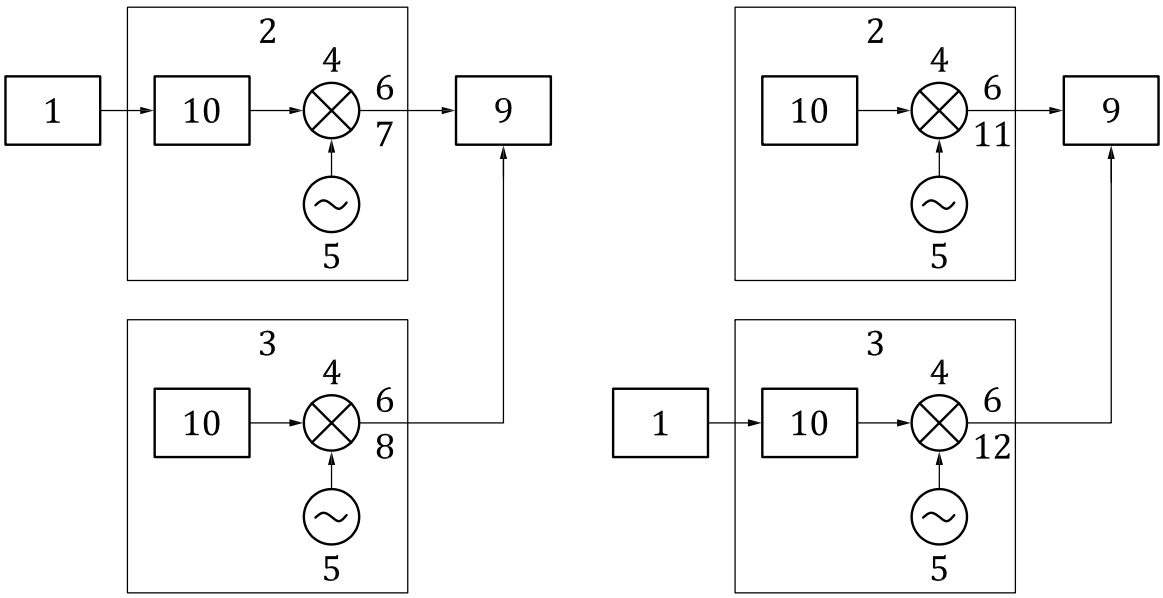
$Peak_{co}$ является пиковым значением ко-полярного сигнала с суффиксом h или v, представляющим волны горизонтальной и вертикальной поляризации;

$Peak_{cross}$ является максимальным значением кросс-полярного сигнала в угловом диапазоне ширины луча 3 дБ, с суффиксом h или v, представляющим волны горизонтальной и вертикальной поляризации.

H-pol: чтобы найти $Peak_{co}$ и $Peak_{cross}$, постройте график распределения ко-полярных и кросс-полярных сигналов в горизонтальной плоскости приемной антенны на листе бумаги (как показано на рисунке A. 9). Затем поверните приемную антенну на 90° и постройте на листе бумаги график распределения ко-полярного и кросс-полярного сигналов в вертикальной плоскости приемной антенны.

V-pol: чтобы изменить направление поляризации с горизонтального на вертикальное, поверните передающую антенну на 90°.

После этого измеряется изоляция на приемнике (см. рисунок A.8). Подключите SG к МШУ (H). Установите частоту SG на центральную частоту f_0, используемую радиолокатором. Запишите уровень сигнала H-порта и V-порта, $IFLV_{h\text{-}h}$ *и* $IFLV_{h\text{-}v}$, соответственно, при f_0 с

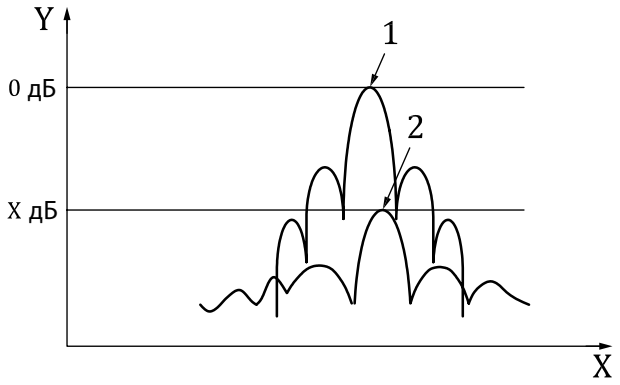


Key:

1	SG	7	IFLVh-h
2	Приемник (H)	8	IFLVh-v
3	Приемник (V)	9	Измеритель мощности
4	Смеситель	10	МШУ
5	OSC	11	IFLVv-h
6	Выходной диапазон ПЧ	12	IFLVv-v

Рисунок А.8. Измерение изоляции H/V

помощью измерителя мощности и возьмите их разность, $IFLV_{\text{diff-h}} = IFLV_{\text{h-v}} - IFLV_{h\text{-}h}$, как уровень изоляции для H-порта. Затем подключите SG к МШУ (V). Установите частоту SG на f_0. Запишите уровень сигнала V-порта и H-порта, $IFLV_{v\text{-}v}$ и $IFLV_{\text{v-h}}$, соответственно, и возьмите их разность, $IFLV_{diff\text{-}v} = IFLV_{v\text{-}h} - IFLV_{\text{h-h}}$, как уровень изоляции для V-порта. Вместо измерителя мощности можно использовать откалиброванный цифровой приемник.



Условные обозначения:

1	$Peak_{\text{co}}$	X	Градус
2	$Peak_{\text{cross}}$	Y	Мощность сигнала

Рисунок А.9. Диаграмма измерения коэффициента поперечной поляризации антенны

Коэффициент кросс-поляризации на антенне и изоляция на приемнике объединяются для выражения H/V изоляции системы через антенну на приемник, как показано в формулах (A.6) и (A.7) (в дБ):

$$XPD_{\text{sys}}(h) = \max\left(XPD_{\text{h}}, LV_{\text{diff-h}}\right) \quad \text{(A.6)}$$

$$XPD_{\text{sys}}(v) = \max\left(XPD_{\text{v}}, LV_{\text{diff-v}}\right) \quad \text{(A.7)}$$

A.3.6 ***Минимальный обнаруживаемый сигнал, Smin***

A.3.6.1 **Теоретическая оценка**

Минимальный обнаруживаемый сигнал, S_{min}, может быть рассчитан по формуле (A.8) (в дБм):

$$S_{\text{min}} = 10\log\left(kTB\right) + NF + 30 \quad \text{(A.8)}$$

где:

k является постоянной Больцмана (1,38 × 10^{-23} Вт/Гц/К);

T является температурой воздуха, в К;

B является полосой пропускания приемника, в Гц;

NF является коэффициентом шума, в дБ;

30 константа для преобразования дБв в дБм.

B и NF измеряются методом, приведенным в подразделе A.3.6.2. Температура T – это физическая температура приемника. Она не должна слишком сильно отклоняться от 290 К, чтобы избежать ошибок измерения – см. например [19].

Теперь можно рассчитать S_{min} для любого заданного ОСШ. Например, для *ОСШ* = 0 дБ, S_{min} равен мощности шума. См. подраздел 6.2.1 для *ОСШ*, который в данном документе является производной чувствительности.

Методы измерения различны для радиолокаторов с импульсным сжатием и без импульсного сжатия.

A.3.6.2 **РЛС без сжатия импульсов**

A.3.6.2.1 ***Измерение полосы пропускания***

A.3.6.2.1.1 *Схема измерения*

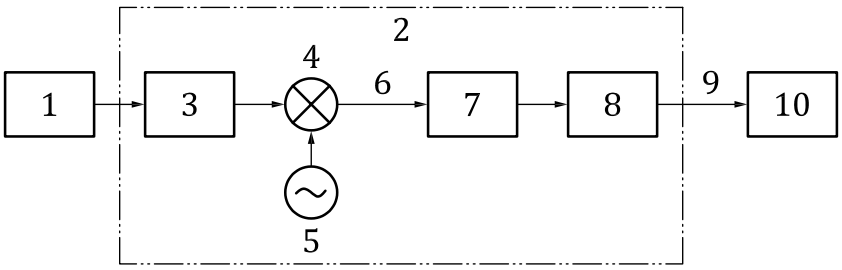
Схема измерения приведена на рисунке A.10.

A.3.6.2.1.2 *Устройство для измерения*

Устройство для измерения приведено в таблице A.6.

Таблица A.6. Устройство измерения полосы пропускания для радиолокатора с неимпульсной компрессией

№	*Название устройства*	*Примечания*
1	Генератор сигналов	Радиочастота



Условные обозначения:

1	SG	6	Выходной диапазон ПЧ
2	Приемник/процессор обработки сигналов	7	АЦ
3	МШУ	8	BPF
4	Смеситель	9	Полученный сигнал
5	OSC	10	ПК

Рисунок А.10. Диаграмма измерения полосы пропускания для радиолокатора без импульсного сжатия

№	*Название устройства*	*Примечания*
2	Персональный компьютер (ПК)	Регистрация и отображение полученной мощности

А.3.6.2.1.3 *Метод измерения*

Установите частоту SG на центральную частоту f_0, используемую радиолокатором, и установите подходящую выходную мощность SG в пределах входного диапазона приемника, затем запишите принятую мощность P_0 с помощью ПК.

Затем запишите частоту f_+ SG, когда принимаемая мощность уменьшается на 3 дБ от P_0 при увеличении частоты SG от f_0. Аналогично, запишите частоту f_- SG, когда принимаемая мощность уменьшается на 3 дБ от P_0 при уменьшении частоты SG от f_0. Таким образом, полоса пропускания B получается по формуле (А.9) (см. также рисунок А.11). Размер шага SG должен быть определен таким образом, чтобы в полученных частотных характеристиках не было существенного разрыва.

$$B = f_+ - f_- \left(\mathrm{Hz}\right) \tag{А.9}$$

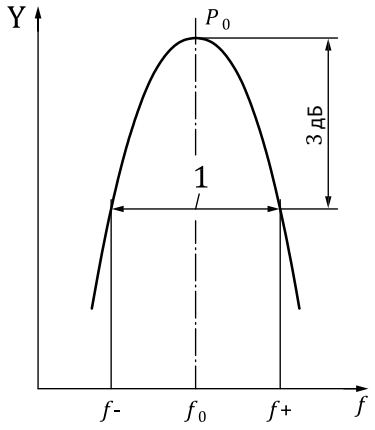
А.3.6.2.2 ***Измерение уровня шума***

Окружающий шум в системе обычно является нижним пределом того, что может обнаружить приемник. Как и в любой другой приемной системе, сигнал конкурирует с избыточным тепловым шумом, генерируемым приемником. Здесь усилители в малошумной передней части особенно являются источником дополнительного шума. Уменьшение шума усилителя приведет к увеличению минимального обнаруживаемого сигнала (S_{min}). Избыточный тепловой шум, возникающий в приемнике, характеризуется параметром под названием «коэффициент шума» (NF). NF – это отношение дополнительного шума приемника к уровню теплового шума, присутствующего на входе приемника. См. формулу (А.10) (в дБ):

$$NF = 10\log\left(\frac{SNR_{\mathrm{in}}}{SNR_{\mathrm{out}}}\right) \tag{А.10}$$

с $SNR = \dfrac{Signal_{\mathrm{level}}}{Noise_{\mathrm{level}}}$, в дБ.

Для определения NF приемника радиолокатора калиброванный источник шума подает сигнал с известным уровнем шума, N_{on}, на переднюю часть приемника.



Условные обозначения:
1 Ширина полосы
Y Мощность

Рисунок A.11. Измерение полосы пропускания (радиолокатор без сжатия импульсов)

Выходная мощность приемника может быть измерена в зависимости от включенного и выключенного источника шума, N_{on} и N_{off}. Эти два значения мощности используются для расчета коэффициента Y. Коэффициент Y – это отношение двух уровней мощности шума в пересчете на линейную мощность, как показано в формуле (A.11):

$$Y = \frac{N_{on}}{N_{off}} \quad \text{(A.11)}$$

NF выражается в дБ. Коэффициент Y и коэффициент избыточного шума (ENR) шумового диода могут быть использованы для расчета NF, как показано в формуле (A.12) (в дБ):

$$NF = ENR - 10\log\left(Y - 1\right) \quad \text{(A.12)}$$

A.3.6.3 **РЛС со сжатием импульсов**

A.3.6.3.1 ***Измерение полосы пропускания***

A.3.6.3.1.1 *Схема измерения*

Схема измерения приведена на рисунке A.12.

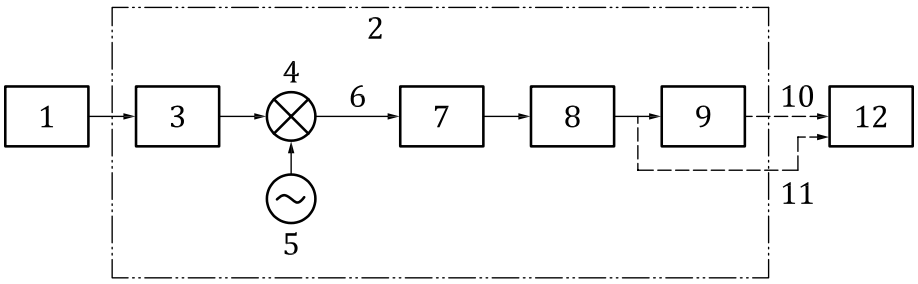
A.3.6.3.1.2 *Устройство для измерения*

См. A.3.6.2.1.2.

A.3.6.3.1.3 *Метод измерения*

Обработка сжатия импульсов функционирует как согласованный фильтр, и ее производительность зависит от частотной характеристики опорной волны, используемой для сжатия импульсов. Частотная характеристика импульсно-компрессионного приемника определяется произведением BPF и опорной волны в частотной области.

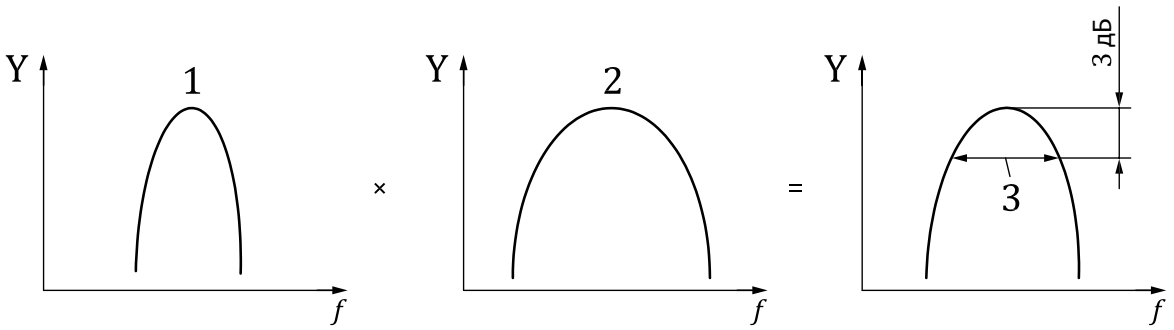
Частотные характеристики BPF могут быть измерены тем же методом, что и для приемника без импульсной компрессии, используя SG в качестве входа и минуя обработку импульсной компрессии, как показано на рисунке A.12. Частотные характеристики опорной волны получают путем БПФ ее временной формы.



Условные обозначения:

1	SG	7	АЦ
2	Приемник/процессор сигналов	8	BPF
3	МШУ	9	Коэффициент сжатия импульсов
4	Смеситель	10	БПФ опорной волны
5	ЦПО	11	Ширина полосы
6	Выходной диапазон ПЧ	12	ПК

Рисунок А.12. Диаграмма измерения полосы пропускания для радиолокатора со сжатием импульсов



Условные обозначения:

1	BPF	3	Полоса пропускания приемника радиолокатора со сжатием импульсов
2	Опорная волна	Y	Мощность

Рисунок А.13. Измерение полосы пропускания приемника радиолокатора со сжатием импульсов

Эти частотные характеристики умножаются в автономном режиме. Полоса пропускания определяется как ширина, измеренная в точке спада на 3 дБ от пика на центральной частоте f_0 (см. рисунок А.13, а также как на рисунке А.11).

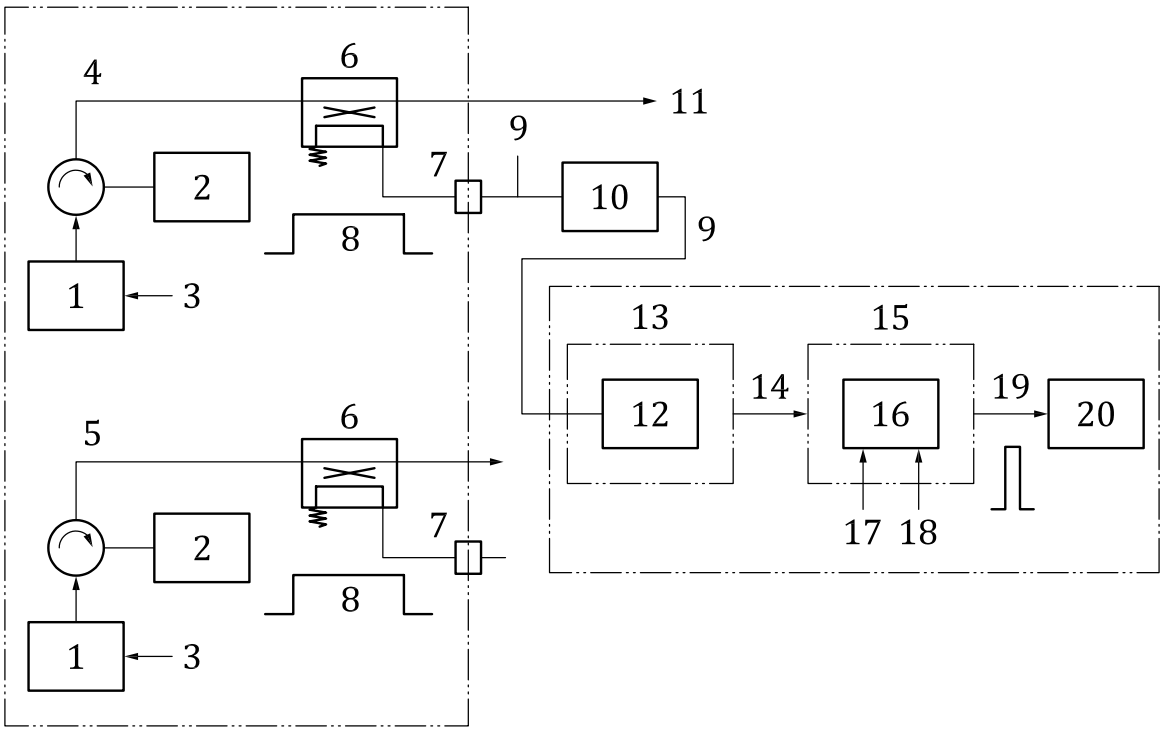
А.3.6.3.2 *Измерение уровня шума*

То же, что и А.3.6.2.2.

А.3.7 ***Коэффициент усиления при сжатии импульсов***

А.3.7.1 **Общая информация**

Это измерение применяется только для радиолокатора с импульсным сжатием.



Условные обозначения:

1 Тип передатчика
2 Поглощающая нагрузка
3 Включение/выключение импульсной модуляции
4 Канал горизонтальной поляризации (H)
5 Канал вертикальной поляризации (V)
6 Направленный ответвитель
7 Контрольная точка для выхода передатчика
8 Импульс передачи
9 Кабель для измерения
10 Аттенюатор высокой мощности
11 К опорно-поворотному устройству
12 МШУ
13 Приемник
14 Выходной диапазон ПЧ
15 Процессор обработки сигналов
16 Коэффициент сжатия импульсов
17 Включение/выключение опорного сигнала
18 Включение/выключение функции окна
19 Полученный сигнал
20 A-Область применения

Рисунок A.14. Схема измерения Gc (тип независимого передатчика с двойной поляризацией)

A.3.7.2 Схема измерения

Схема измерения приведена на рисунке A.14.

A.3.7.3 Устройство для измерения

Устройство для измерения приведено в таблице A.7.

Таблица A.7. Устройство для измерения коэффициента сжатия импульса (Gc)

№	*Название устройства*	*Примечания*
1	Аттенюатор высокой мощности	Для ослабления P_t на входе приемника
2	Измеритель мощности	Измерение потерь в кабеле
3	Генератор сигналов	Измерение потерь в кабеле

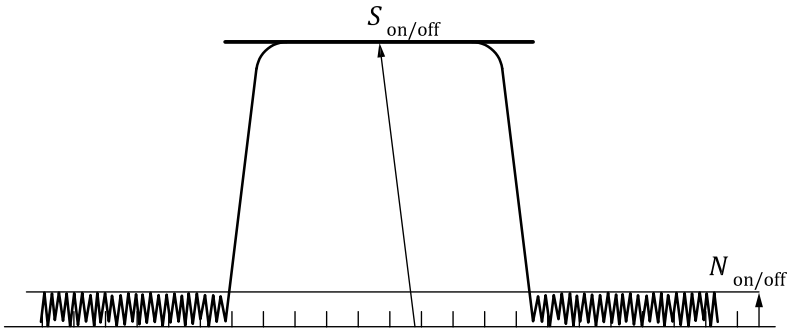


Рисунок А.15. Измерение коэффициента усиления сжатия импульсов

А.3.7.4 Метод измерения

Ослабьте выходной сигнал контроля мощности передачи до тех пор, пока он не окажется в пределах принимаемого динамического диапазона, с помощью аттенюатора и подключите его к МШУ первого каскада приемника. Ширина импульса, частота повторения импульсов и метод модуляции входных сигналов устанавливаются такими же, как и при работе.

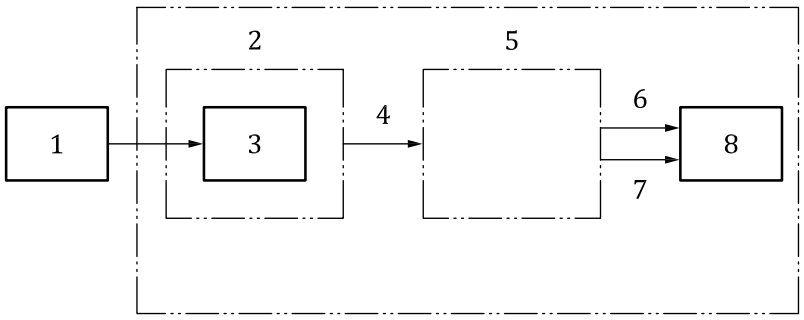
Коэффициент усиления при сжатии импульсов измеряется как разность ОСШ при включении (ON) и выключении (OFF) сжатия импульсов. Измерьте уровень сигнала и шума при выключенном импульсном сжатии как S_{off} и N_{off}, соответственно, и его отношение как SNR_{off}. Аналогично, измерьте уровень сигнала и шума при включенной импульсной компрессии как S_{on} и N_{on}, соответственно, и его отношение как SNR_{on}. Затем *ОСШ* (на англ. яз. *SNR*) выражается как $SNR_{off} = S_{off}/N_{off}$ и $SNR_{on} = S_{on}/N_{on}$, соответственно. Коэффициент сжатия импульсов G_c выражается в дБ. См. формулу (А.13):

$$G_c = 10\log\left(SNR_{on} \,/\, SNR_{off}\right) \qquad \text{(А.13)}$$

В случае измерения с выключенным сжатием импульсов опорный сигнал и оконная функция соответственно выключены для сигнального процессора, как показано в таблице А.8. В случае измерения с включенным сжатием импульсов опорный сигнал и функция окна соответственно включены для сигнального процессора. Потеря функции окна включена в это измерение. Что касается шума, используется значение измерения в состоянии без ввода. См. 6.2.1.5 и А.3.8.3 в отношении расчета чувствительности для импульсно-компрессионного радиолокатора. Схема измерения приведена на рисунке А.15.

Таблица А.8. Настройки для измерения коэффициента усиления при сжатии импульсов

Измерительный элемент	*Настройка*				*Примечания*
	Коэффициент сжатия импульса	*Излучаемая мощность*	*Опорный сигнал*	*Функция окна*	
S_{off}	OFF	ON	OFF	OFF	
N_{off}	OFF	OFF	OFF	OFF	
S_{on}	ON	ON	ON	ON	
N_{on}	ON	OFF	ON	ON	



Условные обозначения:

1	SG	5	Процессор обработки сигналов
2	Приемник	6	Полученный сигнал
3	МШУ	7	Тактовая частота дискретизации
4	Входной диапазон ПЧ	8	Осциллограф

Рисунок A.16. Измерение интервала выборки

A.3.8 ***Разрешающая способность по дальности***

A.3.8.1 **РЛС без сжатия импульсов**

Существует три параметра, связанных с разрешением диапазона, как описано в подразделе 6.2.2.3:

– полуширина передающего импульса;

– интервал дискретизации принимаемого сигнала;

– полоса пропускания приемника.

Разрешение диапазона (как производительность системы) оценивается как максимальное значение разрешения, рассчитанное с учетом этих факторов узкого места.

A.3.8.2 **Ширина половинной мощности передающего импульса**

A.3.8.2.1 ***Общая информация***

То же, что и раздел A.3.2.

A.3.8.2.2 ***Интервал дискретизации принимаемого сигнала***

A.3.8.2.2.1 *Общая информация*

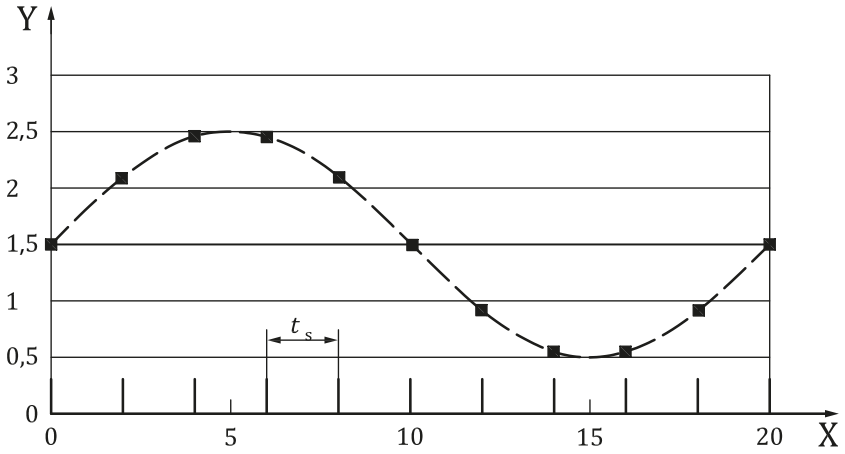
Интервал дискретизации принятого сигнала – это интервал времени обработки t_s на заключительном этапе обработки сигналов.

Используя единицу измерения t_s в качестве микросекунды (мкс), значение в единице длины, L_{si}, рассчитывается по формуле (A. 14):

$$L_{si} = 150 t_s \ (m) \qquad \text{(A.14)}$$

A.3.8.2.2.2 *Схема измерения*

Схема измерения приведена на рисунке A.16.



Условные обозначения:

— — — — Входной сигнал приемника

■ Дискретизированный сигнал

——— Часы выборки

X Время, в мкс

Рисунок А.17. Пример экрана осциллографа

А.3.8.2.2.3 *Метод измерения*

Введите сигнал синусоидальной модуляции АМ с помощью SG в приемник. Проверьте принятый сигнал и тактовую частоту дискретизации выходного сигнала процессора на мониторе осциллографа (с программной эмуляцией) и измерьте интервал дискретизации тактовой частоты дискретизации (см. также рисунок А. 17).

А.3.8.2.3 ***Полоса пропускания приемника***

См. А.3.6.2.

А.3.8.3 **РЛС со сжатием импульсов**

А.3.8.3.1 ***Схема измерения***

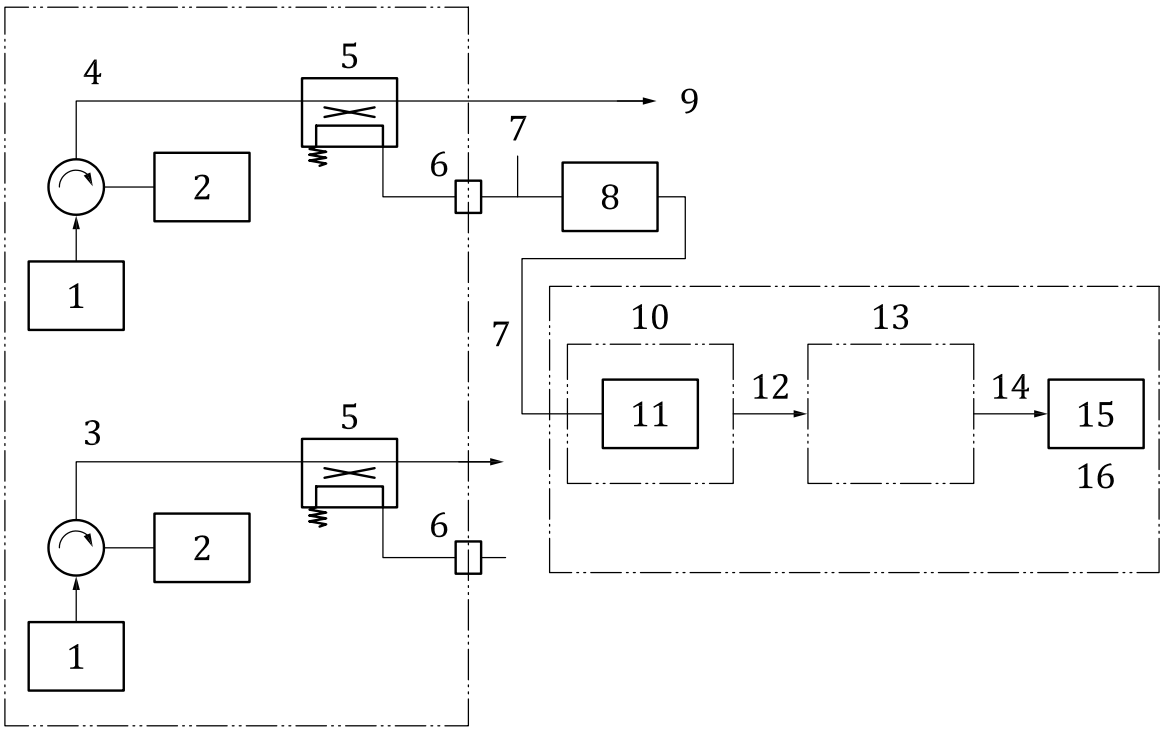
Схема измерения приведена на рисунке А.18.

А.3.8.3.2 ***Устройство для измерения***

Устройство для измерения приведено в таблице А.9.

Таблица А.9. Устройство для измерения длительности импульса после сжатия импульса

№	*Название устройства*	*Примечания*
1	Аттенюатор высокой мощности	Более 80 дБ
2	А-Область применения	Компонент системы



Условные обозначения:

1	Тип передатчика	9	К опорно-поворотному устройству
2	Поглощающая нагрузка	10	Приемник
3	Канал вертикальной поляризации (V)	11	МШУ
4	Канал горизонтальной поляризации (H)	12	Выходной диапазон ПЧ
5	Направленный ответвитель	13	Процессор обработки сигналов
6	Контрольная точка для выхода передатчика	14	Полученный сигнал
7	Кабель для измерения	15	A-Область применения
8	Аттенюатор высокой мощности	16	Измерение ширины импульса

Рисунок A.18. Схема измерения длительности импульса после сжатия импульса (тип независимого передатчика с двойной поляризацией)

A.3.8.3.3 ***Метод измерения***

Для радиолокатора со сжатием импульсов измерьте ширину принятого импульса после обработки сжатия импульсов, в то время как переданный импульс возвращается в приемник.

Как и на рисунке A.18, подключите мощный аттенюатор к точке контроля мощности передачи с помощью измерительного кабеля, а его выход подключите к МШУ первого каскада приемника. Выбирается аттенюатор высокой мощности, который может ослабить мощность передачи до уровня, находящегося в пределах динамического диапазона приемника. Передатчик установлен в режим непрерывной передачи длинных импульсов.

См. подраздел 6.2.2.3 для определения разрешения диапазона. Пример расчета ширины принимаемого импульса и график формы принимаемого импульса показаны на рисунке A.19. Расчетная таблица приведена в таблице A.10.

Это значение также используется для чувствительности, где добавляется усиление сжатия импульса. Прочитайте подраздел 6.2.1.5 и раздел A.3.7, чтобы рассчитать чувствительность для импульсно-компрессионного радиолокатора.

Таблица А.10. Таблица расчета ширины принимаемого импульса

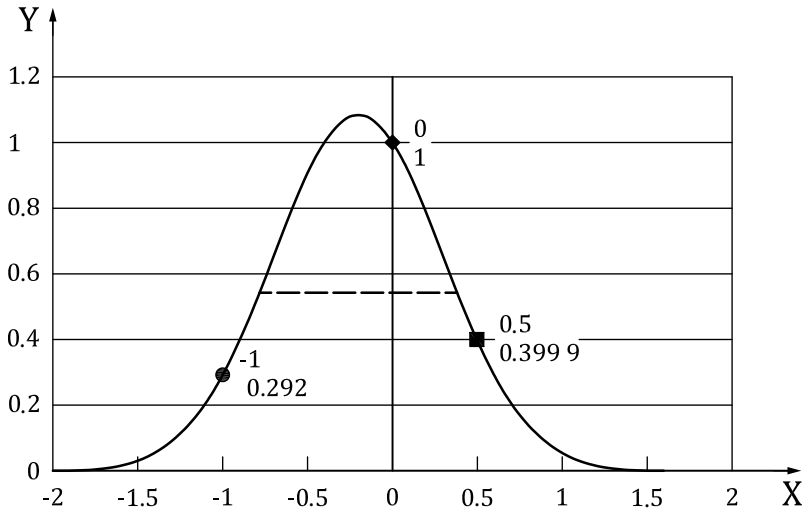
Измеренные данные (входные данные)	*Время мкс*	*Нормированная мощность*
	x_1	y_1
	–1	0,292 0
	x_2	y_2
	0	1,000 0
	x_3	y_3
	0,5	0,399 9
μ (см. формулу 7.А.28)		–0,198 7
σ^2 (см. формулу 7.А.29)		0,244 8
A (см. формулу 7.А.30)		1,084 0
τ (μs) (см. формулу 7.А.31)		1,16

А.3.9 ***Потеря системы, F***

А.3.9.1 **Общая информация**

Элементы потери системы F включают:

– потери в системе передачи: F_{tx} (в дБ);



Условные обозначения:

——————— Расчетная форма волны
— — — Ширина импульса
● Измеренное значение 1
◆ Измеренное значение 2
■ Измеренное значение 3
x Время, в мкс
y Нормированная мощность

Рисунок А.19. Форма и ширина принимаемого импульса, рассчитанные с учетом измеренных значений

– потери в системе приема: F_{rx} (в дБ);

– потери согласованного фильтра: F_{mf} (в дБ);

– потери при передаче обтекателя: F_{rd} (в дБ).

Потери системы F выражаются формулой (A.15) (в дБ):

$$F = F_{tx} + F_{rx} + F_{mf} + 2F_{rd} \quad \text{(A.15)}$$

Поскольку обтекатель подвержен потерям как при передаче, так и при приеме, это умножается на два.

A.3.9.2 **Измерение потерь на передачу радиоволн**

A.3.9.2.1 ***Общая информация***

В то время как затухание материала обтекателя является довольно постоянным во времени, тонкие слои воды, снега или льда могут вызвать очень значительное, но временное увеличение затухания обтекателя, которое также известно как «затухание влажного обтекателя». До настоящего времени не было оперативных и широко используемых методов коррекции затухания влажного обтекателя из-за его временного и пространственного характера. Обычно смачивание происходит неравномерно, что приводит к неоднородному покрытию гидрометеоров на поверхности обтекателя. Ослабление материала обтекателя («сухое ослабление обтекателя») определяется производителем обтекателя путем тестирования отдельных панелей обтекателя.

A.3.9.2.2 ***Схема измерения***

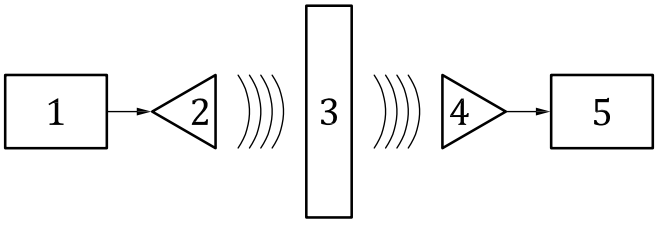
Схемы измерений приведены на рисунках A.20 и A.21.

A.3.9.2.3 ***Устройство для измерения***

См. раздел A.3.4. (Плюс образец для испытания обтекателя)

A.3.9.2.4 ***Метод измерения***

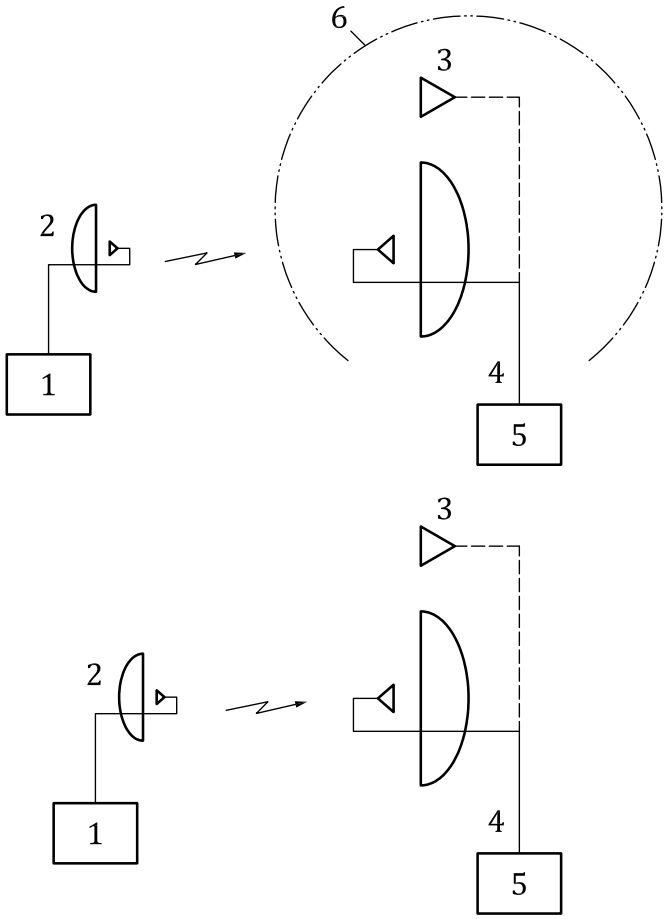
Потери в обтекателе могут быть измерены двумя методами. Первый – это использование достаточно большого испытательного образца обтекателя на испытательном полигоне. Второй выполняется с полностью собранным обтекателем.



Условные обозначения:

1	SG	4	Приемная антенна
2	Передающая антенна	5	Измеритель мощности
3	Панель обтекателя		

Рисунок A.20. Схема измерения потерь на пропускание обтекателя на испытательном полигоне



Условные обозначения:

1	SG	4	Антенна, подлежащая измерению
2	Передающая антенна	5	Приемник (регистратор шаблонов)
3	Стандартная рупорная антенна	6	Обтекатель антенны радиолокатора

Рисунок А.21. Схема измерения потерь на пропускание радиолокационной станции

Как показано на рисунке А.20, для первого способа панель обтекателя устанавливается между двумя антеннами с SG с одной стороны и измерителем мощности с другой стороны. Расстояние между двумя антеннами должно быть равным расстоянию до дальнего поля большей антенны. Первое измерение выполняется без панели обтекателя, а второе – с настройкой панели обтекателя в диапазоне измерений. Разница между полученной мощностью равна потере обтекателя.

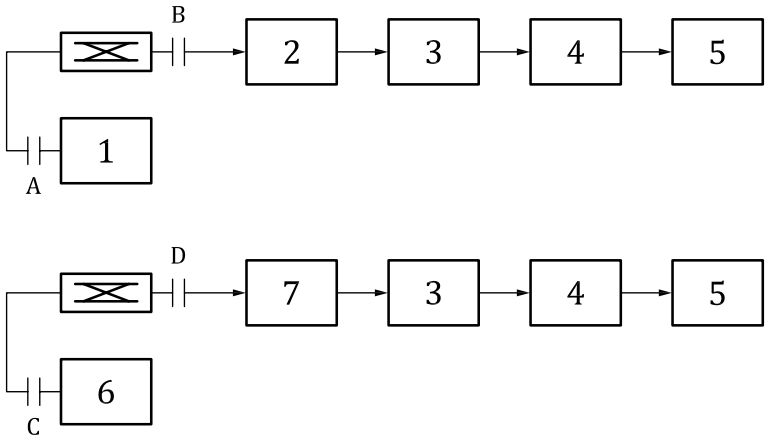
Второй метод (с обтекателем и без него) показан на рисунке А.21. Измерения проводятся при сухом состоянии обтекателя.

Примечание: Измерение потерь во влажном состоянии с использованием сверхводоотталкивающего материала остается задачей будущего.

Если коэффициент усиления (в дБ) с обтекателем или панелью обтекателя равен G, а коэффициент усиления (в дБ) без обтекателя или панели обтекателя равен G_0, потери мощности передачи F_{rd} обтекателя получены по формуле (А.16) (в дБ):

$$F_{rd} = G_0 - G \qquad \text{(А.16)}$$

Поскольку эти потери возникают как при передаче, так и при приеме, значение, умноженное на два, применяется к системным потерям.



Условные обозначения:

1 Передатчик (H)
2 МШУ (канал H)
3 Преобразование частоты
4 Процессор обработки сигналов
5 ПК
6 Передатчик (V)
7 МШУ (канал V)
A – B Обратный путь передачи для приема (H pol.)
C – D Обратный путь передачи для приема (V pol.)

Рисунок A.22. Схема измерения потерь передающего и приемного трактов в случае независимого передатчика с двойной поляризацией

A.3.9.3 Измерение потерь в каналах передачи и приема

A.3.9.3.1 *Общая информация*

Потери, связанные с путями передачи и приема, зависят от фактических условий установки. Значение становится известно после определения точной компоновки оборудования на объекте. Тем не менее, описанный здесь стандартный метод измерения обеспечивает оценку потерь, которая объективно сопоставима между радиолокационными системами разных производителей.

A.3.9.3.2 *Схема измерения*

Доступны три измерительные диаграммы в соответствии с различными конфигурациями, как описано на рисунках 2–5.

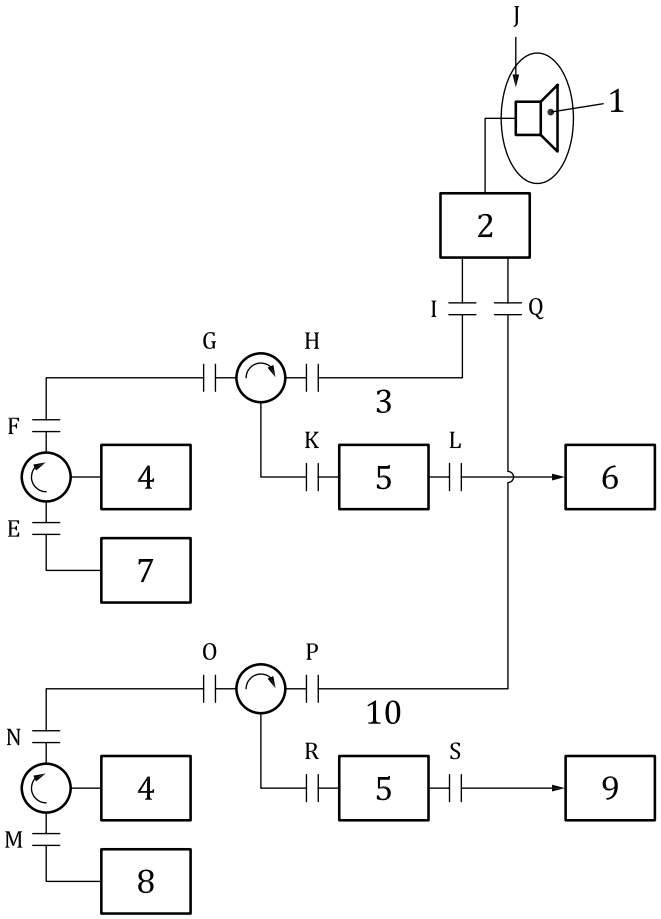
Случай двухполяризационных независимых типов передатчиков приведен на рисунках A.22 и A.23.

A.3.9.3.3 *Устройство для измерения*

Устройство для измерения приведено в таблице A.11.

Таблица A.11. Устройство для измерения потерь тракта передачи и тракта приема

№	*Название устройства*	*Примечания*
1	Генератор сигналов	
2	Измеритель мощности	



Условные обозначения:

1 Отражатель (рупор)
2 Опорно-поворотное устройство антенны
3 Горизонтальная поляризация (канал H)
4 Поглощающая нагрузка
5 Ограничитель TR
6 МШУ (канал H)
7 Передатчик (H)
8 Передатчик (V)
9 МШУ (канал V)
10 Вертикальная поляризация (канал V)

E – F, G – H, I – J тракт передачи (H pol.)
M – N, O – P, Q – J тракт передачи (V pol.)
J – I, H – K, K – L тракт приема (H pol.)
J – Q, P – R, R – S тракт приема (V pol.)

Рисунок A.23. Схема измерения потерь передающей/приемной системы типа независимого передатчика с двойной поляризацией

A.3.9.3.4 ***Метод измерения***

Измерение делится на несколько частей, а измеренные значения суммируются вместе. Во–первых, для передатчика для приема обратных трактов (H/V pol.): A – B и C – D, где передатчик напрямую подключен к приемнику через направленный ответвитель (DC), измеряются потери связи постоянного тока и потери кабеля. Измерение потерь в кабелях аналогично методу, показанному на рисунке A.4.

Затем для тракта передачи значения потерь каждого циркулятора в каналах H/V измеряются независимо. (Подключите SG на одном конце и измеритель мощности на другом конце в каждой секции точек измерения, обозначенных буквами на рисунке A.23.) Кроме того, для тракта приема значения потерь каждого ограничителя TR в каналах H/V измеряются независимо.

Для секций I – J, Q – J, где потери, связанные с антенной, возникают в результате поворотных соединений и OMT, закройте отверстие рупора стальной пластиной. Полностью отразите радиоволну на рупоре и измерьте потери между I и J для канала H и Q и J для канала V, соответственно, и разделите значение на два.

Длина волновода должна иметь общее значение, используемое для расчета. В данном документе 10 м – это чистая длина всего волновода, соединяющего все части оборудования, в предположении, что радиолокационное оборудование будет установлено прямо под антенной. Затем потери в волноводе для 10 м оцениваются по спецификации используемой модели волновода.

Однако, когда расстояние между дном антенны и приемо-передающим устройством находится в пределах 3 м (например, для типа приемника, установленного на антенне), и это соотношение справедливо для оборудования независимо от условий расположения радиолокатора, таких как здание или башня, можно использовать значение потерь, измеренное в предыдущих установках.

A.3.9.4 **Измерение потерь согласованного фильтра**

A.3.9.4.1 ***Общие сведения***

Потери согласованного фильтра, F_{mf}, определяются по формуле (A.17):

$$F_{mf} = E_{RX,on} / E_{RX,off} \quad \text{(A.17)}$$

где:

$E_{RX,on}$ энергия принятого сигнала после согласованного фильтра;

$E_{RX,off}$ энергия принятого сигнала без согласованного фильтра.

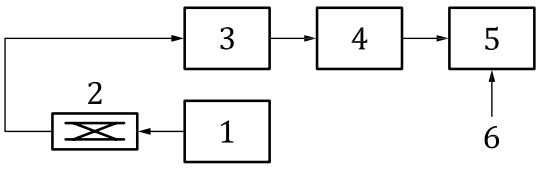
Примечание: при сжатии импульса потери согласованного фильтра включаются в коэффициент усиления при сжатии импульса.

A.3.9.4.2 ***Схема измерения***

Схема измерения приведена на рисунке A.24.

A.3.9.4.3 ***Метод измерения***

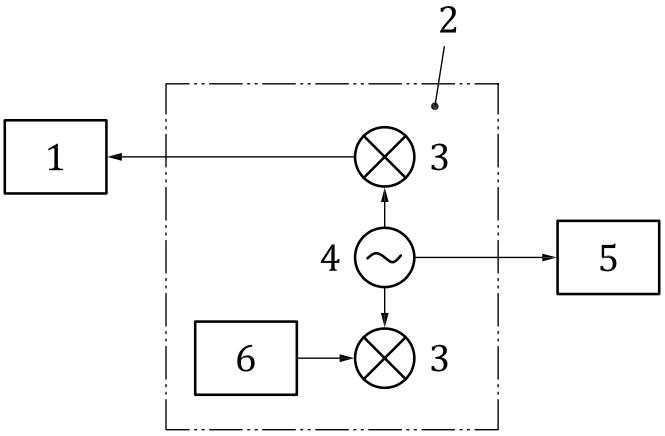
Образец сигнала передатчика, взятый через ответвитель, вводится в ограничитель TR. Если мощность превышает максимальный входной уровень приемника, необходимо добавить аттенюаторы МШУ. Энергия сигнала измеряется специальным алгоритмом, расположенным в процессоре обработке сигна. $E_{RX,off}$ измеряется с помощью



Условные обозначения:

1	Тип передатчика	4	Приемник
2	Ответвитель	5	Процессор обработки сигналов
3	Ограничитель TR	6	Управление согласованным фильтром

Рисунок A.24. Схема измерения потерь согласованного фильтра



Условные обозначения:

1	Тип передатчика	4	STALO
2	Приемник	5	Сетевой анализатор
3	Смеситель	6	МШУ

Рисунок А.25. Схема измерения фазовой устойчивости

согласованного фильтра всех частот и деактивированного сжатия импульсов (в случае радиолокатора с импульсным сжатием). $E_{\mathrm{RX,on}}$ измеряется с фильтром, согласованным с импульсом передатчика (включая сжатие импульсов в случае РЛС со сжатием импульса) и с активизированным сжатием импульсов (в случае РЛС со сжатием импульса).

А.3.10 *Фазовая стабильность*

А.3.10.1 Общие аспекты

Описаны два альтернативных метода. Один из них применим только для клистронных и твердотельных радиолокаторов. Второй также может быть использован для магнетронных радиолокаторов.

А.3.10.2 Измерения для клистронных и твердотельных радиолокаторов

А.3.10.2.1 *Схема измерения*

Схема измерения приведена на рисунке А.25.

А.3.10.2.2 *Устройство для измерения*

Устройство для измерения приведено в таблице А.12.

Таблица А.12. Устройство для измерения фазовой устойчивости

№	*Название устройства*	*Примечания*
1	Сетевой анализатор	

A.3.10.2.3 ***Метод измерения***

Подключите сетевой анализатор к порту мониторинга STALO, как показано на рисунке A.25. Настройте анализатор на несущую частоту. Затем измерьте спектральную плотность мощности на смещениях от несущей.

Как показано на рисунке A.26., когда измеренные значения (в дБн/Гц) получены для каждой логарифмической шкалы, а именно как 100 Гц, 1 кГц, 10 кГц и 1 МГц, рассчитайте значения для частот смещения между ними с помощью логарифмической линейной интерполяции. Вычислите интегральное значение $\int_a^b L(f)\,df$, между a = 100 Гц и b = 1 МГц в виде антилогарифма.

Затем S/N (отношение сигнал/шум) из-за фазового шума этого интервала интегрирования вычисляется по формуле (A. 18):

$$S\ /\ N = -10\log\left[2\int_a^b L(f)\,df\right] \qquad \text{(A.18)}$$

где 2 – коэффициент двойной боковой полосы.

Наконец, переведите это значение в стабильность фазы, θ_{ps}, в градусах, по формуле (A.19):

$$\theta_{\text{ps}} = \frac{180}{\pi}\left(10^{-\frac{S/N}{10}}\right)^{0.5} \qquad \text{(A.19)}$$

Если сетевой анализатор имеет функцию интегрального расчета в пределах заданного пользователем периода, эта функция может быть использована для прямого расчета.

A.3.10.3 **Измерения для магнетронных, клистронных и твердотельных радаров**

A.3.10.3.1 ***Схема измерения***

Схема измерения приведена на рисунке A.27. Она применяется для магнетронных радиолокаторов, но также применима для клистронных и твердотельных радиолокаторов.

A.3.10.3.2 ***Устройство для измерения***

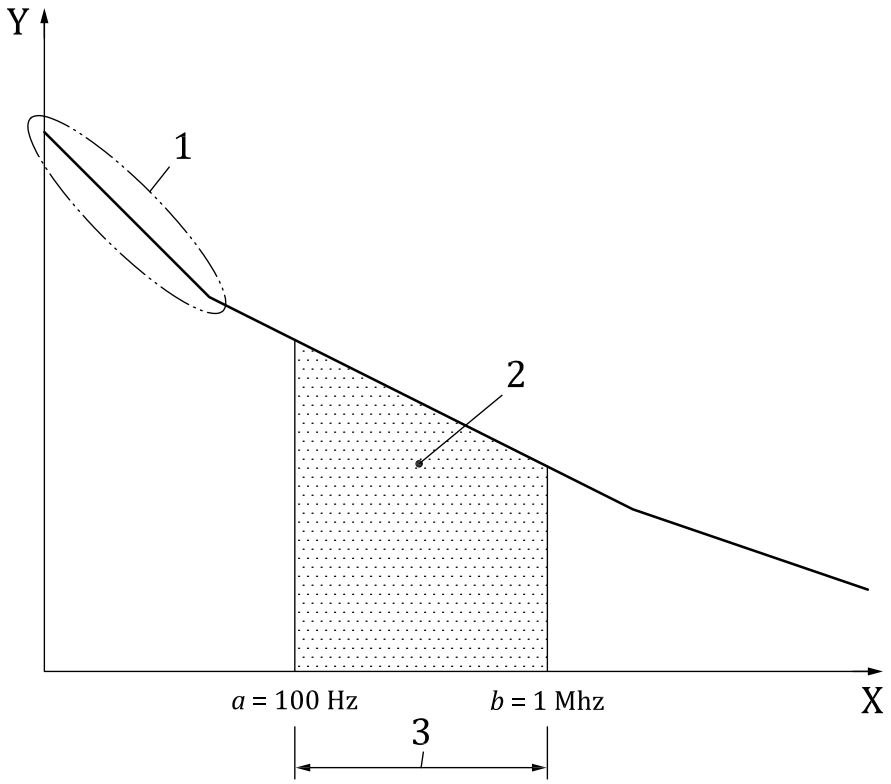
Устройство для измерения приведено в таблице A.13.

Таблица A.13. Измерительное устройство двухполюсной радиолокационной системы

№	*Название устройства*	*Примечания*
1	Оптическая линия задержки, включающая волоконно-оптическую катушку	Волоконно-оптическое волокно длиной не менее 6 км должно применяться

A.3.10.3.3 ***Метод измерения***

Волоконно–оптическая линия задержки будет вставлена между передним портом системного волноводного ответвителя и входом малошумящего переднего конца. Системный волноводный ответвитель обычно расположен непосредственно за циркулятором. При необходимости на входе или выходе линии задержки необходимо установить дополнительные аттенюаторы. Общая схема двухполюсной радиолокационной



Условные обозначения:

1	Логарифмическая линейная интерполяция	X	Частота смещения, в Гц, логарифмическая шкала
2	Фазовая стабильность в пределах от 100 Гц до 1 МГц	Y	Фазовый шум, в дБн/Гц, как $L(f)$
3	Интервал интеграции		

Рисунок А.26. Метод расчета фазовой стабильности

системы приведена на рисунке А.26. Твердотельные или однополяризационные радиолокационные системы могут иметь различную конфигурацию, но общие соединения обычно одинаковы.

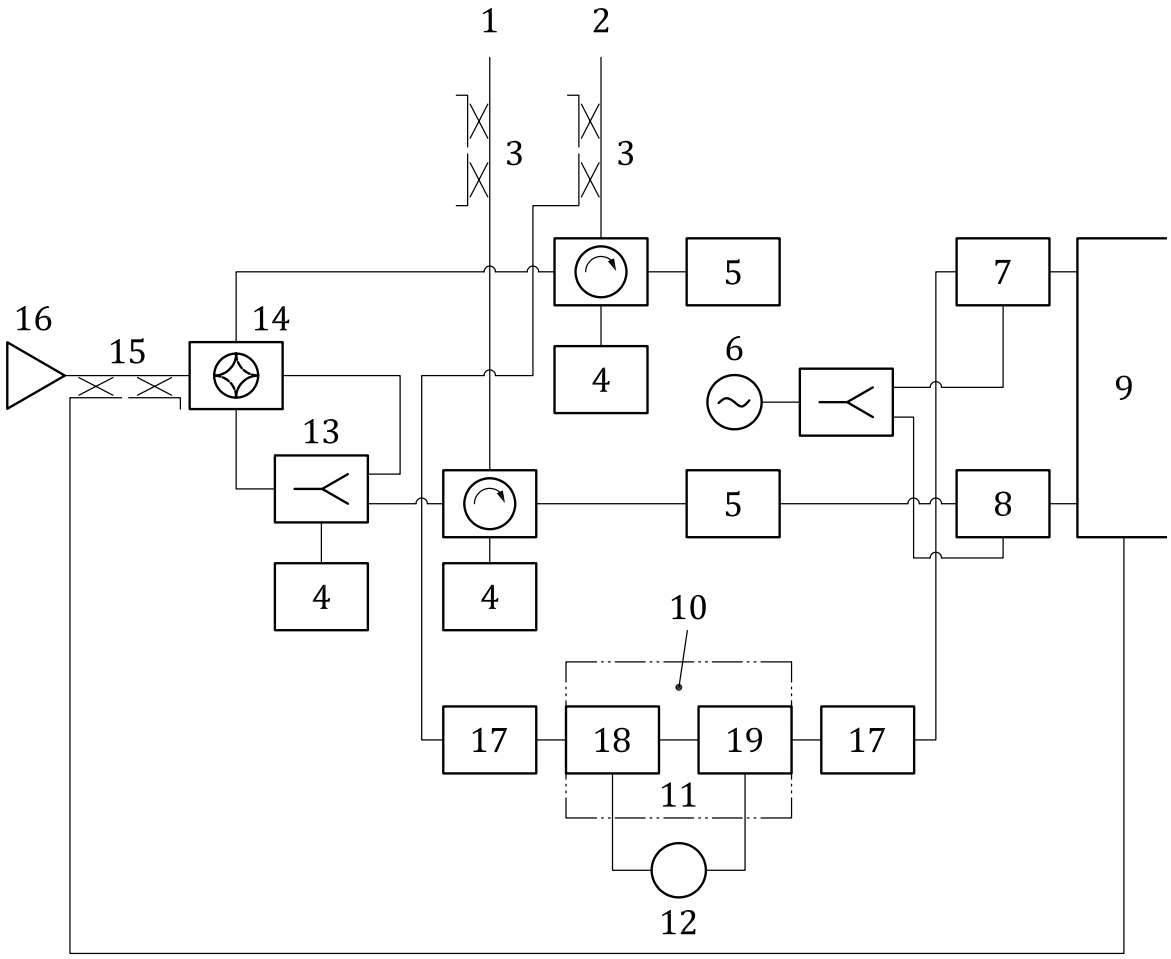
Соотношение FR между механической длиной волокна l и радиолокационным индикатором дальности r задается формулой (А.20):

$$FR = \frac{l}{r} = \frac{2}{n} = \frac{2}{1.467} = 1.363 \qquad \text{(А.20)}$$

где n – групповой показатель преломления (групповая задержка) используемой волоконно-оптической линии.

Использование волоконно–оптической катушки с механической длиной 6,12 км и $n = 1{,}467$ приведет к тому, что в данном примере эквивалентное расстояние до радиолокатора составит 4,5 км. В зависимости от длины волоконно–оптической линии расстояние до радиолокатора может быть еще больше увеличено.

Расчет фазовой стабильности выполняется блоком обработки сигналов и отображается встроенными программными средствами, используемыми для управления радиолокатором.



Условные обозначения:

1 Вертикальный
2 Горизонтальный
3 Ответвитель
4 Абсорбер
5 Ограничитель TR
6 STALO
7 Малошумный фронтальный + понижающий преобразователь сигналов (горизонтальный)
8 Малошумный фронтальный + понижающий преобразователь сигналов (вертикальный)
9 Процессор обработки сигналов
10 Волоконно-оптическая линия задержки
11 Оптический интерфейс
12 Волоконно-оптическая катушка
13 Разделитель
14 Радиочастотный переключатель
15 Передающий ответвитель
16 Тип передатчика
17 Аттенюатор
18 РЧ вход
19 РЧ выход

Рисунок A.27. Блок-схема измерений двухполюсной радиолокационной системы

A.4 Другие ключевые параметры

A.4.1 *Общая информация*

Другие ключевые параметры, показанные в таблице 3, упорядочены в таблице A.14 по компонентам радиолокатора и с использованием метода сжатия импульсов или без него.

Таблица A.14. Измерительные приборы

Компонент	*Параметр измерения*	*Применение*	*Примечания*	*Источник*
Передатчик	Нежелательные излучения	Типовой		A.4.2
Антенна	Уровень боковых долей	Типовой		A.4.3, A.3.4
	Соосность направления луча	Типовой		A.4.4, A.3.4
	Согласование ширины луча	Типовой		A.4.5, A.3.4
	Максимальная скорость вращения	Типовой		A.4.6
	Ускорение	Типовой		A.4.7
	Точность ориентации антенны	Типовой		A.4.8
Приемник	Динамический диапазон	Типовой		A.4.9
	Боковой лепесток диапазона	РЛС со сжатием импульса		A.4.10

A.4.2 ***Нежелательные излучения***

A.4.2.1 **Схема измерения**

Схема измерения приведена на рисунке A.28.

A.4.2.2 **Устройство для измерения**

Устройство для измерения приведено в таблице A.15.

Таблица A.15. Устройство для измерения нежелательных излучений

№	*Название устройства*	*Примечания*
1	Генератор сигналов	
2	Спектроанализатор	

A.4.2.3 **Метод измерения**

Подключите SG к входу МШУ и анализатор спектра к точке контроля мощности передачи и измерьте спектр передаваемой частоты. Нежелательные излучения измеряются как затухание от центральной частоты f_0, на расстоянии $\pm A$ МГц. Измерения должны проводиться для обеих H/V поляризаций. Для импульсно-компрессионного

радиолокатора необходимо измерять излучение как для длинного, так и для короткого импульса. Необходимо убедиться, что и на частотах, значительно больших или меньших, чем рабочая частота, уровень излучения поддерживается ниже указанного значения *B* дБ.

Альтернативные методы можно найти, например, в документе ITU-R M.1177-4.

A.4.3 ***Боковой лепесток антенны***

A.4.3.1 **Схема измерения**

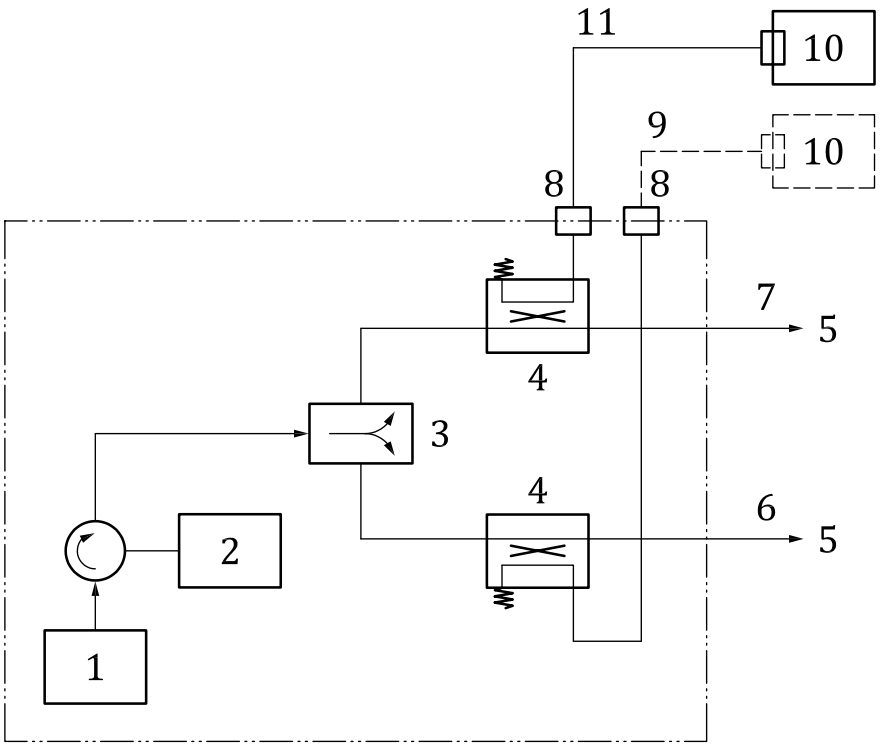
См. раздел A.3.4.

A.4.3.2 **Измерительный прибор**

См. раздел A.3.4.

A.4.3.3 **Метод измерения**

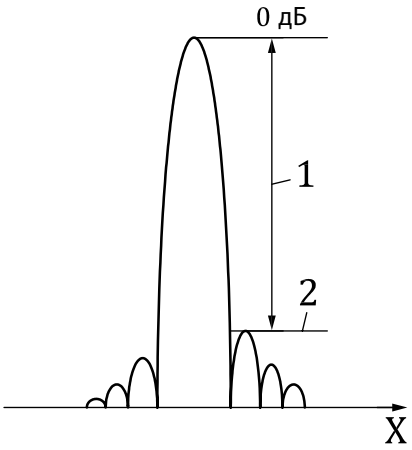
Поскольку боковой лепесток антенны обеспечивает смешивание отраженных волн с направлений, отличных от целевого объема пространственной выборки, требуется



Условные обозначения:

1 Передающее устройство
2 Поглощающая нагрузка
3 Разветвитель мощности на 3 дБ
4 Направленный ответвитель
5 К опорно-поворотному устройству антенны
6 Канал вертикальной поляризации (V)
7 Канал горизонтальной поляризации (H)
8 Точка контроля мощности передачи
9 Кабель для измерения
10 Спектроанализатор
11 Кабель для измерения

Рисунок A.28. Схема измерения нежелательных излучений



Условные обозначения:
1 Уровень боковых лепестков $\Delta V_{ра}$
2 Первая доля бокового лепестка
X Горизонтальный/вертикальный угол

Рисунок А.29. Измерение уровня боковых лепестков антенны

определение и измерение уровня бокового лепестка. Измерение выполняется с первым боковым лепестком, оценивая разницу его пикового уровня и пикового уровня основного лепестка. Измерение выполняется под достаточно широкими углами, где появляется первый боковой лепесток, как для горизонтальной, так и для вертикальной плоскостей. См. рисунок А.29.

Предполагается, что классическая диаграмма направленности антенны имеет осевую симметрию относительно оси главного луча. Дешевый способ оценить эту гипотезу, по крайней мере частично, состоит в том, чтобы переместить антенну на 180° в EL (большинство современных антенн могут это сделать) и сравнить, являются ли радиолокационные эхосигналы в метеорологической радиолокационной станции более или менее интенсивными после перемещения.

А.4.4 ***Соосность направления луча***

А.4.4.1 **Схема измерения**

См. раздел А.3.4.

А.4.4.2 **Измерительный прибор**

См. раздел А.3.4.

А.4.4.3 **Метод измерения**

Для определения соосности направления луча (BDA) можно использовать диаграммы направленности ко-полярных антенн, как описано в разделе А.3.4. Оцените угол AZ ко-полярного пика горизонтального канала ($Peak_h$). Обычно каждый пик немного отклоняется от 0° AZ. Сделайте то же самое для вертикального канала ($Peak_v$). Тогда соосность направления луча определяется по формуле (А.21) (в градусах):

$$BDA = Peak_{\square} - Peak_v \qquad \text{(А.21)}$$

A.4.5. ***Согласование ширины луча***

A.4.5.1 **Схема измерения**

См. раздел A.3.4.

A.4.5.2 **Измерительный прибор**

См. раздел A.3.4.

A.4.5.3 **Метод измерения**

Для определения соответствия ширины луча (на англ. яз. Beam Width Matching – BWM) можно использовать диаграммы ко-полярных антенн, описанные в A.3.4. Оцените ширину луча антенны для обеих поляризаций, как описано на рисунке A.8. Помимо ширины луча на уровне –3 дБ, ширина луча также может быть определена, например, на уровне –10 дБ. Согласование ширины луча определяется по формуле (A.22):

$$BWM = \theta_{\mathrm{h}} - \theta_{\mathrm{v}} \tag{A.22}$$

A.4.6 ***Максимальная скорость вращения***

A.4.6.1 **Схема измерения**

Антенная система должна быть установлена в помещении, достаточно большом для полного вращения.

A.4.6.2 **Измерительный прибор**

Устройство для измерения приведено в таблице A.16.

Таблица A.16. Устройство для измерения максимальной скорости вращения

№	*Название устройства*	*Примечания*
1	Часы с секундомером	

A.4.6.3 **Метод измерения**

Вращайте антенну с максимальной скоростью и измерьте секундомером время, за которое антенна повернется N раз. Учитывая время измерения t секунд, максимальная скорость вращения R_{max} рассчитывается по формуле (A.23). N обычно устанавливается равным 10.

$$R_{\mathrm{max}} = 60\,\frac{N}{t} \tag{A.23}$$

A.4.7 ***Ускорение***

A.4.7.1 **Схема измерения**

См. раздел A.4.6.

A.4.7.2 Измерительный прибор

См. раздел A.4.6.

A.4.7.3 Метод измерения

Для ускорения EL начните с антенны, расположенной под углом EL = 0 градусов. Затем измерьте t_{aEL} – время, необходимое для приведения антенны к углу EL = 90 градусов. Аналогичным образом измерьте t_{aAZ} – время, необходимое для перехода от 90 градусов к 0 градусов. Возьмите в качестве измерения наихудшее значение.

Для направления AZ вращайте антенну с максимальной скоростью. Измерьте время, необходимое для полной остановки антенны.

Измерение производится с помощью секундомера. Следует соблюдать осторожность при подсчете любых превышений.

A.4.8 *Точность ориентации антенны*

A.4.8.1 Схема измерения

См. раздел A.4.6.

A.4.8.2 Устройство для измерения

Устройство для измерения приведено в таблице A.17.

Таблица A.17. Устройство для измерения точности наведения антенны

№	*Название устройства*	*Примечания*
1	Лазерная указка	Диаметр/распространение луча как можно меньше. Он должен быть жестко закреплен на антенне.

A.4.8.3 Метод измерения

Установите лазерную указку, которая достаточно мала, чтобы не влиять на вес антенной системы, жестко закрепленной на рупоре или другом компоненте. Лазерная указка должна иметь как можно более узкий диаметр и расходимость.

Направьте антенну прямо на стену (см. рисунок A.30). Сначала зафиксируйте угол EL на 0 градусов. Затем под углом AZ = 0 градусов спроецируйте лазерный луч на стену. Эта проектируемая точка, p_{orig}, должна быть отмечена на стене. Из-за расхождения лазерного луча эта точка фактически представляет собой круг диаметром несколько миллиметров. Поэтому проведите параллельные прямые, чтобы определить центральную точку. Установите расстояние между лазерной указкой и p_{orig} как h (в м). Затем поверните антенну в направлении AZ на 360 градусов. Затем снова спроецируйте луч на стену. Запишите проецируемую точку как $p_{rot,a}$ таким же образом, как и p_{orig}. Принимая разницу между p_{orig} и $p_{rot,a}$ за d (в м), рассчитайте угловую погрешность по формуле (A.24):

$$\theta_{az} = \tan^{-1}\left(\frac{d}{h}\right) \quad \text{(A.24)}$$

Отмерьте θ_{az} 10 раз. Пусть стандартное отклонение 10 образцов определяется как точность наведения для направления AZ.

Зафиксируйте угол EL на 0 градусов. Затем под углом AZ = 0 градусов спроецируйте лазерный луч на стену. Эта спроецированная точка p_{orig} снова отмечается на стене (так же, как и раньше). Переместите антенну в направлении EL на +90 градусов. Затем переместите его на –90 градусов и снова спроецируйте луч на стену. Запишите проецируемую точку как $p_{rot,e}$ таким же образом, как и p_{orig}. Принимая разницу между p_{orig} и $p_{rot,e}$ за $d\sigma$(в м), рассчитайте угловую погрешность θ_{az} по формуле (A.25):

$$\theta_{EZ} = \tan^{-1}\left(\frac{d'}{h}\right) \quad \text{(A.25)}$$

Отмерьте θ_{az} 10 раз. Пусть стандартное отклонение 10 образцов определяется как точность наведения для направления EL. См. рисунок A.31.

A.4.9 *Динамический диапазон*

A.4.9.1 Схема измерения

Схема измерения приведена на рисунке A.32.

A.4.9.2 Устройство для измерения

Устройство для измерения приведено в таблице A.18.

Таблица A.18. Устройство для измерения динамического диапазона

No.	*Название устройства*	*Примечания*
1	Генератор сигналов	

A.4.9.3 Метод измерения

Подключите к приемнику внешний высокостабильный (амплитудный) SG с калибровочной линией и широким динамическим диапазоном. Подайте сигнал на SG и считайте эквивалентную мощность на выходе, выдаваемую процессором обработки сигналов.

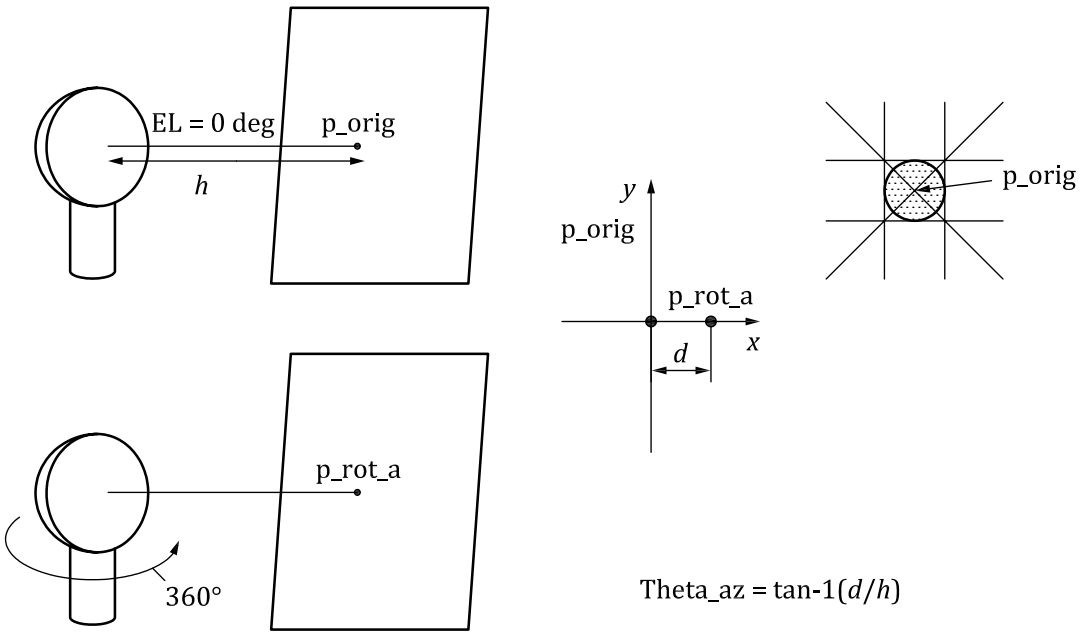


Рисунок A.30. Точность ориентации антенны (AZ)

Начните со значения, которое ниже минимального обнаруживаемого сигнала, а затем увеличьте вводимый сигнал на равные расстояния, например, на 1 дБ или меньше. Остановитесь, когда уровень мощности SG на 2-3 дБ превышает точку сжатия приемника на 1 дБ. См. рисунок A.33.

Измерьте LV_d, уровень между точкой сжатия 1 дБ и S_{min}, в соответствии с рисунком A.32 (разница между точками a и b).

A.4.10 *Боковой лепесток диапазона*

A.4.10.1 Метод измерения

Боковой лепесток диапазона измеряется тем же методом, как показано в разделе A.4.3.

Когда боковые лепестки диапазона появятся вблизи центра сжатого основного импульса, считайте V_m, пиковое значение напряжения основного импульса, и V_s, пиковое значение напряжения бокового лепестка диапазона, на A-Области применения. Боковой лепесток диапазона должен быть получен в диапазоне, более широком, чем ширина импульса после сжатия импульса, которая составляет$\Delta t > \tau_{pc}$, используя максимальное пиковое значение в качестве эталона. Боковой лепесток диапазона ΔV_p рассчитывается в единицах дБ по формуле (A.26):

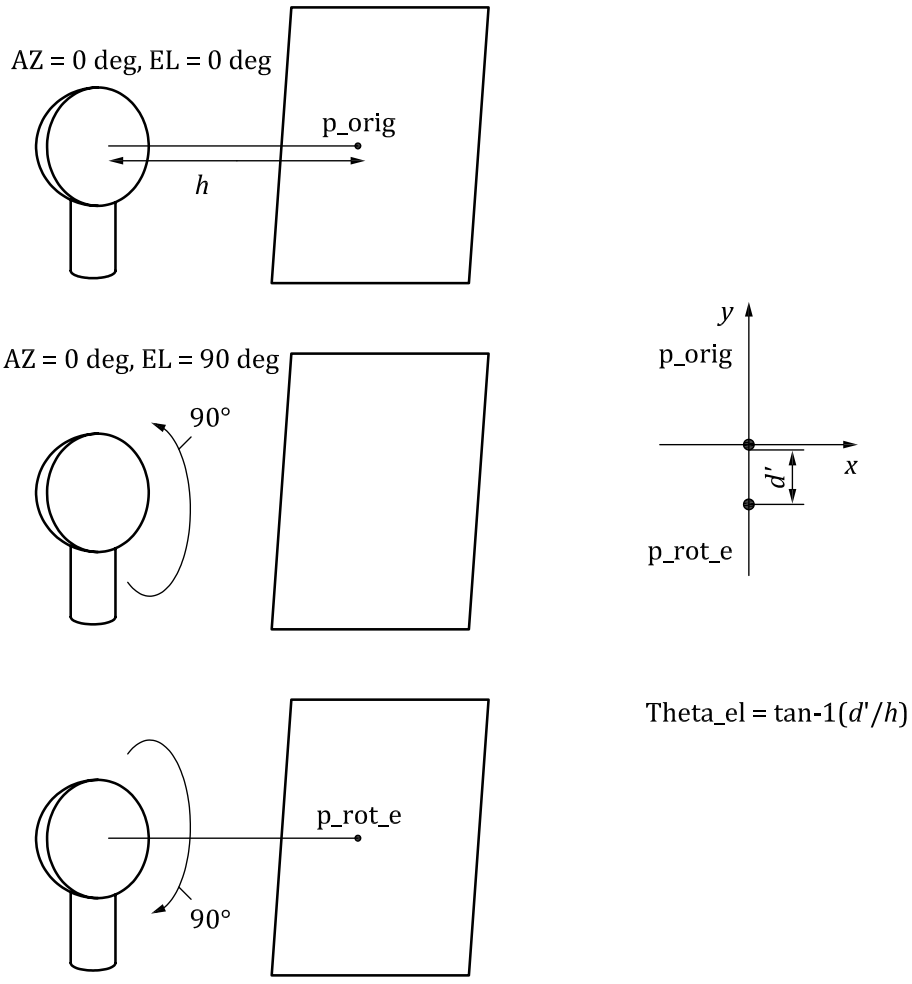
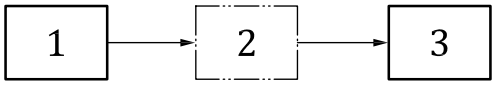


Рисунок A.31. Точность ориентации антенны (EL)



Условные обозначения:
1 SG
2 Аналоговый и цифровой приемник
3 Процессор обработки сигналов

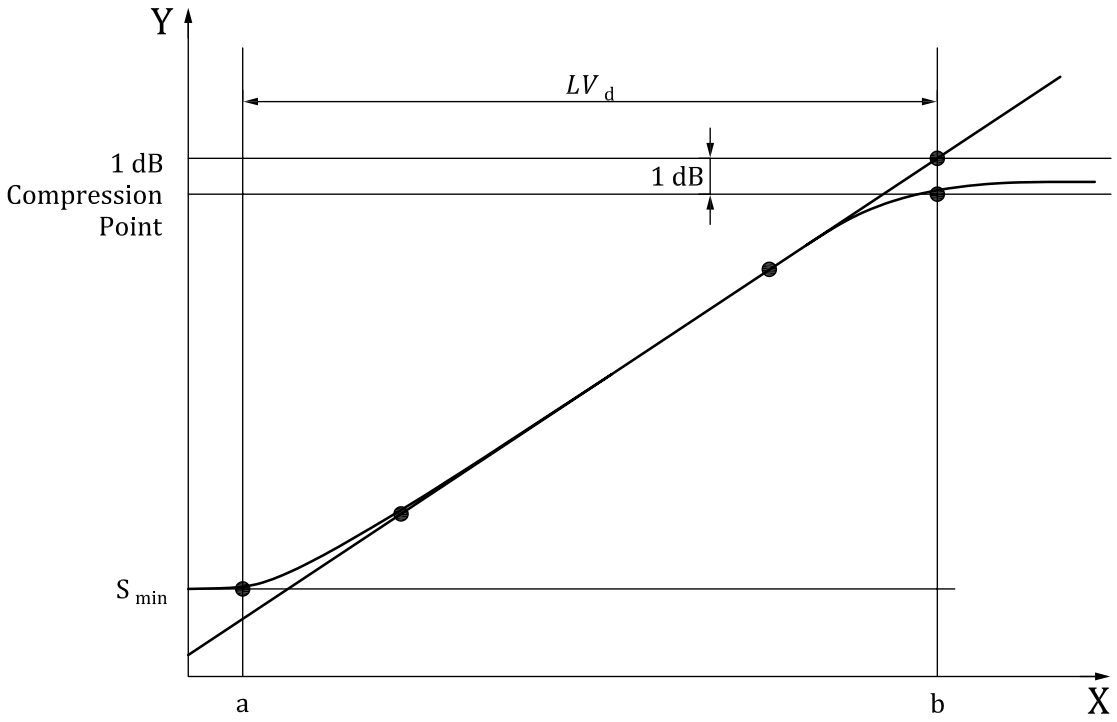
Рисунок A.32. Схема измерения динамического диапазона

$$\Delta V_{\mathrm{pr}} = 10 \log\left(\frac{V_{\mathrm{m}}}{V_{\mathrm{s}}}\right) \qquad \text{(A.26)}$$

На рисунке A.34 показан пример импульсной волны, сжатой в приемнике.

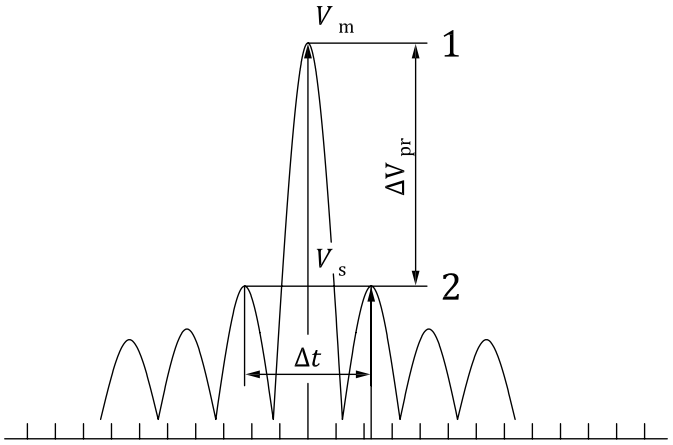
A.4.10.2 **Устройство для измерения**

Устройство для измерения приведено в таблице A.19.



Условные обозначения:
LV^{d} Динамический диапазон
X Входная мощность, в дБм
Y Выходная мощность, в дБм

Рисунок A.33. Динамический диапазон



Условные обозначения:
1 Пиковое импульсное напряжение
2 Напряжение бокового лепестка пикового диапазона

Рисунок А.34. Метод измерения бокового лепестка диапазона

Таблица А.19. Устройство для измерения бокового лепестка диапазона

№	*Название устройства*	*Примечания*
1	А-Область применения	

ДОБАВЛЕНИЕ B. ПРИМЕР СПЕЦИФИКАЦИЙ РАДИОЛОКАТОРА

(информативно)

В таблице ниже приведены примеры распространенных спецификаций метеорологических радиолокаторов на текущем рынке (по состоянию на 2016 год).

Общие технические характеристики метеорологических радиолокаторов

Требования к производительности системы для метеорологического радиолокатора		*Рабочая частота радиолокатора*		
Основные параметры	*Критерии*	*Радиолокатор 1 (S-диапазон)*	*Радиолокатор 2 (C-диапазон)*	*Радиолокатор 3 (X-диапазон)*
Чувствительность[a]	Минимальная обнаруживаемая отражательная способность должна составлять A дБz или менее на расстоянии до B км, где максимальная однозначная скорость более ±48 м/с достигается при 2-ступенчатом f_{PRF} либо 2:3, либо 3:4 или 4:5	< 18; 240	< 13; 120	< 8; 60
Пространственное разрешение	Разрешение луча должно быть θ_H и θ_v (в градусах) или меньше	< 1	< 1	< 1
	Разрешение диапазона должно быть ΔR (в м) или меньше	≤ 150	≤ 150	≤ 150
	Боковой лепесток антенны должен быть ΔV_{pa} (в дБ) или меньше	< –25	< –25	< –25
	Боковой лепесток диапазона должен быть ΔV_{pr} (в дБ) или меньше для радиолокатора с импульсным сжатием	< –50	< –50	< –50
Фазовая стабильность	Фазовая стабильность должна быть θ_{ps} (в градусах) или меньше	0,3	0,6	1,2
Точность измерения двойной поляризации	Коэффициент перекрестной поляризации должен быть XPD_{sys} (в дБ) или меньше	< –30	< –30	< –30

Другие ключевые параметры	*Критерии*	*Радиолокатор 1 (S-диапазон)*	*Радиолокатор 2 (C-диапазон)*	*Радиолокатор 3 (X-диапазон)*
Максимальная скорость вращения	Максимальная скорость вращения антенны должна быть R_{max} (в об/мин) или больше	≥ 6	≥ 6	≥ 6
Ускорение	При ускорении антенны EL, время движения EL от 0 до 90 (в градусах) и от 90 до 0 (в градусах) должно быть меньше, чем t_{aEL} (в сек)	< 20	< 20	< 20
	При ускорении антенны AZ, время от максимальной скорости до полной остановки должно быть меньше, чем t_{aAZ} (в сек)	< 5	< 5	< 5
Точность наведения антенны	Точность наведения антенны должна быть θ_{AZ} (в градусах) или меньше и θ_{EL} (в градусах) или меньше	< 0,1	< 0,1	< 0,1
Динамический диапазон	Динамический диапазон должен быть LV_d (в дБ) или больше	> 100	> 100	> 100
Нежелательные излучения[b]	Уровень нежелательных излучений должен составлять A дБ или менее на расстоянии B МГц от центральной частоты f_0 (в МГц).	< –60; 5	< –60; 5	< –60; 5

[a] Для типового радиолокатора с импульсным сжатием минимальная обнаруживаемая отражательная способность на коротких расстояниях не может быть рассчитана по заданным значениям.
[b] В соответствии с национальными требованиями могут требоваться другие значения.

ДОБАВЛЕНИЕ С. РЕГИСТРАЦИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ ИЗМЕРЕНИЙ

(информативно)

Примеры записи результатов измерений приведены в таблицах С.1–С.13.

Таблица С.1. Длительность импульса

Система	*Длительность импульса τ мкс*	*Точность*	*Примечания*
Канал горизонтальной поляризации		±1/10 мкс	
Канал вертикальной поляризации		±1/10 мкс	

Таблица С.2. Пиковая мощность

Система	*P_t дБм*	*P_m дБм*	*P'_m дБм*	*L_c дБм*	*L_t дБм*	*Точность*	*Примечания*
Канал горизонтальной поляризации						±1/10 дБ	
Канал вертикальной поляризации						±1/10 дБ	Только в случаях двойной поляризации

Таблица С.3. Коэффициент усиления антенны

Система	*Частота, МГц*	*Усиление, дБ*	*Примечания*
Канал горизонтальной поляризации			
Канал вертикальной поляризации			Только в случаях двойной поляризации

Таблица С.4. Ширина луча

Система		*Ширина луча (градусы)*	*Примечания*
Канал горизонтальной поляризации	Плоскость H		θ_{H}
	Плоскость V		θ_{V}
Канал вертикальной поляризации	Плоскость H		Только в случае двойной поляризации
	Плоскость V		

Таблица С.5. Изоляция с перекрестной поляризацией

Поляризация	*Структура*	*Измеренный XPD, дБ*
Канал горизонтальной поляризации	XPD_{h}	
Канал вертикальной поляризации	XPD_{v}	

Таблица С.6. Запись измерения изоляции H/V

Порт	*Измерение*	*Измеренный уровень, дБ*
Горизонтальный	$LV_{\text{diff -h}}$	
Вертикальный	$LV_{\text{diff -v}}$	

Таблица С.7. Сжатие импульсов

Система	*Уровень мощности, дБ*		*ОСШ, дБ*		*Коэффициент усиления при сжатии импульсов, дБ*	*Примечания*
Канал горизонтальной поляризации	S_{off}		SNR_{off}			
	N_{off}					
	S_{on}		SNR_{on}			
	N_{on}					
Канал вертикальной поляризации	S_{off}		SNR_{off}			Только в случае двойной поляризации
	N_{off}					
	S_{on}		SNR_{on}			
	N_{on}					

Таблица С.8. Интервал дискретизации принятого сигнала

Система	*Интервал дискретизации, ts мск*	*Длина выборки, Lsi м*	*Примечания*
Канал горизонтальной поляризации			
Канал вертикальной поляризации			Только в случае двойной поляризации

Таблица С.9. Полоса пропускания приемника (радиолокатор со сжатием импульса)

Система	*Длительность импульса, мкс*	*Примечания*
Канал горизонтальной поляризации		
Канал вертикальной поляризации		Только в случаях двойной поляризации

Таблица С.10. Потери в обтекателе

Система	*Потеря при передаче обтекателя, дБ*	*Примечания*
Канал горизонтальной поляризации		
Канал вертикальной поляризации		Только в случаях двойной поляризации

Таблица С.11. Потери тракта передачи/приема для передатчика независимого типа с двойной поляризацией (ссылка на рисунок А. 22)

	Элемент	*Метод измерения*	*Результат*
1	Обратный тракт передачи для приема	(1) Измерьте потерю переходного затухания постоянного тока и потерю в кабеле между A и B.	(H): a = дБ (V): b = дБ
		(a) дБ	
		(2) Измерьте потерю переходного затухания постоянного тока и потерю в кабеле между C и D.	
		(b) дБ	

	Элемент	*Метод измерения*	*Результат*
2	Тракт передачи	(1) Измерьте потерю между E и F.	(H): c + d + e = дБ (V): f + g + h = дБ
		(c) дБ	
		(2) Измерьте потерю между G и H.	
		(d) дБ	
		(3) Закройте отверстие рупора стальной пластиной. Полностью отразите радиоволну на рупоре, измерьте потерю между I и J и разделите значение на 2.	
		(e) дБ	
		(4) Измерьте потерю между M и N.	
		(f) дБ	
		(5) Измерьте потерю между O и P.	
		(g) дБ	
		(6) Закройте отверстие рупора стальной пластиной. Полностью отразите радиоволну на рупоре, измерьте потери между Q и J и разделите полученное значение на 2.	
		(h) дБ	
3	Тракт приема	(1) Измерьте потерю между H и K.	(H): i + j = dB (V): k + l = dB
		(i) дБ	
		(2) Измерьте потерю между K и L.	
		(j) дБ	
		(3) Измерьте потерю между P и R.	
		(k) дБ	
		(4) Измерьте потерю между R и S.	
		(l) дБ	
4	Всего	Просуммируйте все значения потерь для H/V (от 1 до 3 для каждого H/V).	(H): дБ (V): дБ

Таблица C.12. Согласованные потери фильтра

Согласованные потери фильтра, дБ	*Примечания*
F_{mf}	При сжатии импульса потери согласованного фильтра включаются в коэффициент усиления при сжатии импульса.

Таблица C.13. Нежелательные излучения

Импульс	*Поляризация*	*Отделение от f_0*	*Измерение*
Короткий импульс	H	+A МГц	
		–A МГц	
	V	+A МГц	
		–A МГц	

Импульс	*Поляризация*	*Отделение от f_0*	*Измерение*
Длинный импульс (РЛС со сжатием импульса)	H	+A МГц	
		–A МГц	
	V	+A МГц	
		–A МГц	

ДОБАВЛЕНИЕ D. РЕКОМЕНДУЕМЫЕ ДЕЙСТВИЯ ПО ТЕХНИЧЕСКОМУ ОБСЛУЖИВАНИЮ И КАЛИБРОВКЕ

(информативно)

Всегда следуйте инструкциям производителя по процедурам и интервалам технического обслуживания для данной системы. Рекомендуемые действия приведены в таблице ниже.

Рекомендуемые действия по техническому обслуживанию и калибровке

Оборудование	*Элемент*	*Метод*	*Рекомендуемый интервал времени*	*Процедура (калибровка, мониторинг, техническое обслуживание)*		
				Калибр.	*Монитор.*	*Техобсл.*
Система	Затухание в волноводе	Протестируйте SG и измеритель мощности	Во время ввода в эксплуатацию	X		
	Собственный шум системы	Измерение мощности в пространственной области без обратного рассеяния (высокая EL, большое расстояние)	Каждый угол сканирования луча	X	X	
	Проверка BITE/ проверка состояния	Проверка аварийных сигналов и состояния соответствующего оборудования с помощью окна системы BITE	Раз в сутки		X	
			Раз в месяц (если не проводится постоянный мониторинг)			X
	Визуальная проверка	Проверьте внешний вид всего оборудования	Раз в полгода (или во время каждого посещения объекта)			X
	Системы безопасности на объекте	Проверьте контуры автоблокировки в аварийной или предаварийной ситуации на объекте, такие как выключатели аварийного отключения	Раз в полгода			X
	Вентилятор системы охлаждения	Проверьте состояние вентилятора системы охлаждения	Раз в полгода (или во время каждого посещения объекта)			X
			Раз в сутки		X	
	Напряжение постоянного тока	Измерьте напряжение постоянного тока источника питания в соответствующем оборудовании	Раз в полгода			X
			Раз в сутки		X	
	КСВН	Измерьте КСВН с помощью измерителя мощности	Раз в год			X
			Раз в сутки		X	
	Очистка воздушного фильтра	Очистка воздушного фильтра соответствующего оборудования	Раз в полгода или по мере необходимости			X

Оборудование	*Элемент*	*Метод*	*Рекомендуемый интервал времени*	*Процедура (калибровка, мониторинг, техническое обслуживание)*		
				Калибр.	*Монитор.*	*Техобсл.*
Антенна/блок управления антенной	Коэффициент усиления антенны и ослабление сигнала сухого обтекателя	Испытательная установка поля дальней зоны, испытательная установка поля ближней зоны, солнце, вместе с обтекателем, по возможности	На предприятии-изготовителе	X		
	Раствор луча	Испытательная установка поля дальней зоны, испытательная установка поля ближней зоны, солнце, вместе с обтекателем, по возможности	На предприятии-изготовителе	X		
	Точность позиционирования	Измерьте точность позиционирования антенны с помощью солнца	Раз в полгода (с использованием инструмента отслеживания солнца)			X
			Раз в сутки (в зависимости от солнечных лучей)		X	
	Проверка звука	Проверьте звук механической передачи и двигателя	Во время каждого посещения объекта			X
	Скорость вращения	Измерьте скорость вращения антенны	Раз в полгода			X
			Раз в сутки		X	
	Количество смазочного материала	Проверьте количество смазочного материала	Раз в полгода (или во время каждого посещения объекта)			X
	Цвет смазки	Проверьте цвет смазочного материала	Раз в полгода (или во время каждого посещения объекта)			X
	Очистка контактных колец	Очистка контактного кольца и проверка состояния щетки	Каждые 1–5 лет			X
	Замена смазки	Замените смазку опорно-поворотного устройства	Раз в год			X
	Подача смазки	Смазать опорно-поворотное устройство	Раз в год			X
	Проверка функционирования ограничительного переключателя	Проверьте работу ограничительного переключателя	Раз в год			X
Дегидратор[a]	Проверка состояния	Проверьте состояние дегидратора	Раз в сутки		X	

Оборудование	*Элемент*	*Метод*	*Рекомендуемый интервал времени*	*Процедура (калибровка, мониторинг, техническое обслуживание)*		
				Калибр.	*Монитор.*	*Техобсл.*
Передающее устройство	Частота следования импульсов (f_{PRF})	Измерьте f_{PRF} с помощью детектора и осциллографа	Раз в год			X
			Раз в сутки		X	
	Излучаемая частота	Измерьте частоту с помощью частотомера или анализатора спектра В случае твердотельного типа короткий импульс и импульс с линейной частотной модуляцией следует измерять с помощью анализатора спектра	После установки и раз в полгода	X		X
	Длительность импульса	Измерьте длительность импульса с помощью детектора, аттенюатора 3 дБ и осциллографа	Раз в полгода	X		
	Излучаемая мощность	Измерьте излучаемую мощность с помощью измерителя мощности	Раз в полгода	X		
			Раз в сутки		X	
	Замена основных компонентов передатчика	Замените электронную лампу, например, магнетрон или клистрон В случае твердотельного типа для замены не требуется никаких элементов	Как правило, примерно каждые 5 лет (замена)			X
Приемник/ процессор обработки сигналов	Усиление приемника (внешнее измерение)	Протестируйте SG и измеритель мощности	Раз в полгода	X		
	Динамическое затухание фильтра (потери согласованного фильтра)	Прямая подача излучаемого сигнала, сравнение мощности с/без фильтра	Во время ввода в эксплуатацию	X		
	Калибровка приемника по одной точке	Внутренний опорный сигнал (при наличии)	Угол сканирования луча (необязательно)	X	X	
			Раз в полгода	X		
	Динамический диапазон	Измерьте динамический диапазон с помощью SG	Раз в год			X
	Минимальный обнаруживаемый сигнал	Измерьте минимальный обнаруживаемый сигнал с помощью SG	Раз в год			X

Оборудование	*Элемент*	*Метод*	*Рекомендуемый интервал времени*	*Процедура (калибровка, мониторинг, техническое обслуживание)*		
				Калибр.	*Монитор.*	*Техобсл.*
Обтекатель антенны радио-локатора	При наличии протечки	Проверьте, не происходит ли протекание дождя	Раз в полгода (или во время каждого посещения объекта)			X
	Состояние обтекателя	Проверьте состояние обтекателя (например, покрытие)	Раз в полгода			X
		Очистка обтекателя	Каждые 5 лет или чаще, если требуется			X

[a] Если жидкая вода конденсируется внутри волновода, могут возникнуть электрические искры, что приведет к сбоям в работе радиолокатора и возможному повреждению электроники. Роль дегидратора заключается в поддержании внутренней поверхности волновода в сухом состоянии.

ДОБАВЛЕНИЕ E. ОБМЕН РАДИОЛОКАЦИОННЫМИ ДАННЫМИ

(информативно)

Метеорологические радиолокаторы являются частью Глобальной системы наблюдений, и обмен данными радиолокаторов по углу сканирования луча будет способствовать улучшению возможностей наблюдения, повышению заблаговременности прогнозов текущей погоды и предупреждений о неблагоприятной погоде, а также улучшению численного прогнозирования погоды. Для гидрологических и климатических применений требуются контроль качества и обработка исчерпывающих данных.

Для облегчения последующей обработки и обмена как радиолокационными данными по углу сканирования луча, так и полученной продукцией по атмосферным осадкам на поверхности, данные должны быть надлежащим образом описаны в отношении:

– как они были собраны;

– как контролировалось их качество;

– качества самих данных.

ВМО разрабатывает формат обмена данными метеорологических радиолокаторов, информационную модель, модель данных, а также (а) формат(ы) файлов, которые будут включать показатели качества данных.

_____

ДОБАВЛЕНИЕ F. ДРУГИЕ РАДИОЛОКАЦИОННЫЕ СИСТЕМЫ

(информативно)

F.1 Метеорологический радиолокатор с фазированной решеткой

Метеорологические радиолокаторы с фазированной решеткой (PAWR) условно классифицируются на две категории. Одной из категорий является тип радиолокатора визуализации, который выполняет точечное быстрое сканирование в пределах ограниченной зоны наблюдения [20]. Хотя скорость вращения антенны важна, производительность ее системы может быть измерена с помощью тех же критериев (фундаментальные параметры и другие ключевые параметры), которые описаны в разделе 6. Другая категория – это тип радиолокатора, который излучает электронные лучи, охватывающие несколько углов EL одновременно, и разделяет их с помощью методов формирования цифрового луча (DBF) на стороне приемника [21][22][23].

Для последнего типа PAWR к основным параметрам необходимо добавить новый элемент, а именно скорость трёхкоординатного объемного наблюдения, которая может быть выражена как количество углов EL, которые радиолокатор может обрабатывать одновременно – см. Таблицу F.1. Однако по мере увеличения этого числа мощность передачи P_t и коэффициент усиления антенны G_t будут соответственно уменьшаться. Что касается этого компромисса между улучшенной скоростью и сниженной чувствительностью, оператор радиолокатора может принять стратегию сканирования таким образом, что для больших углов EL лучи расширяются, чтобы обеспечить приоритет скорости, в то время как для малых углов EL лучи сужаются, чтобы обеспечить приоритет разрешающей способности.

Таблица F.1. Основные параметры для PAWRs

Категория параметра	*Цель*	*Показатель*
Скорость трёхкоординатного объемного наблюдения	Определяет, с какой скоростью весь объем трёхкоординатного наблюдения может быть отсканирован.	Количество одновременно обрабатываемых углов EL: чем выше значение, тем быстрее происходит трехкоординатное сканирование

Кроме того, для других ключевых параметров необходимо добавить новый элемент, а именно возможность DBF подавлять мешающие отражения от земной поверхности или наземных предметов – см. таблицу F.2. В отличие от традиционных методов подавления мешающих отражений от земной поверхности или наземных предметов, основанных на спектре, необходимо оценивать подавление с помощью методов DBF, которые вводят нулевые значения в направления нежелательных излучений.

Таблица F.2. Другие ключевые параметры для PAWR

Категория параметра	*Цель*	*Показатель*
Уровень подавления мешающих отражений от земной поверхности или наземных предметов с помощью методов DBF	Определяет, насколько хорошо DBF может отличать метеорологические эхосигналы от мешающих отражений от земной поверхности или наземных предметов	Чем выше показатель, тем больше мешающих отражений от земной поверхности или наземных предметов подавляется с помощью DBF

F.2 Радиолокатор микроопределения дождя

Радиолокатор микроопределения дождя (MRR) – это вертикально направленный доплеровский радиолокатор, который выводит профили распределения интенсивности дождя по размерам капель (DSD), используя соотношение между конечной скоростью падения и размером капли [24]. DSD можно использовать для уменьшения одной из основных неопределенностей измерений метеорологического радиолокатора. Поскольку DSD в объеме измерения метеорологического радиолокатора может быть восстановлен, MRR обеспечивает основу для настройки соотношения Z-R в режиме реального времени и калибровки метеорологического радиолокатора [25]. Другим типичным применением MRR является определение высоты слоя плавления, которое проявляется не только как увеличение мощности обратного рассеяния, но также (и часто более четко) как скачок скорости падения.

MRR, реализованный в виде твердотельного радиолокатора FM-CW с частотой 24 ГГц, имеет мощность передачи в несколько милливатт с типичной разрешающей способностью 3 dBz при z = 1 км, Δz = 30 м, Δt = 10 с с z, Δz и Δt, измеряющими высоту, разрешение по высоте и времени. Основная ошибка извлечения вызвана вертикальным ветром, поскольку он влияет на конечную скорость падения капель. Подходящая установка состоит из MRR и дождемера для контроля калибровки MRR.

F.3 Доплеровский метеорологический радиолокатор в аэропорту

Терминальный доплеровский метеорологический радиолокатор (TDWR) – это разновидность метеорологического радиолокатора, предназначенного для обнаружения микровзрывов и сдвиговых линий вокруг аэропортов и выдачи предупреждающей информации диспетчеру УВД в режиме реального времени. Ливень, зона выпадения которого распространяется на 4 км или менее в горизонтальном направлении, называется «микровзрывом» [26]. Микровзрыв – это кратковременное, но опасное явление, вызывающее порывы внешних ветров, которые сильно расходятся вблизи поверхности. Интенсивные ветры, вызванные микровзрывом, часто длятся от 2 до 5 минут. Опасность представляют также линии сдвига, образуемые фронтами порывов, передним краем расходящейся воздушной массы, вызванной нисходящим потоком, или линиями конвергенции, границей раздела теплых и холодных воздушных масс. Линия сдвига может достигать нескольких километров и более, длиться десятки минут и вызывать резкие изменения скорости ветра.

TDWR обычно представляет собой доплеровский радиолокатор C-диапазона с большой параболической антенной диаметром около 7 м и более. Вообще говоря, TDWR могут наблюдать направление и скорость ветра только в дождливую погоду. В тех случаях, когда аэропорт расположен в местности, где возможны условия турбулентной атмосферы, иногда используются терминальные доплеровские лидары (TDLs, см. F.4), а также TDWR для условий прозрачного воздуха.

F.4 Терминальный доплеровский лидар

Терминальный доплеровский лидар (TDL) – это наземная система дистанционного зондирования, использующая лазерный луч вместо радио/микроволнового. TDL излучает лазерный луч с импульсной модуляцией в воздух и получает обратно рассеянный свет от аэрозоля. Скорость перемещения аэрозоля или скорость атмосферного ветра может быть рассчитана путем частотного анализа полученных сигналов, поскольку сигналы от движущегося объекта имеют доплеровские компоненты скорости в зависимости от скорости объекта.

TDL измеряет движение ветра в диапазоне от 7 км (по крайней мере) до 15 км (обычно по горизонтали) или до пограничного слоя атмосферы (по вертикали). Сканирование лазерным лучом с повторным импульсным излучением позволяет измерить дальность

и направление на объект. TDL может измерять скорость и направление ветра при ясных погодных условиях. Дальность наблюдения уменьшается при уменьшении дальности видимости, например, в условиях дождя.

TDL используются в качестве ценного дополнения к наблюдениям с помощью TDWR, поскольку они имеют взаимодополняющие характеристики в отношении осадков. TDL лучше всего работают при ясных погодных условиях, когда TDWR не получают сигналов или получает их в меньшем количестве. С другой стороны, когда осадки ограничивают наблюдения с использованием TDL, TDWR работают оптимально.

F.5 Радиолокатор обнаружения облаков

Радиолокатор обнаружения облаков в диапазоне миллиметровых волн, например, в Ka- и W-диапазонах, является прекрасным инструментом для наблюдения за облаками и туманом, размер частиц которых меньше, чем у атмосферных осадков. Радиолокатор обнаружения облаков может наблюдать за процессом формирования грозового облака, вызывающего проливной дождь, и предупредить о сильном дожде непосредственно перед его появлением. Новейший облачный радиолокатор имеет высокую чувствительность около –20 dBz или менее на расстоянии до 20 км, режим доплеровского наблюдения и наблюдения с двойной поляризацией.

F.6 Малогабаритная радиолокационная система

Вообще говоря, тип малогабаритного радиолокатора, помимо стандартного типа (см. описание радиолокатора с шириной луча 1 градус в разделе 5), особенно часто используется в X-диапазоне, поскольку он позволяет снизить стоимость оборудования и затраты на возведение, а также легко переносится.

Хотя радиолокаторы X-диапазона более чувствительны к ослаблению радиосигнала из-за осадков, зона охвата низкочастотного радиолокатора может быть покрыта двумя или более низкозатратными радиолокаторами X-диапазона. Двухкоординатная радиолокационная система может точно наблюдать за двумерной скоростью, а трехкоординатная – за трехмерной.

Скорость вращения антенны как при сканировании AZ, так и при сканировании EL может быть уменьшена за счет использования легкой и небольшой антенны. Можно увеличить f_{PRF}, сосредоточившись на наблюдении на малых расстояниях (например, 30 км), чтобы добиться такой же точности наблюдений при высокой скорости вращения, как и при использовании радиолокатора, работающего на более низкой частоте.

Кроме того, временное разрешение будет улучшено за счет высокоскоростного вращения, которое может сократить интервал вывода данных. Это обеспечит высокую частоту обновления данных для пользователей, что сделает ее удобной для наблюдения за такими кратковременными явлениями, как торнадо и ливневые выпадения дождевых осадков.

БИБЛИОГРАФИЯ

[1] Всемирная метеорологичесая организация, 2018 г.: *Руководство по приборам и методам наблюдения* (ВМО-№ 8), том III – Системы наблюдений. Глава 7. Женева.

[2] Probert-Jones, J.R., 1962: The radar equation in meteorology. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 1962, 88(376):485–495.

[3] Doviak, R.J. and D.S. Zrnić, 1993: *Doppler Radar and Weather Observations*. Second edition. San Diego, Academic Press.

[4] Joe, P. and S. Lapczak, 2002: Evolution of the Canadian Operational Radar Network. In: *Proceedings of the 2nd European Conference on Radar in Meteorology and Hydrology*, Delft, Netherlands: 370–382.

[5] Seliga, T.A. and V.N. Bringi, 1976: Potential use of radar differential reflectivity measurements at orthogonal polarizations for measuring precipitation. *Journal of Applied Meteorology*, 15:69–76.

[6] Vollbracht, D., M. Sartori and M. Gabella M., 2014: Absolute dual-polarization radar calibration: Temperature dependence and stability with focus on antenna-mounted receivers and noise source-generated reference signal. In: *Proceedings of the 8th European Conference on Radar in Meteorology and Hydrology (ERAD 2014)*, Garmisch-Partenkirchen, Germany, 1–5 September:91–102.

[7] Reimann, J., 2013: On Fast, Polarimetric Non-reciprocal Calibration and Multi-polarization Measurements on Weather Radars. PhD dissertation. Deutsches Zentrum für Luft und Raumfahrt and Technische Universität Chemnitz, ISRN DLR-FB-2013-36, ISSN 1434-8454.

[8] Gabella, M., M. Sartori, O. Progin and U. Germann, 2013: Acceptance tests and monitoring of the next generation polarimetric weather radar network in Switzerland. In: *Proceedings of the Institute of Electrical and Electronics Engineers International Conference on Electromagnetics in Advanced Applications*, Torino, Italy, 9–13 September:211–214.

[9] Kumagai, H., T. Kozu, M. Satake, H. Hanado and K. Okamoto, 1995: Development of an active radar calibrator for the TRMM Precipitation Radar. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 33:1316–1318.

[10] Schmidt, K., M. Schwerdt, N.T. Ramon, G.C. Alfonzo, B. Döring, S. Raab, J. Reimann, D. Rudolf and J.W. Antony, 2015: Verification of the Sentinel-1A SAR Instrument Calibration using active and passive point targets. Wave Propagation and Scattering in Communications, Microwave Systems and Navigation, Chemnitz, Germany, 11–13 April.

[11] Gabella, M., M. Sartori, O. Progin, U. Germann and M. Boscacci, 2010: An innovative instrumentation for checking electromagnetic performances of operational meteorological radar. In: *Proceedings of the 6th European Conference on Radar in Meteorology and Hydrology*, Sibiu, Romania, 6–10 September:263–269.

[12] Gabella, M., M. Boscacci, M. Sartori and U. Germann, 2016: Calibration accuracy of the dual-polarization receivers of the C-band Swiss weather radar network. *Atmosphere*, 7(76).

[13] Holleman, I., A. Huuskonen, M. Kurri and H. Beekhuis, 2010: Operational monitoring of weather radar receiving chain using the Sun. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 27:159–166.

[14] Holleman, I., A. Huuskonen, R. Gill and P. Tabary, 2010: Operational monitoring of radar differential reflectivity using the Sun. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 27:881–887.

[15] Gabella, M., M. Sartori, M. Boscacci and U. Germann, 2015: Vertical and horizontal polarization observations of slowly varying solar emissions from operational Swiss weather radars. *Atmosphere*, 6:50–59.

[16] Huuskonen, A., M. Kurri and I. Holleman I., 2016: Improved analysis of solar signals for differential reflectivity monitoring. *Atmospheric Measurement Techniques*, 9:3183–3192.

[17] Leone, D.A., R.M. Endlich, J. Petriceks, R.T.H. Collis and J.R. Porter, 1989: Meteorological considerations used in planning the NEXRAD network. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 70:4–13.

[18] Heiss, W.H., D.L. McGrew and D. Sirmans, 1990: NEXRAD: Next generation weather radar (WSR-88D). *Microwave Journal*, 33(1):79–98.

[19] Skolnik, M.I. (ed.), 1979: *Radar Handbook*. New York, McGraw-Hill.

[20] Isom, B., R. Palmer, R. Kelley, J. Meier, D. Bodine, M. Yeary, B. Cheong, Y. Zhang, T.-Y. Yu and M. Biggerstaff, 2015: The atmospheric imaging radar: Simultaneous volumetric observations using a phased array weather radar. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 30(4):655–675.

[21] Anraku, N., F. Mizutani, M. Wada, H. Handa, T. Ushio and S. Satoh, 2013: Development of phased-array weather radar system for 3D observation of cumulonimbus clouds. 36th Conference on Radar Meteorology, Breckenridge, Colorado, 16–20 September 2013. American Meteorological Society.

[22] Wada, M., H. Goto, F. Mizutani, T. Ushio and S. Satoh, 2013: Development of dual polarization phased array radar. 36th Conference on Radar Meteorology, Breckenridge, Colorado, 16–20 September 2013. American Meteorological Society.

[23] Wada, M., H. Yonekubo, T. Ushio, S. Satoh, A. Adachi and S. Tsuchiya, 2016: Keynote 2A: Development of phased-array weather radar: Field trial, dual-pol and how it reduces disaster. WMO Technical Conference on Meteorological and Environmental Instruments and Methods of Observation, Madrid, 27–30 September 20016.

[24] Atlas, D., R.C.Srivastava and R.S. Sekhon, 1973: Doppler radar characteristics of precipitation at vertical incidendence. *Reviews of Geophysics*, 11:1–35.

[25] Gage, K.S., C.R. Williams, P.E. Johnston, W.L. Ecklund, R. Cifelli, A. Tokay and D.A. Carter, 2000: Doppler radar profilers as calibration tools for scanning radars. *Journal of Applied Meteorology*, 39:2209–2222.

[26] Fujita, T.T., 1985: The Downburst, microburst and macroburst. SMRP Research Paper 210. University of Chicago.

ПРИЛОЖЕНИЕ 7.B. РУКОВОДЯЩИЕ УКАЗАНИЯ ВМО ПО РАЗМЕЩЕНИЮ МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИХ РАДИОЛОКАТОРОВ/ ИСПОЛЬЗОВАНИЮ ОБЩЕГО СПЕКТРА РАДИОЧАСТОТ

Всемирная метеорологическая организация выражает озабоченность по поводу увеличивающейся нагрузки на связанные с метеорологическими радиолокаторами полосы радиочастот и подчеркивает необходимость усилий по адекватной защите и смягчению воздействий, направленных против утраты и совместного использования этого спектра. ВМО адресует свою озабоченность политикам, национальным органам, регулирующим использование радиочастот, национальным гидрологическим и метеорологическим обществам, коммерческим продавцам телекоммуникационного оборудования и метеорологическому сообществу.

Защита традиционных, связанных с метеорологическими радиолокаторами радиочастот, имеет крайне важное значение для обеспечения непрерывного функционирования и совершенствования метеорологического зондирования, мониторинга, прогнозирования и выпуска предупреждений, и в этой связи соответствует наивысшим интересам безопасности населения. Метеорологическое сообщество во все большей степени полагается на технологии дистанционного зондирования, предназначенные как для регулярных, так и экспериментальных наблюдений за погодой и климатом. Эти виды деятельности требуют глобального доступа к спектру радиочастот не только для радиолокаторов, но также и для профилометров ветра, микроволновых радиометров и телеметрических систем, а также установленных на спутниках пассивных и активных датчиков. Прогресс в обслуживании в области метеорологических предупреждений и других метеорологических предсказаний, достигнутый в последние годы, в значительной мере объясняется наличием этих технологий.

Модели предсказания погоды и локализированные оперативных прогнозы во все большей степени зависят от национальных сетей наземных доплеровских метеорологических радиолокаторов для выпуска предупреждений о таких явлениях суровой погоды, как торнадо, быстроразвивающийся бурный паводок, выходящие на сушу ураганы; осадки (дождь, снег, град), для предотвращения обледенения воздушных судов и для управления воздушным движением/избегания неблагоприятной погоды. Во всем мире сети доплеровских радиолокаторов борются сейчас с возрастающими нагрузками на совместное использование частотного спектра, создаваемых нелицензионными широкополосными беспроводными применениями. Согласно уже имеющемуся во многих частях мира опыту, воздействия радиочастотных помех, создаваемых беспроводными сетями связи, могут ослеплять метеорологические радиолокаторы по конкретным направлениям или даже по значительным частям их охвата. Эта ситуация усугубляется в связи с широко распространенным и нелицензионным характером этих беспроводных применений, использование которых может привести к полной потере соответствующего спектра радиочастот для метеорологических радиолокаторов.

Ведется постоянная разработка новых радиолокационных технологий, включая адаптивные стратегии сканирования, более короткие импульсы, поляризацию, импульсную компрессию, быстрые изменения частоты и фазы. Существующие и планируемые спутниковые радиолокационные системы измеряют параметры облаков и осадков, что имеет важное значение для прогнозирования погоды, а также для исследований и оценки глобального изменения климата. В настоящее время осуществляется экспериментальное использование самых разнообразных прочих радиотехнологий космического и наземного базирования, и для них может потребоваться выделение в будущем радиочастотного спектра.

ВМО рекомендует всем пользователям метеорологических радиолокаторов:

a) стремиться к сотрудничеству с владельцами близлежащих радаров, чтобы избежать помех от радара к радару;

b) тесно сотрудничать с национальными частотными органами для обеспечения надлежащего использования методов смягчения последствий, таких как динамический выбор частоты;

c) призывать производителей радаров к внедрению технологий для выявления несанкционированных передатчиков и определения возможностей для динамического доступа к частотам.

Новые коммуникационные применения делают радиочастотный спектр исключительно ценным ресурсом, и в этой связи все большая опасность возникает для частотных полос, используемых в оперативной метеорологии и научных исследованиях. ВМО и метеорологическое сообщество полагаются на уполномоченные международные и национальные ведомства, регламентирующие использование радиочастот, поддерживают их, а также на сотрудничество с органами и секторами телекоммуникации, с тем чтобы продолжать защищать и должным образом совместно использовать эти радиочастоты. ВМО активно работает с этими ведомствами по линии Международного союза электросвязи (МСЭ) в целях создания соответствующих механизмов защиты использований спектра радиочастот в метеорологических целях. ВМО поощряет разработку четкого определения понятия «помехи» как допустимых, так и иных, а также процедуры защиты или решения в этой области в том случае, если совместное использование становится проблемой. ВМО поощряет финансирование и проведение исследований, направленных на определение последствий полной или частичной утраты одного или нескольких частотных полос, используемых ныне действующими оперативными системами наблюдений и запланированными системами. ВМО рекомендует также предоставлять результаты этих исследований группам МСЭ по радиосвязи и национальным ведомствам радиочастотного регулирования и телекоммуникационной промышленности для поощрения диалога между активными и пассивными пользователями радиочастотного спектра. Необходимо проявлять бдительность, поскольку со временем будет происходить деградация метеорологических данных, вызванная внесением помех и совместным использованием. Поощряется сотрудничество с национальными ведомствами радиочастотного регулирования, индустрией телекоммуникаций и с другими пользователями частотного спектра как для оказания поддержки жизненно важного использования радиочастотного спектра в метеорологических целях, так и для смягчения потенциальных проблем.

Наивысшим интересам всех стран соответствует защита радиочастот, существенно важных для метеорологической деятельности, которая является исключительно важной для точного прогнозирования неблагоприятной погоды. Изыскиваются и должны поддерживаться глобальные решения. ВМО активно участвует в международной деятельности по регламентированию частот по линии группы экспертов с глобальным представительством, с тем чтобы защищать действующие частотные полосы, используемые для проведения наблюдений в области метеорологии, климатологии и наблюдений за Землей, а также для получения новых полос частот, необходимых для осуществления исследований и оперативной деятельности.

Дополнительная информация имеется в руководстве под названием «Использование радиочастотного спектра в метеорологии: прогнозирование и мониторинг погоды, климата и качества воды», выпущенном совместно ВМО и МСЭ.

ПРИЛОЖЕНИЕ 7.C. РУКОВОДЯЩИЕ УКАЗАНИЯ ВМО ПО ВЗАИМОСОГЛАСОВАННОМУ РАЗМЕЩЕНИЮ МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИХ РАДИОЛОКАТОРОВ И ВЕТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВОК

ВМО выражает беспокойство в связи с увеличивающимися воздействиями ветроэнергетических установок на функционирование метеорологических радиолокаторов и подчеркивает необходимость надлежащей консультации, а также усилий по обеспечению защиты и смягчению воздействий. ВМО адресует свое беспокойство политикам, национальным органам, регламентирующим использование радиочастот, национальным гидрологическим и метеорологическим обществам, разработчикам ветроэнергетических установок, коммерческим продавцам этого оборудования и метеорологическому сообществу.

Защита данных метеорологических радиолокаторов имеет крайне важное значение для обеспечения постоянного функционирования и совершенствования метеорологического зондирования, мониторинга, прогнозирования и выпуска предупреждений, и в связи с этим она отвечает наивысшим интересам безопасности населения. Модели предсказания погоды и локализированные оперативные прогнозы во все большей степени зависят от национальных сетей наземных доплеровских метеорологических радиолокаторов и профилометров ветра для выпуска предупреждений о явлениях суровой погоды, таких как торнадо, быстроразвивающиеся бурные паводки, выходящие на сушу ураганы, и для прогнозирования осадков (дождь, снег, град), для предотвращения обледенения воздушных судов и управления воздушным движением/избегания неблагоприятных метеорологических явлений погоды. Во всем мире сети доплеровских радиолокаторов и профилометров ветра борются с возрастающей нагрузкой, возникающей в связи с эксплуатацией ветроэнергетических установок.

Ветроэнергетические установки уже оказывали воздействие на оперативные сети метеорологических радиолокаторов, создавая смешиваемые эхосигналы от земной поверхности, которые приводят к значительной потере данных или отображают ложные осадки для гидрологических применений. Вращающиеся лопасти могут стать причиной появления скоростей, которые потенциально могут быть приняты за явления суровой погоды, такие как торнадо. Хотя метеорологические радиолокаторы были добровольно перемещены разработчиками ветроэнергетических установок, как правило юрисдикция метеорологического сообщества не распространяется на вопросы расположения ветроэнергетических установок, и оно полагается на политику «добрососедских отношений» для осуществления сотрудничества и смягчения воздействий.

Разработка новых сетей радиолокаторов, профилометров ветра и ветроэнергетических установок потребует стратегического планирования для обеспечения смягчения последствий со стороны метеорологического сообщества и сообщества ветроэнергетических установок. ВМО и метеорологическое сообщество полагаются на уполномоченные международные и национальные ведомства, регламентирующие использование радиоволн, поддерживают их, будут активно поощрять и содействовать усилиям этих ведомств по поощрению и защите использования беспрепятственного пространства в метеорологических целях. ВМО призывает национальные радиоведомства разработать критерии допустимых препятствий и предоставить инструменты для оказания помощи разработчикам ветроэнергетических установок, которые будут им помогать в выборе мест для размещения таких установок.

Всемирная метеорологическая организация призывает разработчиков ветряных электростанций консультироваться с местными и национальными программами метеорологических радиолокаторов на ранних этапах планирования, чтобы свести к минимуму эксплуатационные конфликты с предупреждением и прогнозированием погоды. В каждой стране существуют свои собственные процедуры для предотвращения или минимизации негативного влияния на данные метеорологических радиолокаторов. Часто существуют инструменты и процессы оценки для облегчения выбора

местоположения и проектирования ветряных электростанций. В некоторых юрисдикциях разработаны операционные протоколы для снижения помех только при определенных опасных погодных условиях.

С большинством операторов метеорологических радиолокаторов и НМГС можно связаться через их веб-сайты для получения дополнительной информации и рекомендаций относительно информации о размещении и соглашений о смягчении последствий.

Расстояние между ветроэнергетическими установками и метеорологическими радиолокаторами может быть использовано для общего описания воздействия на качество данных радиолокаторов, а также использовано для обеспечения стратегии смягчения воздействий в целях совместного размещения метеорологических радиолокаторов и ветроэнергетических установок. Ниже приведены общие руководящие принципы для типовых радиолокаторов и примеры размещения на участках местности, которые могут потребовать внесения изменений в отдельных ситуациях и касаются конкретных радиолокаторов. Более мощные радиолокаторы, такие как радиолокаторы S-диапазона (длина волны 10 см) с меньшим ослаблением, могут потребовать увеличения пределов дальности, указанных в таблице.

ВМО поощряет финансирование и проведение исследований по разработке технологий для смягчения данного воздействия. Методы обработки сигналов с метеорологических радиолокаторов или использование других материалов для строительства ветроэнергетических установок могут ослаблять помехи на больших расстояниях. Помимо этого, ВМО рекомендует предоставлять результаты таких исследований производителям метеорологических радиолокаторов и ветроэнергетических установок.

Наивысшим интересом всех государств отвечает защита беспрепятственного пространства для метеорологических радиолокаторов и профилометров ветра, которые имеют существенное и крайне важное значение для точного прогнозирования неблагоприятной погоды. Изыскиваются местные, национальные и технологические решения. ВМО будет оказывать поддержку и предоставлять руководящий материал и инструменты для защиты беспрепятственного пространства для метеорологических радиолокаторов и профилометров ветра.

Расстояние	*Потенциальное воздействие*	*Руководящие указания*
0—5 км	Ветроэнергетическая установка может полностью или частично блокировать радиолокатор и может привести к значительной потере данных, которые не могут быть восстановлены.	Зона непосредственного воздействия: ветроэнергетическую установку не следует устанавливать в этой зоне.
5—20 км	Многократное отражение и множественное рассеяние могут создавать ложные эхосигналы и давать несколько параметров высот. Измерения доплеровской скорости могут быть искажены в результате вращающихся лопастей.	Зона умеренного воздействия: необходимо учитывать особенности ландшафта. Рекомендуется провести анализ и консультации. Изменение ориентации или размещения отдельных установок может уменьшить или смягчить воздействия.
20—45 км	Как правило, наблюдается при самом низком угле сканировании; в отражении будут наблюдаться эхосигналы, похожие на сигналы, отраженные от земной поверхности; доплеровские скорости могут искажаться в результате вращающихся лопастей.	Зона низкого воздействия: рекомендуется уведомление.

Расстояние	*Потенциальное воздействие*	*Руководящие указания*
> 45 км	Как правило, не наблюдается в данных, но может быть заметно в связи с условиями распространения.	Зона неравномерного воздействия: рекомендуется уведомление.

СПРАВОЧНАЯ И ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ЛИТЕРАТУРА

Ahnert, P.R., M. Hudlow, E. Johnson, D. Greene and M. Dias, 1983: Proposed on-site processing system for NEXRAD. *Preprints of the Twenty-first Conference on Radar Meteorology* (Edmonton, Canada), American Meteorological Society, Boston, 378–385.

Anagnostou, E.N., C.A. Morales and T. Dinku, 2001: The use of TRMM precipitation radar observations in determining ground radar calibration biases. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 18(4):616–628.

Aoyagi, J., 1983: A study on the MTI weather radar system for rejecting ground clutter. *Papers in Meteorology and Geophysics*, 33(4):187–243.

Aoyagi, J. and N. Kodaira, 1995: The reflection mechanism of radar rain echoes. *Preprints of the Twenty-seventh Conference on Radar Meteorology* (Vail, Colorado), American Meteorological Society, Boston, 246–248.

Atlas, D., 1964: Advances in radar meteorology. In: *Advances in Geophysics* (H.E. Landsberg and J. Van Meighem, eds.). Academic Press, New York, 10:317–479.

——— (ed.), 1990: *Radar in Meteorology*. American Meteorological Society, Boston.

Atlas, D., R.C. Srivastava and R.S. Sekhon, 1973: Doppler radar characteristics of precipitation at vertical incidence. *Reviews of Geophysics and Space Physics*, 11(1):1–35.

Battan, L.J., 1973: *Radar Observation of the Atmosphere*. University of Chicago Press, Chicago.

Baynton, H.W., 1979: The case for Doppler radars along our hurricane affected coasts. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 60(9):1014–1023.

Bean, B.R. and E.J. Dutton, 1966: *Radio Meteorology*. US Government Printing Office, Washington DC.

Bebbington, D.H.O., 1992: Degree of polarization as a radar parameter and its susceptibility to coherent propagation effects. *Preprints from URSI Commission F Symposium on Wave Propagation and Remote Sensing* (Ravenscar, United Kingdom), 431–436.

Bellon, A. and G.L. Austin, 1978: The evaluation of two years of real-time operation of a Short-Term Precipitation Forecasting Procedure (SHARP). *Journal of Applied Meteorology*, 17(12):1778–1787.

Berenguer, M., S. Park, D. Sempere-Torres, J. Didszun, M. Pool and M. Pfeifer, 2012: RAINSCANNER@Barcelona: an experiment to assess the hydrological value of a portable X-band radar. Preprints, *Seventh European Conference on Radar in Meteorology and Hydrology* (ERAD 2012), Toulouse, France.

Bringi, V.N. and V. Chandrasekar, 2001: *Polarimetric Doppler Weather Radar*, Cambridge University Press.

Bringi, V.N. and A. Hendry, 1990: Technology of polarization diversity radars for meteorology. In: *Radar in Meteorology* (D. Atlas, ed.). American Meteorological Society, Boston, 153–190.

Brown, R.A. and L.R. Lemon, 1976: Single Doppler radar vortex recognition: Part II – Tornadic vortex signatures. *Preprints of the Seventeenth Conference on Radar Meteorology* (Seattle, Washington), American Meteorological Society, Boston, 104–109.

Brown, R.A., V.T. Wood, R.M. Steadham, R.R. Lee, B.A. Flickinger and D. Sirmans, 2005: New WSR-88D Volume Coverage Pattern 12: Results of field tests. *Weather and Forecasting*, 20:385–393.

Browning, K.A. and C.G. Collier, 1982: An integrated radar-satellite nowcasting system in the United Kingdom. In: *Nowcasting* (K.A. Browning, ed.). Academic Press, London, 47–61.

Browning, K.A., C.G. Collier, P.R. Larke, P. Menmuir, G.A. Monk and R.G. Owens, 1982: On the forecasting of frontal rain using a weather radar network. *Monthly Weather Review*, 110:534–552.

Browning, K.A. and R. Wexler, 1968: The determination of kinematic properties of a wind field using Doppler radar. *Journal of Applied Meteorology*, 7:105–113.

Brunkow, D., 2001: *Sphere Calibrations, The Most Hated Experiment in Radar Meteorology*, RADCAL 2000 Workshop, AMS Short Course, Albuquerque, NM.

Burgess, D.W., 1976: Single Doppler radar vortex recognition: Part I – Mesocyclone signatures. *Preprints of the Seventeenth Conference on Radar Meteorology* (Seattle, Washington), American Meteorological Society, Boston, 97–103.

Burgess, D.W. and L.R. Lemon, 1990: Severe thunderstorm detection by radar. In: *Radar in Meteorology* (D. Atlas, ed.). American Meteorological Society, Boston, 619–647.

Burrows, C.R. and S.S. Attwood, 1949: *Radio Wave Propagation*. Academic Press, New York.

Byers, H.R., 1948: The use of radar in determining the amount of rain falling over a small area. *Transactions of the American Geophysical Union*, 187–196.

Chandrasekar, V. and L. Baldini, 2013: *RADCAL 2013*, AMS Short Course, Fort Collins, CO.

Chandrasekar, V., R. Meneghini and I. Zawadzki, 2003: Global and local precipitation measurements by radar. *Meteorological Monographs*, 30(52):215–215.

Cluckie, I.D. and M.E. Owens, 1987: Real-time rainfall run-off models and use of weather radar information. In: *Weather Radar and Flood Forecasting* (V.K. Collinge and C. Kirby, eds.). John Wiley and Sons, New York.

Collier, C.G., 1989: *Applications of Weather Radar Systems: A Guide to Uses of Radar Data in Meteorology and Hydrology*. John Wiley and Sons, Chichester, England.

Commission of the European Communities, 1990: *Une revue du programme ARAMIS* (J.L. Cheze). Seminar on Cost Project 73: Weather Radar Networking (Brussels, 5–8 September 1989), 80–85.

Crook, N.A. and J. Sun, 2002: Assimilating radar, surface, and profiler data for the Sydney 2000 Forecast Demonstration Project. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 19:888–898.

Crozier, C.L., P. Joe, J. Scott, H. Herscovitch and T. Nichols, 1991: The King City operational Doppler radar: Development, all-season applications and forecasting. *Atmosphere-Ocean*, 29:479–516.

Crum, T.D. and R.L. Alberty, 1993: The WSR-88D and the WSR-88D Operational Support Facility. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 74(9):1669–1687.

Dennis, A.S., C.A. Schock and A. Koscielski, 1970: Characteristics of hailstorms of western South Dakota. *Journal of Applied Meteorology*, 9:127–135.

Dexter, P.E., M.L. Heron and J.F. Ward, 1982: Remote sensing of the sea-air interface using HF radars. *Australian Meteorological Magazine*, 30:31–41.

Dixon, M. and G. Wiener, 1993: TITAN: Thunderstorm identification, tracking, analysis, and nowcasting – A radar-based methodology. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 10(6):785–797.

Donaldson, R.J., Jr., 1970: Vortex signature recognition by a Doppler radar. *Journal of Applied Meteorology*, 9:661–670.

Doneaud, A.A., S. Ionescu-Niscov, D.L. Priegnitz and P.L. Smith, 1984: The area-time integral as an indicator for convective rain volumes. *Journal of Climate and Applied Meteorology*, 23:555–561.

Doneaud, A.A., J.R. Miller Jr., L.R. Johnson, T.H. Vonder Haar and P. Laybe, 1987: The area-time integral technique to estimate convective rain volumes over areas applied to satellite data: A preliminary investigation. *Journal of Climate and Applied Meteorology*, 26:156–169.

Doviak, R.J. and D.S. Zrnić, 1993: *Doppler Radar and Weather Observations*. Second edition, Academic Press, San Diego.

Dupuy, P., S. Matthews, N. Gaussia, R. Scovel and A. Kergomard, 2010: Developing a European Radar Data Centre. Preprints, *Sixth European Conference on Radar in Meteorology and Hydrology* (ERAD 2010), Sibiu, Romania.

Eccles, P.J. and D. Atlas, 1973: A dual-wavelength radar hail detector. *Journal of Applied Meteorology*, 12:847–854.

Eilts, M.D. and S.D. Smith, 1990: Efficient dealiasing of Doppler velocities using local environment constraints. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 7:118–128.

English, M.E., B. Kochtubajda, F.D. Barlow, A.R. Holt and R. McGuiness, 1991: Radar measurement of rainfall by differential propagation phase: A pilot experiment. *Atmosphere-Ocean*, 29:357–380.

Fabry, F., 2004: Meteorological value of ground target measurements by radar. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 21:560–573.

Fabry, F., C. Augros and A. Bellon, 2013: The case of sharp velocity transitions in high vertical wind shear when measuring Doppler velocities with narrow Nyquist intervals. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 30:389–394.

Federer, B., A. Waldvogel, W. Schmid, F. Hampel, Rosini, D. Vento and P. Admirat, 1978: Grossversuch IV: Design of a randomized hail suppression experiment using the Soviet method. *Pure and Applied Geophysics*, 117:548–571.

Frush, C., R.J. Doviak, M. Sachidananda and D.S. Zrnić, 2002: Application of the SZ phase code to mitigate range – Velocity ambiguities in weather radars. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 19:413–430.

Germann, U., G. Galli, M. Boscacci and M. Bolliger, 2006*a*: Radar precipitation measurement in a mountainous region. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 132:1669–1692.

Germann, U., I. Zawadzki and B. Turner, 2006*b*: Predictability of precipitation from continental radar images. Part IV: Limits to prediction. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 63:2092–2108.

Gossard, E.E. and R.G. Strauch, 1983: *Radar Observations of Clear Air and Clouds*. Elsevier Scientific Publication, Amsterdam.

Harlan, J.A. and T.M. Georges, 1994: An empirical relation between ocean-surface wind direction and the Bragg line ratio of HF radar sea echo spectra. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 99(C4):7971–7978.

Heiss, W.H., D.L. McGrew and D. Sirmans, 1990: NEXRAD: Next generation weather radar (WSR-88D). *Microwave Journal*, 33(1):79–98.

Holleman, I., 2001: *Hail Detection Using Single-polarization Radar*. Scientific Report, Royal Netherlands Meteorological Institute (KNMI), WR-2001-01, De Bilt.

Holleman, I., H.R.A. Wessels, J.R.A. Onvlee and S.J.M. Barlag, 2000: Development of a hail-detection product. *Physics and Chemistry of the Earth*, Part B, 25:1293–1297.

Holt, A.R., M. Chandra and S.J. Wood, 1995: Polarisation diversity radar observations of storms at C-band. *Preprints of the Twenty-seventh Conference on Radar Meteorology* (Vail, Colorado), American Meteorological Society, Boston, 188–189.

Holt, A.R., P.I. Joe, R. McGuinness and E. Torlaschi, 1993: Some examples of the use of degree of polarization in interpreting weather radar data. *Proceedings of the Twenty-sixth International Conference on Radar Meteorology*, American Meteorological Society, 748–750.

Hubbert, J.C., M. Dixon, S.M. Ellis and G. Meymaris, 2009*a*: Weather radar ground clutter. Part I: Identification, modeling, and simulation. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 26:1165–1180.

Hubbert, J.C., M. Dixon and S.M. Ellis, 2009*b*: Weather radar ground clutter. Part II: Real-time identification and filtering. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 26:1181–1197.

Joe, P., 1999: Beamheight Statistics for Low Elevation Scans. Paper, *Twenty-ninth AMS Radar Conference*, Montreal, American Meteorological Society, Boston, 922–925.

———, 2001: RADCAL 2000 Workshop, AMS Short Course, Albuquerque, NM.

———, 2010: RADMON Workshop, *Sixth European Conference on Radar in Meteorology and Hydrology* (ERAD 2010), Sibiu, Romania.

Joe, P., D. Burgess, R. Potts, T. Keenan, G. Stumpf and A. Treloar, 2004: The S2K severe weather detection algorithms and their performance. *Weather and Forecasting*, 19:43–63.

Joe, P., S. Dance, V. Lakshmanan, D. Heizenrehder, P. James, P. Lang, T. Hengstebeck, Y. Feng, P.W. Li, H.Y. Yeung, O. Suzuki, K. Doi and J. Dai, 2012: Automated processing of Doppler radar data for severe weather forecasting. In: *Doppler Radar Observations, Weather Radar, Wind Profiler, Ionospheric Radar and other Advanced Applications* (J. Bech and J.L. Chau, eds.), Intech.

Joe, P., M. Falla, P. Van Rijn, L. Stamadianos, T. Falla, D. Magosse, L. Ing and J. Dobson, 2002: Radar data processing for severe weather in the national radar project of Canada. Preprints, *Twenty-first Conference on Severe Local Storms*, San Antonio, 12–16 August 2002, 221–224.

Joe, P. and P.T. May, 2003: Correction of dual PRF velocity errors for operational Doppler weather radars. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 20(4):429–442.

Joe, P., R.E. Passarelli and A.D. Siggia, 1995: Second trip unfolding by phase diversity processing. *Preprints of the Twenty-seventh Conference on Radar Meteorology* (Vail, Colorado), American Meteorological Society, Boston, 770–772.

Joe, P., B. Scott, C. Doyle, G. Isaac, I. Gultepe, D. Forsyth, S. Cober, E. Campos, I. Heckman, N. Donaldson, D. Hudak, R. Rasmussen, R. Stewart, J.M. Thériault, H. Carmichael, M. Bailey and F. Boudala, 2014: The monitoring network of the Vancouver 2010 Olympics. *Pure and Applied Geophysics*, 171(1):25–58.

Joint Doppler Operational Project (JDOP), 1979: *Final Report on the Joint Doppler Operational Project*. NOAA Technical Memorandum, ERL NSSL-86, Norman, Oklahoma, National Severe Storms Laboratory.

Joss, J. and R.W. Lee, 1993: Scan strategy, clutter suppression calibration and vertical profile corrections. *Preprints of the Twenty-sixth Conference on Radar Meteorology* (Norman, Oklahoma), American Meteorological Society, Boston, 390–392.

Joss, J. and A. Waldvogel, 1990: Precipitation measurement and hydrology. In: *Radar in Meteorology* (D. Atlas, ed.). American Meteorological Society, Boston, 577–606.

Keeler, R.J., C.A. Hwang and E. Loew, 1995: Pulse compression weather radar waveforms. *Preprints of the Twenty-seventh Conference on Radar Meteorology* (Vail, Colorado), American Meteorological Society, Boston, 767–769.

Keenan, T.D. and S.J. Anderson, 1987: Some examples of surface wind field analysis based on Jindalee skywave radar data. *Australian Meteorological Magazine*, 35:153–161.

Lakshmanan, V., T. Smith, G. Stumpf and K. Hondl, 2007: The Warning Decision Support System–Integrated Information. *Weather and Forecasting*, 22:596–612.

Leber, G.W., C.J. Merrit and J.P. Robertson, 1961: WSR-57 analysis of heavy rains. *Preprints of the Ninth Weather Radar Conference*, American Meteorological Society, Boston, 102–105.

Lee, R., G. Della Bruna and J. Joss, 1995: Intensity of ground clutter and of echoes of anomalous propagation and its elimination. *Preprints of the Twenty-seventh Conference on Radar Meteorology* (Vail, Colorado), American Meteorological Society, Boston, 651–652.

Lemon, L.R., 1978: *New Severe Thunderstorm Radar Identification Techniques and Warning Criteria: A Preliminary Report*. NOAA Technical Memorandum, NWS NSSFC-1, Kansas City, National Severe Storms Forecast Center.

———, 1998: The radar "three-body scatter spike": An operational large-hail signature. *Weather and Forecasting,* 13:327–340.

Lemon, L.R., D.W. Burgess and R.A. Brown, 1978: Tornadic storm airflow and morphology derived from single-Doppler radar measurements. *Monthly Weather Review*, 106:48–61.

Leone, D.A., R.M. Endlich, J. Petriceks, R.T.H. Collis and J.R. Porter, 1989: Meteorological considerations used in planning the NEXRAD network. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 70:4–13.

Lhermitte, R. and D. Atlas, 1961: Precipitation motion by pulse Doppler radar. *Preprints of the Ninth Weather Radar Conference*, American Meteorological Society, Boston, 218–233.

López, P., 2011: Direct 4D-Var assimilation of NCEP stage IV radar and gauge precipitation data at ECMWF. *Monthly Weather Review*, 139:2098–2116.

Makihara, Y., 2000: Algorithms for precipitation nowcasting focused on detailed analysis using radar and raingauge data. *Technical Report of the Meteorological Research Institute*, Japan Meteorological Agency, 39:63–111.

Markowski, P.M., 2002: Hook echoes and rear-flank downdrafts: A review. *Monthly Weather Review*, 130:852–876.

Marshall, J.S. and E.H. Ballantyne, 1978: Weather Surveillance Radar. *Journal of Applied Meteorology*, 14(7):1317–1338.

Marshall, J.S. and K.L.S. Gunn, 1952: Measurement of snow parameters by radar. *Journal of Meteorology*, 9:322–327.

Marshall, J.S. and W.M. Palmer, 1948: The distribution of raindrops with size. *Journal of Meteorology*, 5:165–166.

McLaughlin, D., D. Pepyne, B. Philips, J. Kurose, M. Zink, D. Westbrook, E. Lyons, E. Knapp, A. Hopf, A. Defonzo, R. Contreras, T. Djaferis, E. Insanic, S. Frasier, V. Chandrasekar, F. Junyent, N. Bharadwaj, Y. Wang, Y. Liu, B. Dolan, K. Droegemeier, J. Brotzge, M. Xue, K. Kloesel, K. Brewster, F. Carr, S. Cruz-Pol, K. Hondl and P. Kollias, 2009: Short-wavelength technology and the potential for distributed networks of small radar systems. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 90(12):1797–1817.

Meischner, P. (ed.), 2003: *Weather Radar: Principles and Advanced Applications*, Springer, Berlin.

Melnikov, V., D.S. Zrnić, R.J. Dovink and J.K. Carter, 2002: Status of the dual polarization upgrade on the NOAA's research and development WSR-88D. *Preprints of the Eighteenth International Conference on Interactive Information Processing Systems* (Orlando, Florida), American Meteorological Society, Boston, 124–126.

Michelson, D., R. Gill, M. Peura and J. Szturc, 2010: Community-based weather radar networking with BALTRAD. Preprints, *Sixth European Conference on Radar in Meteorology and Hydrology* (ERAD 2010), Sibiu, Romania.

Michelson, D.B., P.I. Joe, D. Lockett, S. Goldstraw, L. Bai, A. Becker, K.P. Georgakakos, S. Foreman, E. Fucile, R. Giraud, N. Gaussiat, T. Hohmann, A. Kamilliddin, M. Kitchen, E. Kyte, J.F. Mahfouf, S. Matthews, J.M. de Rezende, O. Sireci, M.A. de Barros Teixeira and E. Wattrelot, 2013: WMO initiative for the global exchange of radar data. Manuscript, *Thirty-sixth AMS Radar Meteorology Conference*, Breckenridge, CO, American Meteorological Society.

Michelson, M., W.W. Schrader and J.G. Wilson, 1990: Terminal Doppler weather radar. *Microwave Journal*, 33(2):139–148.

Mie, G., 1908: Beiträge zur Optik träber Medien, speziell kolloidaler Metalläsungen. *Annalen der Physik*, 25:377–445.

Mueller, C.K. and R.E. Carbone, 1987: Dynamics of a thunderstorm outflow. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 44:1879–1898.

Mueller, E.A., S.A. Rutledge, V.N. Bringi, D. Brunkow, P.C. Kennedy, K. Pattison, R. Bowie and V. Chandrasekar, 1995: CSU-CHILL radar upgrades. *Preprints of the Twenty-seventh Conference on Radar Meteorology* (Vail, Colorado), American Meteorological Society, Boston, 703–706.

Neff, E.L., 1977: How much rain does a rain gauge gage? *Journal of Hydrology*, 35:213–220.

Passarelli, R.E., Jr., P. Romanik, S.G. Geotis and A.D. Siggia, 1981: Ground clutter rejection in the frequency domain. *Preprints of the Twentieth Conference on Radar Meteorology* (Boston, Massachusetts), American Meteorological Society, Boston, 295–300.

Probert-Jones, J.R., 1962: The radar equation in meteorology. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 88:485–495.

Ray, P.S., C.L. Ziegler, W. Bumgarner and R.J. Serafin, 1980: Single- and multiple-Doppler radar observations of tornadic storms. *Monthly Weather Review*, 108:1607–1625.

Rinehart, R.E., 2004: *Radar for Meteorologists*. 4th Edition, Rinehart Publishing.
Ruggiero, F.H. and R.J. Donaldson, Jr., 1987: Wind field derivatives: A new diagnostic tool for analysis of hurricanes by a single Doppler radar. *Preprints of the Seventeenth Conference on Hurricanes and Tropical Meteorology* (Miami, Florida), American Meteorological Society, Boston, 178–181.
Sauvageot, H., 1982: *Radarmétéorologie*. Eyrolles, Paris.
———, 1994: Rainfall measurement by radar: A review. *Atmospheric Research*, 35:27–54.
Seed, A.W., 2003: A dynamic and spatial scaling approach to advection forecasting. *Journal of Applied Meteorology*, 42(3):381–388.
Seliga, T.A. and V.N. Bringi, 1976: Potential use of radar differential reflectivity measurements at orthogonal polarizations for measuring precipitation. *Journal of Applied Meteorology*, 15:69–76.
Seltmann, J.E.E., T. Hohmann, M. Frech and P. Tracksdorf, 2013: DWD's new operational scan strategy. *Thirty-sixth AMS Radar Meteorology Conference*, 16–20 September 2013, Breckenridge, CO, poster 329.
Shearman, E.D.R., 1983: Radio science and oceanography. *Radio Science*, 18(3):299–320.
Sireci, O., P. Joe, S. Eminoglu and K. Akylidiz, 2010: A comprehensive worldwide web-based weather radar database. Preprints, *Sixth European Conference on Radar in Meteorology and Hydrology* (ERAD 2010), Sibiu, Romania.
Skolnik, M.I. (ed.), 1970: *Radar Handbook*. McGraw-Hill, New York.
——— (ed.), 1990: *Radar Handbook*. Second edition, McGraw-Hill, New York.
Smith, P.L., 1990: Precipitation measurement and hydrology: Panel report. In: *Radar in Meteorology* (D. Atlas, ed.). American Meteorological Society, Boston, 607–618.
———, 1995: Dwell time considerations for weather radars. *Preprints of the Twenty-seventh Conference on Radar Meteorology* (Vail, Colorado), American Meteorological Society, Boston, 760–762.
Smull, B.S. and R.A. Houze Jr., 1987: Rear inflow in squall lines with trailing stratiform precipitation. *Monthly Weather Review*, 115(12):2869–2889.
Strauch, R.G., 1981: Comparison of meteorological Doppler radars with magnetron and klystron transmitters. *Preprints of the Twentieth Conference on Radar Meteorology* (Boston, Massachusetts), American Meteorological Society, Boston, 211–214.
Sun, J., M. Xue, J.W. Wilson, I. Zawadzki, S.P. Ballard, J. Onvlee-Hooimeyer, P. Joe, D. Barker, P.W. Li, B. Golding, M. Xu and J. Pinto, 2013: Use of NWP for nowcasting convective precipitation: Recent progress and challenges. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 95:409–426.
Tapping, K., 2001: Antenna Calibration using 10.7cm Solar Flux, RADCAL 2000, AMS Short Course, Albuquerque, NM.
Treloar, A., 1998: Vertically integrated radar reflectivity as an indicator of hail size in the greater Sydney region of Australia. *Preprints of the Nineteenth Conference on Severe Local Storms*, Minneapolis, MN, American Meteorological Society, 48–51.
Turner, B.J., I. Zawadzki and U. Germann, 2004: Predictability of precipitation from continental radar images. Part III: Operational nowcasting implementation (MAPLE). *Journal of Applied Meteorology*, 43:231–248.
Ulbrich, C.W. and D. Atlas, 1984: Assessment of the contribution of differential polarization to improve rainfall measurements. *Radio Science*, 19(1):49–57.
Weber, M.E., J.Y.N. Cho, J.S. Herd, J.M. Flavin, W.E. Benner and G.S. Torok, 2007: The next-generation multimission U.S. surveillance radar network. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 88(11):1739–1751.
Wiener, N., 1964: *Time Series*. M.I.T. Press, Cambridge, Massachusetts.
Wilson, J.W. and E.A. Brandes, 1979: Radar measurement of rainfall – A summary. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 60(9):1048–1058.
Wilson, J.W., N.A. Crook, C.K. Mueller, J. Sun and M. Dixon, 1998: Nowcasting thunderstorms: A status report. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 79(10):2079–2099.
Wilson, J.W. and W.E. Schreiber, 1986: Initiation of convective storms at radar-observed boundary-layer convergence lines. *Monthly Weather Review*, 114:2516–2536.
Wilson, J.W., T.M. Weckwerth, J. Vivekanandan, R.M. Wakimoto, R.W. Russell, 1994: Origin of echoes and accuracy of derived winds. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 11(5):1184–1206.
Witt, A., M. Eilts, G. Stumpf, J. Johnson, D. Mitchell and K. Thomas, 1998: An enhanced hail detection algorithm for the WSR-88D. *Weather and Forecasting*, 13:286–303.
Wolff, D.B. and B.L. Kelley, 2009: NASA's Radar Software Library (RSL) and RSL in IDL. Paper, *Thirty-fourth AMS Radar Conference*, Breckenridge, CO.
Wood, V.T. and R.A. Brown, 1986: Single Doppler velocity signature interpretation of nondivergent environmental winds. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 3:114–128.

World Meteorological Organization, 1985: *Use of Radar in Meteorology* (G.A. Clift). Technical Note No. 181 (WMO-No. 625). Geneva.

———, 2012: Operational use of dual-polarisation: lessons learned at Météo France after 8 years of experience at all wavelengths (S/C/X) (P. Tabary). *Papers 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.

Wurman, J., M. Randall and C. Burghart, 1995: Real-time vector winds from a bistatic Doppler radar network. *Preprints of the Twenty-seventh Conference on Radar Meteorology* (Vail, Colorado), American Meteorological Society, Boston, 725–728.

Wurman, J., J.M. Straka and E.N. Rasmussen, 1996 : Fine-scale Doppler radar observations of tornadoes. *Science*, 272:1774–1777.

Xue, M., K. Kloesel, K. Brewster, F. Carr, S. Cruz-Pol, K. Hondl and P. Kollias, 2009: Short-wavelength technology and the potential for distributed networks of small radar systems. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 90(12):1797–1817.

Yamauchi, H., A. Adachi, O. Suzuki and T. Kobayashi, 2013: Precipitation estimate of a heavy rain event using a C-band solid-state polarimetric radar. Preprints, *Seventh European Conference on Radar in Meteorology and Hydrology* (ERAD 2012), Toulouse, France.

Zhang, J., K. Howard and J.J. Gourley, 2005: Constructing three-dimensional multiple-radar reflectivity mosaics: Examples of convective storms and stratiform rain echoes. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 22:30–42.

Zrnić, D.S. and S. Hamidi, 1981: *Considerations for the Design of Ground Clutter Cancelers for Weather Radar*. Report DOT/FAA/RD-81/72, NTIS.

Zrnić, D.S. and A.V. Ryzhkov, 1995: Advantages of rain measurements using specific differential phase. *Preprints of the Twenty-seventh Conference on Radar Meteorology* (Vail, Colorado), American Meteorological Society, Boston, 35–37.

Zrnić, D.S., A. Ryzhkov, J. Straka, Y. Liu and J. Vivekanandan, 2001: Testing a procedure for automatic classification of hydrometeor types. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 18:892–913.

Zrnić, D.S., G. Zhang, V. Melnikov and J. Andric, 2010: Three-body scattering and hail size. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 49:687–700.

ГЛАВА 8. МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИЕ ШАРЫ-ЗОНДЫ

8.1 ОБОЛОЧКИ

8.1.1 Основные виды оболочек

В метеорологии используются следующие два основных типа оболочек:

a) шары-пилоты, применяемые для визуальных измерений ветра на высотах и высоты нижней границы облаков, обычно поднимают небольшой груз и поэтому значительно меньше радиозондовых баллонов. Они почти всегда представляют собой эластичный шар, а основное требование к ним, помимо способности достигать достаточной высоты, заключается в том, что при подъеме они должны сохранять строго шарообразную форму;

b) оболочки, используемые для подъема записывающих или передающих приборов при регулярных аэрологических наблюдениях, как правило, имеют шарообразную форму и могут растягиваться. Обычно они известны как радиозондовые баллоны или шары-зонды. Их размер и качество должны обеспечивать подъем требуемого груза (обычно от 200 г до 1 кг) на высоту до 35 км (WMO, 2002) со скоростью подъема, при которой обеспечивается достаточная вентиляция датчиков и измерительных элементов. Для измерения ветра на высотах радиолокационными методами используются большие шары-пилоты (100 г) или шары-зонды, причем размер оболочек зависит от массы поднимаемого оборудования и от его аэродинамических характеристик.

Оболочки других типов, используемые для специальных целей, в этой главе не описываются. Уравновешенные шары-зонды, которые поднимаются и держатся в воздухе на заранее определенном уровне, делают из нерастягивающегося материала. Большие шары-зонды постоянного уровня при запуске наполняются не в полном объеме. Шары-зонды постоянного уровня со сверхвысоким давлением наполняются при запуске до полного растяжения. Тетроны представляют собой небольшие уравновешенные шары-зонды сверхвысокого давления четырехгранной формы, которые используются для изучения траекторий. Использование привязных аэростатов для получения профилей обсуждается в данном томе, глава 5.

8.1.2 Материалы для оболочек и их свойства

Наилучшими материалами для изготовления растягиваемых оболочек являются высококачественный природный каучуковый латекс и синтетический латекс, основанный на полихлоропрен. Изделия из натурального латекса держат форму лучше, чем полихлоропреновые, и являются более прочными. Их также можно изготовлять из более толстой пленки для придания им определенных характеристик. Они менее подвержены воздействию температуры, но в большей степени реагируют на озон и ультрафиолетовое излучение на больших высотах, и срок хранения их меньше. Оба материала могут смешиваться с различными добавками для увеличения срока их хранения, повышения прочности и улучшения их характеристик при низких температурах как во время хранения, так и в ходе полета, а также для того, чтобы на них меньше сказывалось влияние озона и ультрафиолетового излучения. В процессе изготовления оболочек, предназначенных для наполнения водородом, в качестве меры предохранения от взрыва можно добавлять антистатик.

Существуют два основных способа изготовления растяжимых оболочек. Оболочка может быть произведена путем погружения формы в латексную эмульсию или посредством формирования ее на внутренней поверхности полой формы. В последнем случае можно изготовить более однородные по толщине оболочки, что желательно для достижения

больших высот, поскольку при этом оболочка растягивается; горловина может изготовляться как единое целое с остальной частью оболочки, что дает возможность избежать образования возможного слабого участка.

Нерастягивающимся материалом, используемым для производства уравновешенных шаров-зондов, является полиэтилен.

8.1.3 Технические характеристики оболочек

Готовые оболочки должны быть свободны от посторонних вкраплений, мельчайших проколов или других дефектов; они также должны быть однородными и иметь одинаковую толщину материала. Диаметр их горловины должен составлять 1–5 см, а длина 10–20 см в зависимости от размера оболочки; горловина радиозондовой оболочки должна выдерживать воздействие с силой в 200 Н без разрыва. Для того чтобы уменьшить возможность отрыва горловины, важно, чтобы толщина материала оболочки постепенно увеличивалась по направлению к горловине. Резкое изменение толщины уменьшает прочность.

Оболочки различаются по размеру – их номинальной массе в граммах. Фактическая масса отдельных оболочек не должна отличаться от установленной номинальной массы больше чем на 10 %, а предпочтительнее на 5 %. Их расширение должно быть, по крайней мере, четырехкратным, а желательно пяти- или шестикратным по отношению к диаметру нерастянутой оболочки, и такое расширение должно сохраняться как минимум в течение часа. Наполненные оболочки должны иметь шарообразную или грушевидную форму.

Важным представляется вопрос о сроке хранения оболочек, особенно в тропических условиях. Существуют испытания на искусственное старение, однако они не дают надежных результатов. Одно из таких испытаний заключается в том, что образцы оболочек держат в печи при температуре 80 °C в течение четырех дней, что примерно соответствует четырем годам хранения в тропиках, после чего эти образцы должны по-прежнему удовлетворять требованиям минимального растяжения. Во избежание быстрой порчи оболочек их следует тщательно упаковывать для предохранения от воздействия света (особенно солнечного), свежего воздуха и экстремальных температур.

Оболочки, изготовленные из синтетического латекса, содержат пластификатор, предотвращающий уплотнение или замерзание пленки при низких температурах, наблюдающихся вблизи тропопаузы и выше нее. Некоторые изготовители предлагают оболочки, предназначенные для использования только в ночное или в дневное время, причем содержание пластификатора в них различно.

8.2 СВОЙСТВА ОБОЛОЧЕК

8.2.1 Скорость подъема

В соответствии с принципом плавучести полная подъемная сила шара определяется подъемной силой находящегося в нем газа следующим образом:

$$T = V\left(\rho - \rho_g\right) = 0{,}523\, D^3\left(\rho - \rho_g\right) \qquad (8.1)$$

где T — полная подъемная сила; V — объем шара; ρ — плотность воздуха; ρ_g — плотность газа; D — диаметр оболочки (предполагается, что она имеет форму шара).

Все величины выражены в единицах СИ. Для водорода на уровне земной поверхности подъемная сила ($\rho - \rho_g$) составляет около 1,2 кг·м$^{-3}$. Все величины в уравнении 8.1 изменяются с высотой.

Свободная подъемная сила шара L есть величина, на которую полная подъемная сила превышает общий вес W оболочки и груза (если таковой имеется):

$$L = T - W \tag{8.2}$$

т. е. это результирующая подъемная сила или дополнительный вес, который оболочка со всеми принадлежностями будет выдерживать, не поднимаясь и не опускаясь.

Используя принцип динамического подобия, можно показать, что скорость подъема V шара в неподвижном воздухе можно выразить общей формулой.

$$V = \frac{qL^n}{\left(L + W\right)^{1/3}} \tag{8.3}$$

в которой q и n зависят от коэффициента торможения и, следовательно, от числа Рейнольдса $v\rho D/\mu$ (где μ — вязкость воздуха). К сожалению, для большого числа метеорологических оболочек на некоторых стадиях полета число Рейнольдса находится в пределах критической области $1 \cdot 10^5 - 3 \cdot 10^5$, где наблюдается быстрое изменение коэффициента торможения; при этом форма оболочек может отличаться от шарообразной. Поэтому представляется практически нецелесообразным использование простой формулы, применимой для оболочек различных размеров и имеющих разную свободную подъемную силу. Следовательно, значения q и n в приведенной выше формуле надо определять экспериментальным путем; как правило, очень приближенно их можно принять равными 150 и 0,5 соответственно в том случае, если скорость подъема выражается в м·мин$^{-1}$. Другие факторы, такие как изменение плотности воздуха и утечка газа, также могут влиять на скорость подъема и вызывать ощутимые ее колебания в зависимости от высоты.

При зондировании в условиях выпадения осадков или обледенения может потребоваться увеличение свободной подъемной силы почти на 75 % в зависимости от сложности обстановки. Предполагаемую скорость подъема не следует использовать при выпадении любых осадков, за исключением слабых. Точные данные о скорости подъема обычно не требуются. Однако они необходимы при проведении шаропилотных измерений ветра или определении нижней границы облаков, когда нет других средств определения высоты. Скорость подъема зависит, главным образом, от свободной подъемной силы и сопротивления воздуха, действующего на оболочку и подвес. Сопротивление может быть более важным, особенно в случае отклонения формы оболочки от сферической. Максимальная высота подъема зависит, главным образом, от полной подъемной силы и от размера и качества оболочки.

8.2.2 **Эксплуатационные качества оболочек**

В таблице в данном разделе приводятся типичные значения характеристик оболочек различных размеров. Они являются весьма приблизительными. Если необходима точная информация о характеристиках конкретных оболочки и подвеса, то она должна быть получена путем анализа фактических запусков. Полезная нагрузка, которую несет оболочка, может быть больше указанной в таблице в том случае, если увеличивается полная подъемная сила. Это достигается путем использования большего объема газа, что приводит к увеличению объема оболочки и, следовательно, влияет на скорость подъема и максимальную высоту.

Типичные характеристики оболочек

Вес (г)	10	30	100	200	350	600	1000	1500	3000
Диаметр при выпуске (см)	30	50	90	120	130	140	160	180	210
Полезная нагрузка (г)	0	0	0	250	250	250	250	1000	1000
Свободная подъемная сила (г)	5	60	300	500	600	900	1100	1300	1700
Скорость подъема ($м \cdot мин^{-1}$)	60	150	250	300	300	300	300	300	300
Максимальная высота подъема (км)	12	13	20	21	26	31	34	34	38

При выборе оболочки для метеорологических целей руководствуются массой поднимаемого груза, если таковой имеется, скоростью подъема, требуемой высотой, возможным использованием оболочки для визуального слежения, а также облачным покровом в том, что касается ее цвета. Как правило, предпочтительнее высокая скорость подъема — от 300 до 400 $м \cdot мин^{-1}$, это позволяет сократить время наблюдения и при необходимости обеспечить достаточную вентиляцию датчиков радиозонда. При выборе оболочки необходимо помнить, что достигаемая высота обычно меньше в тех случаях, когда температура при запуске очень низкая.

При использовании воздушных шаров в регулярных наблюдениях предпочтителен свободный подъем, при котором высота разрыва оптимальна. Например, было установлено, что уменьшение средней скорости подъема от 390 до 310 $м \cdot мин^{-1}$ при использовании некоторых шаров среднего размера с уменьшенным количеством газа может позволить увеличить высоту разрыва в среднем на 2 км. Полученные данные о высоте разрыва следует сохранять и анализировать, для того чтобы убедиться в оптимальности достигнутых результатов.

Визуальные наблюдения легче проводить при использовании неокрашенных оболочек в ясные солнечные дни и окрашенных в темные тона в пасмурные дни.

Характеристики оболочки лучше всего определяются по максимальному линейному растяжению, которое она выдерживает до разрыва, и наиболее удобным способом его выражения является соотношение диаметра (или длины окружности) в момент разрыва к диаметру нерастянутой оболочки. Однако характеристики оболочки в полете не всегда совпадают с характеристиками, определенными в ходе испытания на разрыв на земле. На эти характеристики может повлиять неосторожное обращение с оболочкой во время ее наполнения, а также напряжение во время запуска при сильном ветре. В полете на растяжимость оболочки может повлиять потеря эластичности при низкой температуре, химическая активность кислорода и озона и ультрафиолетовое излучение, а также производственные дефекты, например свищи или неоднородность латексной пленки. Однако на практике оболочка, обладающая удовлетворительными качествами, должна выдерживать по меньшей мере четырехкратное растяжение. Толщина пленки при запуске обычно колеблется от 0,1 до 0,2 мм.

Во время подъема внутри оболочки всегда существует небольшое избыточное давление p_1, достигающее нескольких гектопаскалей и обусловленное натяжением

каучука. Это устанавливает предел по отношению к внешнему давлению, которое может быть достигнуто. Можно показать, что при одинаковой температуре внутри и вне оболочки предельное давление p описывается выражением:

$$p = \left(\frac{1,07W}{L_0} + 0,075 \right) p_1 \cong \frac{W p_1}{L_0} \tag{8.4}$$

где W — масса оболочки и аппаратуры, а L_0 — свободная подъемная сила на уровне земной поверхности; и то и другое выражается в граммах. Если оболочка способна достичь высоты, соответствующей p, то на этой высоте она будет дрейфовать.

8.3 ОБРАЩЕНИЕ С ОБОЛОЧКАМИ

8.3.1 Хранение

Очень важно правильно хранить радиозондовые оболочки для того, чтобы их качество не ухудшалось после нескольких месяцев хранения. Рекомендуется ограничивать запасы оболочек тем минимумом, который требуется для оперативных нужд. Там, где это возможно, частые поставки оболочек предпочтительнее, чем закупки их в большом количестве с последующим длительным хранением. Во избежание необходимости использования оболочек, хранившихся длительное время, их следует расходовать в порядке дат их изготовления.

Оптимальная сохранность обычно обеспечивается в течение приблизительно 18 месяцев после изготовления при условии тщательного соблюдения условий хранения. Многие изготовители составляют инструкции к своим оболочкам, которые следует тщательно соблюдать. Однако нижеследующие общие рекомендации применимы для большинства типов радиозондовых оболочек.

Оболочки следует предохранять от прямого воздействия солнечного света и по возможности хранить в темноте. Ни в коем случае нельзя их хранить рядом с источником тепла или озона. Свойства полихлоропреновых оболочек или оболочек, изготовленных из смеси полихлоропрена и натурального каучука, могут ухудшаться при воздействии озона, выделяемого в процессе работы больших электрогенераторов или электродвигателей. Все оболочки следует хранить в их оригинальной упаковке до момента предполетной подготовки. Необходимо следить за тем, чтобы они не соприкасались с маслами или любыми другими веществами, которые могут просочиться сквозь упаковку и повредить оболочку.

Везде, где можно, оболочки следует хранить в помещении при температуре от 15 до 25 °C; некоторые изготовители дают особые указания на этот счет, которым необходимо следовать.

8.3.2 Подготовка к запуску

Оболочки, изготовленные из натурального каучука, перед использованием не требуют специальной тепловой обработки, поскольку натуральный каучук не замерзает при обычных для жилых и служебных помещений температурах. Однако желательно, чтобы оболочки, которые длительное время хранились при температуре 10 °C, выдерживались при комнатной температуре в течение нескольких недель перед их использованием.

Полихлоропреновые оболочки при длительном хранении при температуре ниже 10 °C частично теряют свою эластичность. Для получения наилучших результатов необходимо восстановить эластичность до момента наполнения посредством подготовки оболочки. При этом следует выполнять рекомендации изготовителя. Обычно оболочка помещается в термически изолированную камеру с принудительной циркуляцией воздуха, в которой поддерживаются необходимые температура и влажность, за несколько дней до ее наполнения; в качестве альтернативы можно использовать теплую водяную баню.

На полярных станциях в периоды экстремально низких температур рекомендуется использовать оболочки, обладающие особыми свойствами, позволяющими им сохранять прочность и эластичность в таких условиях.

8.3.3 **Наполнение**

В том случае, если для запуска шаров не используется пусковое устройство, наполнение оболочек необходимо проводить в специальном помещении, по возможности изолированном от других зданий. Оно должно хорошо проветриваться (например, NFPA, 1999). При использовании водорода важно соблюдать особые меры осторожности (см. 8.6). Из помещения необходимо удалить все источники образования искр, а все электрические выключатели и осветительная арматура должны быть искробезопасными; другие необходимые подробности содержатся в п. 8.6. При использовании гелия в холодную погоду помещение следует прогреть. Стены, двери и пол должны быть гладкими, и в помещении не должно быть песка и пыли. Отопление мест, используемых для наполнения водородом, можно обеспечивать посредством пара, горячей воды или любых других косвенных средств; в то же время электрическое отопление, если оно имеется, должно соответствовать национальным электротехническим нормам (например, NFPA 50A для класса I, раздел 2, помещения).

На время наполнения необходимо надеть защитную одежду (см. 8.6.4). Оператор не должен находиться в закрытом помещении, в котором размещена оболочка с водородом. Если двери в помещении закрыты, следует контролировать поступление водорода и наблюдать за операцией наполнения за пределами того помещения, в котором она происходит; двери следует оставить открытыми, если оператор находится в помещении, где наполняется оболочка.

Наполнение оболочек должно производиться медленно, поскольку быстрое растягивание может привести к образованию слабых мест в оболочке шара. Целесообразно иметь специальный редуктор для регулирования подачи газа. Требуемую величину наполнения (свободную подъемную силу) можно определить, используя либо наконечник шланга того же веса, либо такой наконечник, который может быть одним плечом весов, на которых другим плечом будет подъемная сила оболочки. Последний способ менее удобен; исключение составляют случаи, когда требуется учитывать изменения веса оболочек, что вряд ли необходимо в повседневной работе. Полезно иметь вентиль, подогнанный к весовому наполнителю, а в некоторых службах используется дополнительное устройство с клапаном, который может быть отрегулирован таким образом, что он закрывается автоматически при достижении требуемой подъемной силы.

8.3.4 **Запуск**

Оболочка должна находиться в укрытии до момента запуска. Следует избегать длительного воздействия яркого солнечного света, поскольку это может привести к быстрому ухудшению качества материала оболочки и даже к разрыву прежде, чем шар оторвется от земли. Во время запусков вручную необходимо использовать защитную одежду.

Запуск радиозондовых оболочек при слабом ветре не вызывает особых затруднений. Необходимо позаботиться о том, чтобы отсутствовала опасность столкновения шара и подвешенных приборов с различными препятствиями, прежде чем шар поднимется выше окружающих станцию деревьев и сооружений. Этих трудностей при запуске в значительной степени можно избежать путем тщательного выбора места запуска. Оно должно определяться минимумом препятствий, которые могут затруднить запуск, а сооружения на станции следует проектировать и располагать с учетом преобладающего направления ветра, возможности порывов ветра на площадке для запуска и метелей в районах с холодным климатом.

При сильном ветре рекомендуется также крепить приборы по возможности ближе к оболочке, используя для подвески специальные катушки или разматывающие приспособления. Удобное устройство состоит из катушки, на которую намотан шнур, и шпинделя, который приводит в действие воздушный тормоз или механизм спуска, позволяющий шнуру с подвешенными приборами медленно разматываться в начале полета шара.

Огромное преимущество механических устройств для запуска шаров заключается в том, что их конструкция позволяет обеспечить почти полную безопасность, поскольку оператор не находится рядом с шаром во время наполнения оболочки и запуска. Механические пусковые устройства могут быть автоматизированы в различной степени и даже настолько, что для всей работы по запуску радиозонда не потребуется присутствия оператора. Они могут быть неэффективны при скорости ветра более 20 $м \cdot с^{-1}$. Необходимо обеспечить адекватную вентиляцию датчиков радиозонда до его запуска. Желательно иметь такую конструкцию, которая позволит избежать повреждения сооружения в случае пожара или взрыва.

8.4 ДОПОЛНИТЕЛЬНОЕ СНАРЯЖЕНИЕ ДЛЯ ПОДЪЕМА ШАРОВ

8.4.1 Освещение при подъеме в ночное время

Обычно в качестве источника света при подъеме шаров-пилотов в ночное время используется лампочка, питаемая от небольшой электрической батарейки. Как правило, в этом случае подходит батарейка, состоящая из двух гальванических элементов с напряжением 1,5 В или же водозаливной элемент, используемый с лампой накаливания 0,3 А и напряжением 2,5 В. Кроме того, в качестве источника света можно использовать устройство, основанное на принципе химической флуоресценции. Однако для зондирования на больших высотах необходима более мощная система (2–3 Вт), снабженная при необходимости простым рефлектором.

Если скорость подъема должна оставаться неизменной при использовании осветительного устройства, то теоретически требуется небольшое увеличение свободной подъемной силы, т. е. полная подъемная сила должна быть увеличена более чем на величину, соответствующую дополнительно поднимаемому весу (см. формулу 8.3). Однако на практике требуемое увеличение, вероятно, меньше рассчитанного, поскольку груз улучшает аэродинамические характеристики и устойчивость оболочки.

Раньше при подъеме в ночное время использовали небольшую свечу в фонарике из вощеной бумаги, подвешенном примерно на расстоянии 2 м или ниже оболочки. Однако в этом случае возникает опасность воспламенения или взрыва при приближении свечи к оболочке или источнику водорода, а также опасность возникновения лесного пожара и других значительных пожаров при возвращении оболочки на землю. Поэтому использование свечей категорически не рекомендуется.

8.4.2 Парашюты

Для уменьшения опасности повреждений, наносимых зондирующей аппаратурой при падении, ее обычно снабжают простым парашютом. Основные требования сводятся к надежности его раскрытия и уменьшению скорости падения, которая не должна превышать 5 $м \cdot с^{-1}$ у земной поверхности. Кроме того, парашют должен быть водонепроницаемым. Для приборов массой до 2 кг требуется парашют, сделанный из водонепроницаемой бумаги или пластиковой пленки с куполом диаметром около 2 м и длиной строп около 3 м. Для предотвращения скручивания строп в полете целесообразно укрепить их легким обручем диаметром около 40 см из дерева, пластмассы или металла, который размещается над точкой их соединения.

Если для определения ветра используется радиолокационный отражатель, который является частью груза, то он может быть прикреплен к парашюту и препятствовать скручиванию строп. Стропы и другие приспособления должны быть способны выдержать напряжение при раскрытии парашюта. При использовании радиозондов небольшой массы (менее 250 г) обеспечивать достаточное торможение в ходе спуска может сам радиолокационный отражатель.

8.5 ГАЗЫ ДЛЯ НАПОЛНЕНИЯ ОБОЛОЧЕК

8.5.1 Общие сведения

Наиболее подходящими для метеорологических целей газами являются гелий и водород, причем применение первого предпочтительнее из-за отсутствия опасности взрыва и воспламенения. Однако поскольку использование гелия ограничивается немногими странами, имеющими богатые природные ресурсы, более широкое применение получил водород (см. WMO, 1982). Плавучесть (общая подъемная сила) гелия составляет 1,115 кг·м$^{-3}$ при давлении 1 013 гПа и температуре 15 °C. Соответствующее значение для чистого водорода составляет 1,203 кг·м$^{-3}$, а для поступающего в продажу водорода эта цифра несколько ниже.

Следует отметить, что в настоящее время на борту судов больше не разрешается использовать водород в соответствии с общими требованиями техники безопасности на море. Дополнительные расходы на использование гелия должны быть оценены в сопоставлении с опасностью для жизни, а также с дополнительными расходами на страхование, если таковое может быть организовано.

За исключением транспортных расходов и трудностей транспортировки доставка сжатого газа в баллонах является наиболее удобным способом обеспечения газом метеорологических станций. Однако там, где расходы или трудности доставки баллонов исключительно велики, использование на станции генератора водорода (см. 8.5.3) не должно вызывать больших трудностей.

8.5.2 Газовые баллоны

Вероятно, наиболее удобными для общего пользования являются стальные газовые баллоны емкостью 6 м^3 газа под давлением 18 МПа (10 МПа в тропиках). Однако при большом расходе газа, например, на станциях радиозондирования, рекомендуется использовать баллоны большей емкости или ряд стандартных баллонов, присоединенных при помощи коллектора к одному выпускному клапану. Эти меры значительно уменьшат трудоемкость работы персонала. Чтобы не путать баллоны с водородом с баллонами, содержащими другие газы, следует окрашивать их в особый цвет (во многих странах используется красный). Их выпускные вентили должны иметь левую резьбу, чтобы отличить их от баллонов с невоспламеняющимися газами. Баллоны должны быть снабжены колпаками для защиты вентилей при перевозке.

Газовые баллоны следует испытывать регулярно с интервалами от двух до пяти лет, в зависимости от действующих национальных инструкций. Для этого их необходимо подвергать воздействию внутреннего давления, по крайней мере на 50 % превышающего их нормальное рабочее давление. Баллоны с водородом не должны подвергаться нагреванию, и в тропиках их следует защищать от прямой солнечной радиации. Желательно, чтобы они хранились в хорошо вентилируемом помещении, что позволит обеспечить удаление водорода при любой утечке наружу.

8.5.3 **Генераторы водорода**

Водород можно получать на месте, используя различные типы генераторов водорода. Все генераторные установки и средства для хранения водорода должны быть отчетливо маркированы и иметь соответствующие предупредительные знаки согласно национальным правилам (например, «Этот агрегат содержит водород»; «Водород — Воспламеняющийся газ — Не курить — Открытый огонь запрещен»). Нижеследующие процессы взаимодействия оказались наиболее пригодными для производства водорода в метеорологических целях:

a) ферросилиций и каустическая сода с водой;

b) алюминий и каустическая сода с водой;

c) гидрид кальция и вода;

d) зерна железистого магния и вода;

e) жидкий аммиак с горячим платиновым катализатором;

f) метанол и вода с горячим катализатором;

g) электролиз воды.

Большинство используемых в этих процессах химических веществ являются опасными, и необходимо скрупулезно соблюдать соответствующие национальные требования и инструкции по работе с такими веществами, включая правильные маркировки и предупреждения. Они требуют специального транспорта, особых условиях хранения и обращения с этими веществами, а также их удаления. Многие из этих веществ вызывают коррозию, и после их использования выпадает осадок. Если указанные реакции тщательным образом не контролируются, то они могут привести к выделению избыточного тепла или повышению давления. Метанол – ядовитая разновидность спирта; если его выпить, что возможно при использовании его лицами, злоупотребляющими спиртным, это может привести к смертельному исходу.

В частности, широко используемая каустическая сода требует чрезвычайной осторожности со стороны оператора, который должен быть соответствующим образом защищен, особенно глаза, от контакта не только с раствором, но и с мелкой пылью, которая может подняться при закладке твердого материала в генератор. При несчастном случае необходимо иметь под рукой флакон с жидкостью для промывки глаз и нейтрализующее вещество, например уксус.

Некоторые из химических реакций, использующихся при этой работе, протекают при высоком давлении, и, следовательно, велик риск несчастного случая. Генераторы высокого давления должны проверяться каждые два года под давлением, по крайне мере вдвое превышающим рабочее давление. Они должны быть обеспечены предохранителями для сбрасывания излишнего давления. Предохранители обычно представляют собой разрывной диск, и очень важно строго соблюдать инструкцию по эксплуатации в отношении материала, размера и формы дисков, а также частоты их замены. Даже при надежном предохранителе может произойти выброс горячего раствора. Генераторы высокого давления следует тщательно очищать до перезарядки, поскольку остатки предыдущей закладки могут существенно уменьшить объем генератора и, следовательно, увеличить рабочее давление до значения, превышающего проектный запас прочности.

К сожалению, гидрид кальция и железистый магний, преимуществом которых является отсутствие необходимости использования каустической соды, дороги, поэтому они могут применяться только для специальных целей. Поскольку эти два вещества вытесняют водород из воды, их необходимо хранить в водонепроницаемых контейнерах. При использовании катализаторов необходимо позаботиться о том, чтобы избежать их загрязнения.

Все системы производят газ под давлением, достаточным для наполнения оболочек. Однако скорость получения газа при некоторых процессах (особенно, при электролизе) слишком мала, и газ необходимо произвести и хранить до того, как он понадобится, либо в сжатом виде, либо в газгольдере.

Методы, основанные на электролизе воды или каталитическом крекинге метанола с добавлением воды, привлекательны вследствие их относительной безопасности и умеренных текущих расходов, а также некоррозийной природы используемых веществ. Для этих двух процессов и процесса с использованием жидкого аммиака требуется электроэнергия. Оборудование является достаточно сложным и должно тщательно обслуживаться; необходима детальная ежедневная проверка эффективности работы систем контроля безопасности. Содержание минеральных веществ в воде для электролиза должно быть низким.

8.6 ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ВОДОРОДА И МЕРЫ ПРЕДОСТОРОЖНОСТИ

8.6.1 Общие сведения

Водород может легко воспламениться от малейшей искры; горит он почти невидимым пламенем. Смесь воздуха с водородом может гореть в широком диапазоне концентрации по объему — от 4 % до 74 % (NFPA, 1999) — и взрываться при концентрации 18–59 %. В любом случае находящийся поблизости оператор может получить сильные ожоги всех незащищенных участков кожи, а при взрыве отброшен к стене или на землю и получить серьезные травмы.

Можно исключить риск несчастного случая путем тщательно продуманных процедур и использования надлежащего оборудования при условии, что эти процедуры скрупулезно соблюдаются и оборудование поддерживается в исправном состоянии (Gremia, 1977; Ludtke и Saraduke, 1992; NASA, 1968). Однако вопросам обеспечения безопасности зданий, в которых получают и хранят водород, или площадок, где наполняют или запускают шары, не всегда уделяется достаточно внимания (см. следующий раздел). В частности, необходимы комплексное обучение и постоянный тщательный мониторинг и инспекция, для того чтобы обеспечить соблюдение операторами соответствующих процедур.

Преимущества автоматических пусковых установок для запуска шаров (см. раздел 8.3.4) заключаются в том, что они обеспечивают практически защиту оператора и могут предотвратить получение им травм за счет того, что оператор не присутствует там, где находится водород.

Важным отправным моментом для рассмотрения мер предосторожности в обращении с водородом является соблюдение национальных стандартов и практических правил, касающихся поведения во взрывоопасной среде вообще. Дополнительная информация о мерах предосторожности, которые необходимо соблюдать, содержится в публикациях, посвященных проблеме опасности взрыва в больницах и на ряде производств, где существуют подобные проблемы. Оператор никогда не должен оставаться в закрытом помещении, где находится наполненная оболочка. Эта глава содержит и другие рекомендации по вопросам безопасности.

8.6.2 Проектирование помещения

Необходимо соблюдать меры предосторожности во избежание накопления свободного водорода и статических зарядов, а также появления искр в любом помещении, где получают, хранят или используют водород. Необходимо избежать накопления водорода даже в случае разрыва оболочки в укрытии при ее наполнении (WMO, 1982).

Обеспечение мер безопасности должно быть частью строительного проектирования зданий для работы с водородом (NFPA, 1999; SAA, 1985). Климатические условия и

национальные нормы и правила служат ограничительными факторами, диктующими выбор тех или иных конструкций и материалов, наиболее подходящих для строительства безопасных помещений для работы с водородом. Правила носят рекомендательный характер и используются в качестве основы для эффективных практических действий. Нормы публикуются в виде технических условий на материалы, изделия и правила техники безопасности. Они включают описание противопожарной арматуры электрического освещения, электрического оборудования для взрывоопасной среды, вентиляции помещений со взрывоопасной средой и использования пластиковых окон, разрывных дисков и т. д.

Как правила, так и нормы должны содержать полезную и нужную информацию в отношении проектных решений относительно помещений для работы с водородом Кроме того, они должны соответствовать рекомендованной национальной практике. Национальная служба стандартов должна осуществлять руководство проектированием сооружений для работы с водородом и проверкой безопасности существующих сооружений, особенно в следующих аспектах:

a) оптимальное расположение водородных систем;

b) огнестойкость предложенных материалов и их соответствие существующим требованиям;

c) требования к вентиляционному оборудованию, включая легкую конструкцию крыши для обеспечения удаления водорода и продуктов взрыва через самую высокую точку здания;

d) соответствующее электрооборудование и электропроводка;

e) противопожарная защита (огнетушители и сигнальные устройства);

f) обеспечение возможности контроля оператором наполнения оболочки вне пределов того помещения, в котором она наполняется.

Необходимо принять меры к тому, чтобы свести к минимуму возможность образования искр в помещениях, где используется водород. Поэтому любая электрическая система (выключатели, осветительная арматура, электропроводка) должна находиться за пределами этих помещений. В противном случае необходимо иметь специальные искронепроницаемые выключатели, герметизированные во избежание доступа водорода, а также соответствующую электропроводку. Рекомендуется также освещать помещение через окна светильниками, находящимися вне этих помещений. По этим же причинам любые используемые инструменты не должны давать искру. Обувь наблюдателя также не должна давать искру при трении и следует обеспечить соответствующую молниезащиту.

При использовании систем пожаротушения в любой части здания необходимо учитывать возможную опасность в том случае, если в помещении все еще присутствует водород, после того как пожар был потушен. Системы обнаружения наличия водорода существуют и могут использоваться, например, для отключения электроэнергии от генератора водорода при его концентрации на уровне 20 % низшего предела взрывоопасной концентрации, а затем включения другого сигнального устройства при концентрации на уровне 40 % нижнего взрывоопасного предела.

Вокруг генератора, мест хранения и наполнения оболочек должна быть обозначена опасная зона, вход в которую разрешается только людям в защитной одежде (см. 8.6.4).

Устройство для запуска шаров (п. 8.3.4), как правило, не требует специального помещения для наполнения оболочек и в значительной степени упрощает конструкцию помещений для работы с водородом.

8.6.3 **Статические заряды**

Опасность работ, связанных с наполнением и запуском оболочек, можно значительно снизить путем защиты от статических зарядов помещений, где наполняются оболочки, одежды наблюдателя и самой оболочки. Loeb (1958) сообщает информацию о процессе статистической электризации. Хорошее заземление оборудования для получения водорода и арматуры, находящейся в помещениях, где наполняют оболочки, является успешным средством борьбы со статическими зарядами. Специальные антистатические зажимы на одежде наблюдателей могут удалять заряды, образующиеся на одежде (WMO, 1982).

С зарядами на оболочке справиться труднее. Ткани, из которых изготавливают оболочки, в особенности чистый латекс, являются очень хорошими изоляторами. Статические заряды образуются тогда, когда два изолирующих материала, соприкасающихся друг с другом, отделяются один от другого. Однократное касание одежды наблюдателя может привести к разряду в 20 кВ, что более чем достаточно, для того чтобы поджечь смесь воздуха с водородом, если этот разряд происходит в виде эффективной искры. Могут потребоваться многие часы, для того чтобы заряды на оболочке прошли сквозь ткань в землю или, естественно, в окружающий воздух. Было также установлено, что при разрыве оболочки расслоение ткани вдоль разрыва может давать искры, энергия которых достаточна для того, чтобы поджечь смесь.

Образование электростатических зарядов следует предотвращать, а образовавшиеся заряды — удалять путем обрызгивания водой оболочки во время наполнения, погружения оболочек в раствор антистатика (с высушиванием или без высушивания перед использованием), посредством использования оболочек с антистатической добавкой в латексе или путем обдува поверхности оболочки ионизированным воздухом. Простого заземления горловины оболочки недостаточно.

Максимальный электростатический потенциал, который может образоваться на поверхности оболочки, уменьшается с увеличением влажности, однако масштабы этого эффекта пока недостаточно хорошо установлены. Некоторые эксперименты, проведенные с наполненными оболочками массой 20 г, показывают, что при относительной влажности воздуха свыше 60 % представляется маловероятным возникновение искры с такой энергией, что она сможет вызвать воспламенение смеси водорода с кислородом. Согласно другим экспериментам, соответствующий предел относительной влажности составляет от 50 % до 76 %. Однако есть и такие исследования, которые показывают, что искры с достаточной энергией могут возникать даже при более высокой относительной влажности. Можно предположить, что статические разряды маловероятны при относительной влажности, превышающей 70 %, однако полагаться на это не стоит (см. Cleves et al., 1971).

Настоятельно рекомендуется обрызгивание оболочек тонкораспыленной водой, поскольку смачивание и заземление оболочки приводит к удалению большей части статических зарядов с увлажненных частей поверхности. Обрызгиватели должны быть спроектированы таким образом, чтобы увлажнять как можно большую часть площади оболочки и обеспечивать постоянный сток воды с оболочки на пол. При закрытых дверях влажность внутри помещения для наполнения оболочек может подняться до 75 % или выше, что приводит к уменьшению вероятности возникновения искр, обладающих достаточной энергией для того, чтобы вызвать возгорание. Запуск оболочек следует проводить сразу же после прекращения обрызгивания и открытия дверей помещения, в котором осуществляется наполнение.

Другие меры по уменьшению образования статических зарядов сводятся к следующему (WMO, 1982):

a) помещение должно быть оснащено системой полного заземления, причем вся арматура, оборудование для получения водорода и молниеотвод должны иметь отдельное заземление, которое должно соответствовать национальным стандартам для заземляющих электродов. Необходимо предусматривать удаление электрических зарядов с пола;

b) для наблюдателей необходимо предусмотреть места для снятия статических зарядов;

c) окна следует регулярно протирать раствором антистатика;

d) операторам не следует носить одежду из синтетики или изолирующую обувь. Хорошей практикой является ношение обуви, частично проводящей электричество;

e) следует свести к минимуму контакт наблюдателя с оболочкой; это может быть достигнуто путем установки устройства наполнения на высоте не менее 1 м от пола.

8.6.4 Защитная одежда и средства оказания первой помощи

Надлежащую защитную одежду следует носить во всех случаях использования водорода, в ходе всех работ, включая процессы его получения, работу с баллонами, и при наполнении и запуске оболочек. Одежда должна включать в себя легкий огнестойкий плащ с капюшоном, изготовленного из несинтетического, антистатического материала и маску для защиты нижней части лица, защитные очки, хлопчатобумажные перчатки и любую рекомендованную на местах огнестойкую одежду (см. Hoschke et al., 1979).

Необходимо иметь средства, оказания первой помощи, соответствующие используемому оборудованию. Они должны включать средства первой помощи при ожогах и переломах. При использовании химикатов следует иметь под рукой соответствующие нейтрализующие растворы, например лимонную кислоту, на случай ожогов каустической содой. Должен быть в наличии аппарат для промывки глаз, готовый к немедленному использованию (WMO, 1982).

СПРАВОЧНАЯ И ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ЛИТЕРАТУРА

Atmospheric Environment Service (Canada), 1978: *The Use of Hydrogen for Meteorological Purposes in the Canadian Atmospheric Environment Service*, Toronto.

Cleves, A.C., J.F. Sumner and R.M.H. Wyatt, 1971: The Effect of Temperature and Relative Humidity on the Accumulation of Electrostatic Charges on Fabrics and Primary Explosives. *Proceedings of the Third Conference on Static Electrification*, (London).

Gremia, J.O., 1977: *A Safety Study of Hydrogen Balloon Inflation Operations and Facilities of the National Weather Service*. Trident Engineering Associates, Annapolis, Maryland.

Hoschke, B.N. et al., 1979: *Report to the Bureau of Meteorology on Protection Against the Burn Hazard from Exploding Hydrogen-filled Meteorological Balloons*. CSIRO Division of Textile Physics and the Department of Housing and Construction, Australia.

Loeb, L.B., 1958: *Static Electrification*, Springer-Verlag, Berlin.

Ludtke, P. and G. Saraduke, 1992: *Hydrogen Gas Safety Study Conducted at the National Weather Service Forecast Office*. Norman, Oklahoma.

National Aeronautics and Space Administration, 1968: *Hydrogen Safety Manual*. NASA Technical Memorandum TM-X-52454, NASA Lewis Research Center, United States.

National Fire Protection Association, 1999: *NFPA 50A: Standard for Gaseous Hydrogen Systems at Consumer Sites*. National Fire Protection Association, Quincy, Maryland.

———, 2002: *NFPA 68: Guide for Venting of Deflagrations*. National Fire Protection Association, Batterymarch Park, Quincy, Maryland.

———, 2005: *NFPA 70, National Electrical Code*. National Fire Protection Association, Quincy, Maryland.

———, 2006: *NFPA 220, Standard on Types of Building Construction*. National Fire Protection Association, Quincy, Maryland.

Rosen, B., V.H. Dayan and R.L. Proffit, 1970: *Hydrogen Leak and Fire Detection: A Survey*. NASA SP-5092.

Standards Association of Australia, 1970: AS C99: *Electrical equipment for explosive atmospheres – Flameproof electric lightning fittings*.

———, 1980: AS 1829: *Intrinsically safe electrical apparatus for explosive atmospheres*.

———, 1985: AS 1482: *Electrical equipment for explosive atmospheres – Protection by ventilation – Type of protection V*.

———, 1995: ASNZS 1020: *The control of undesirable static electricity*.

———, 2004: AS 1358: *Bursting discs and bursting disc devices – Application selection and installation*.

World Meteorological Organization, 1982: *Meteorological Balloons: The Use of Hydrogen for Inflation of Meteorological Balloons*. Instruments and Observing Methods Report No. 13. Geneva.

ГЛАВА 9. МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИЕ НАБЛЮДЕНИЯ В ГОРОДАХ

9.1 ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

Возрастает потребность в проведении метеорологических наблюдений в городских районах. Население городов продолжает увеличиваться, и к метеорологическим службам все чаще обращаются за предоставлением метеорологических данных для поддержки детализированных прогнозов гражданам, а также для таких областей как городское планирование и архитектура, энергосбережение, транспорт и связь, качество воздуха и здравоохранение, ливневая нагрузка и ветроэнергетика, страхование и чрезвычайные меры. В то же время метеорологические службы сталкиваются с трудностями при проведении в городах наблюдений, которые не вызывают сомнений. Это объясняется тем, что большинство действующих метеорологических площадок не соответствуют стандартным требованиям руководящих документов относительно выбора места размещения и установки приборов, изложенных в томе I настоящего Руководства, из-за искажения воздушного потока и радиационного обмена зданиями и деревьями, искусственным поверхностным покрытием, теплом отработавших газов и водяным паром, образующимися в результате деятельности человека.

В этой главе содержится информация, содержащая рекомендации по выбору площадок, установке метеорологической станции и интерпретации данных, поступающих из городского района. В частности, в ней рассматривается случай «типовой» климатической станции. Несмотря на сложный и неоднородный характер городской окружающей среды, проведение полезных и систематических наблюдений возможно. Любая площадка для наблюдений представляет собой уникальную возможность. Для обеспечения надежности данных наблюдений необходимо внимательно следовать определенным принципам и концепциям, которые являются особенными для городских районов. Кроме того, от физического лица, которое устанавливает и эксплуатирует данную станцию, требуется применение этих принципов и концепций разумным и гибким образом, чтобы учитывать реальности наблюдаемой окружающей среды в конкретном месте. Жесткие «правила» дают мало пользы. Необходимость проявлять гибкость несколько противоречит общему понятию стандартизации, которая поощряется в качестве практики ВМО в области наблюдений. В городских районах приходится иногда идти на установку приборов над нестандартными поверхностями на нестандартных высотах, разбивать наблюдения между двумя или несколькими местоположениями или быть ближе, чем обычно, к строениям или участкам выделения тепла.

Единицы измерения и приборы, используемые в городских районах, являются такими же, что и для других видов наблюдений окружающей среды. В этой связи в настоящей главе рассматриваются только те аспекты, которые являются уникальными для городских районов, или те аспекты, которые затрудняют проведение наблюдений из-за характерных особенностей городов, такие как выбор места размещения, установка приборов и документирование метаданных.

Сроки и частота проведения наблюдений, а также кодирование сводок, должны следовать соответствующим стандартам (ВМО, 2006; 2011*a*, 2011*b*, 2015*a,* 2015*b*).

Следует соблюдать рекомендации, содержащиеся в настоящем томе, глава 1, в том, что касается автоматизированных станций и требований к кодированию и передаче сообщений, контроля качества, технического обслуживания (учитывая некоторые специальные требования для городской окружающей среды) и калибровки.

9.1.1 Определения и концепции

9.1.1.1 *Обоснование необходимости станции*

Четкое объяснение причины для создания городской станции наблюдений имеет существенное значение для успеха ее работы. Двумя самыми обычными причинами являются стремление представить метеорологическую среду в определенном месте для общих климатологических целей и обеспечить потребность в данных конкретного пользователя. В обоих случаях должны быть определены соответствующие пространственные и временные масштабы, и, как описано ниже, места размещения станции и установка приборов в каждом случае могут весьма отличаться друг от друга.

9.1.1.2 *Горизонтальные масштабы*

Ничто не является более важным исходным фактором для успешной работы городской станции наблюдений, как понимание масштаба. Интерес представляют собой три масштаба (Oke, 1984; рисунок 9.1):

a) микромасштаб: каждая поверхность и объект имеют свой собственный микроклимат как на них самих, так и в их непосредственной близости. Температуры поверхности и воздуха могут отличаться на несколько градусов на очень малых расстояниях, даже миллиметровых, а значительное возмущение воздушного потока может быть вызвано даже небольшими объектами. Характерные масштабы городского микроклимата связаны с размерами отдельных зданий, деревьев, дорог, улиц, дворов, садов и т. д. Характерные масштабы лежат в пределах от менее 1 м до сотен метров. Руководящие указания, содержащиеся в томе I настоящего Руководства, специально сформулированы таким образом, чтобы предотвратить микроклиматические воздействия. Рекомендации по климатическим станциям подготовлены таким образом, чтобы стандартизировать все места размещения, насколько это практически

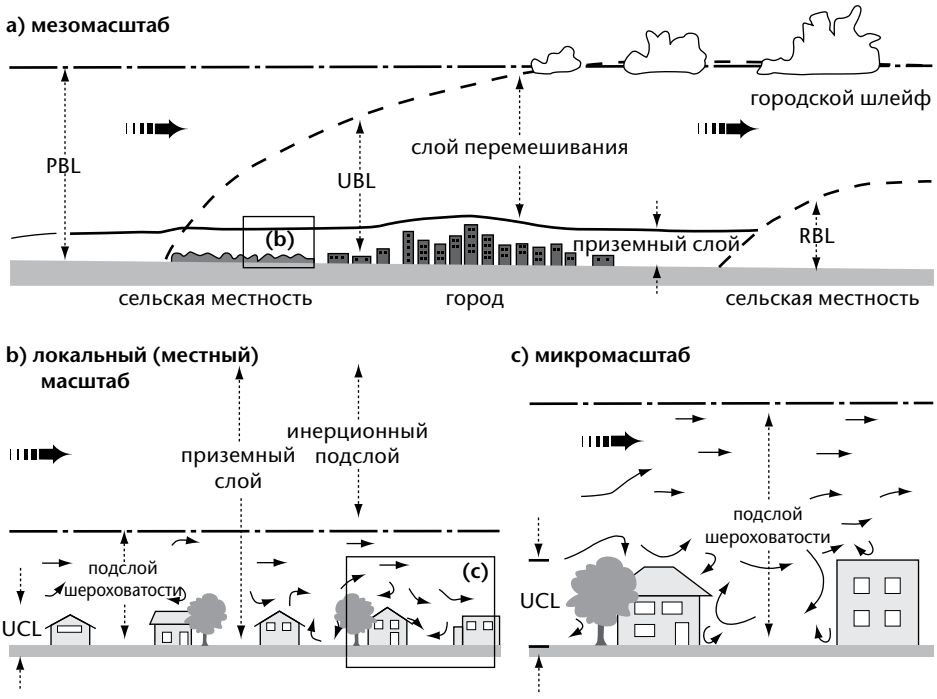


Рисунок 9.1. Схема климатических масштабов и вертикальных слоев атмосферы городских районов: планетарный пограничный слой (PBL (ППС)), городской пограничный слой (UBL (ГПС)), городской пологовый слой (UCL (ГПС)), пограничный слой сельской местности (RBL (ПСС)) (переработано по работе Oke, 1997).

возможно. Этим объясняется использование стандартной высоты измерения, единого характера поверхностного покрова, минимальных расстояний до препятствий и минимального закрытия горизонта. Цель заключается в обеспечении климатических наблюдений, свободных от внешних микроклиматических сигналов, и соответственно получение характеристик локального (местного) климата. В случае действия более строгих стандартов станции первого порядка могут быть способны представлять данные в синоптических пространственных и временных масштабах. Эти данные могут быть использованы для оценки климатических тенденций и в более крупных масштабах. Если не ставятся весьма конкретные задачи, то городским станциям следует также избегать микроклиматических воздействий; однако добиться этого трудно;

b) локальный (местный) масштаб: это масштаб, в котором стандартные климатические станции должны проводить мониторинг. Он включает такие ландшафтные характеристики, как топография, но исключает микромасштабные воздействия. В городских районах под этим понимается климат соседних районов, которые характеризуются аналогичными типами городского развития (поверхностное покрытие, высота и площадь застройки, вид деятельности). Сигнал представляет собой единое характерное сочетание микроклиматических воздействий, возникающих от района источника вблизи площадки наблюдений. Район источника — это часть верхней поверхности, которая определяет основные свойства потока или концентрации измеряемых метеорологических переменных (Schmid, 2002). Характерными являются масштабы от одного до нескольких километров;

c) мезомасштаб: город влияет на погоду и климат в масштабе всего города, как правило протяженностью в десятки километров. Одна единственная станция не способна представить этот масштаб.

9.1.1.3 ***Вертикальные масштабы***

Существенное различие между климатом городских районов и климатом в сельской местности или в местах расположения аэропортов заключается в том, что в городах вертикальный обмен количеством движения, тепла и влажности происходит не на (почти) плоской поверхности, а в слое значительной толщины, именуемом городским пологовым слоем (ГПС) (urban canopy layer (UCL)) (рисунок 9.1). Высота ГПС приблизительно равна средней высоте основных элементов шероховатости (здания и деревья) — z_H (см. рисунок 9.4 с определениями параметров). Микроклиматические воздействия отдельных поверхностей и препятствий сохраняются на небольшом расстоянии от их источника, а затем они смешиваются и заглушаются в результате действия турбулентных завихрений. Расстояние, необходимое для того, чтобы данное воздействие прекратилось, зависит от силы воздействия, скорости и стабильности потока ветра (т. е. речь идет о стабильности, нейтральности или нестабильности). Это смешение происходит как в горизонтальном, так и вертикальном направлениях. Как отмечалось, горизонтальные воздействия могут сохранять свою силу на расстоянии до нескольких сотен метров. По вертикали воздействия отдельных параметров различаются в подслое шероховатости (ПСШ), который простирается от уровня земли до высоты перемешивания z_r, где процесс перемешивания завершается. Эмпирические оценки и полевые измерения показывают, что z_r является малой величиной и может изменяться 1,5 z_H в плотно застроенных (близко расположенных друг к друг) и однородных местах, до значений больше 4 z_H в районах с низкой плотностью (Grimmond и Oke, 1999; Rotach, 1999; Christen, 2003). Прибор, размещенный ниже z_r может регистрировать микроклиматические аномалии, но если он находится выше, то он «видит» смешанный, пространственно усредненный сигнал, который является репрезентативным для локального масштаба.

Необходимо учитывать еще одно ограничение по высоте. Оно объясняется тем, что каждый тип поверхности в локальном масштабе создает внутренний пограничный слой, в котором структура потока и термодинамические характеристики адаптируются к этому типу поверхности. Высота этого слоя увеличивается по мере увеличения разгона волны

(до края зоны восходящего ветра, где происходит переход к поверхности совершенно иного типа). Скорость, с которой увеличивается внутренний пограничный слой сообразно длине разгона волны, зависит от параметров шероховатости и стабильности. В сельской местности соотношение между высотой и разгоном волны может колебаться от небольшого соотношения 1:10 в нестабильных условиях до 1:500 в стабильных, и это соотношение уменьшается по мере увеличения шероховатости (Garratt, 1992; Wieringa, 1993). Городские районы характеризуются тенденцией к нейтральности вследствие повышенной тепловой и механической турбулентности, связанной с островом тепла и значительной шероховатостью. Поэтому типичным считается отношение высоты к разгону волны, составляющее порядка 1:100. Высота внутреннего пограничного слоя берется выше высоты смешения z_d, которая является исходным уровнем для потока выше высоты слоя перемешивания. (Объяснение параметра z_d см. на рисунке 9.4 и в примечании b к таблице 9.2.).

Например, возьмем гипотетический плотно застроенный район с z_H в 10 м. Это означает, что z_r составляет как минимум 15 м. Если эта высота выбирается в качестве уровня измерений, то требование в отношении разгона волны над аналогичной городской территорией составляет, вероятно, как минимум 0,8 км, поскольку разгон волны = 100 (z_r – z_d), а z_d составит приблизительно 7 м. Это может быть существенным ограничением в отношении места размещения, поскольку в том случае, если городская территория не является аналогичной за пределами, по меньшей мере, этого расстояния вокруг места размещения станции, то как следствие, данные наблюдений не будут репрезентативными для данного типа локальной поверхности. В менее плотно освоенных местах, там, где воздействия острова тепла и шероховатости являются менее значительными, требования в отношении разгона волны будут, вероятно, более строгими.

На высотах, превышающих высоту слоя перемешивания, но в пределах местного внутреннего пограничного слоя, измерения проводятся в границах инерционного подслоя (рисунок 9.1), для которого применяется теория стандартного пограничного слоя. Подобная теория определяет форму средних вертикальных профилей метеорологических переменных (включая температуру воздуха, влажность и скорость ветра) и поведение турбулентных потоков, спектральные и статистические характеристики. Это создает основу для:

a) расчета района источника (или «отпечатка», см. ниже), в котором зарождается турбулентный поток или сочетание метеорологических переменных; следовательно, это определяет и расстояние в верхнем направлении для минимального приемлемого разгона волны;

b) экстраполяции данного потока или характеристики через инерционный слой, а также вниз в ПСШ (и, хотя это является менее надежным, в ГПС). В инерционном слое потоки являются постоянными по высоте, а среднее значение метеорологических характеристик является неизменным в горизонтальном направлении. Таким образом, наблюдения за потоками и стандартными переменными величинами приносят существенную пользу и могут характеризовать нижерасположенную окружающую среду в локальном (местном) масштабе. Экстраполяция в ПСШ рекомендуется в меньшей степени.

9.1.1.4 ***Районы источника («отпечатки»)***

Датчик, помещенный выше поверхности земли, «видит» только часть окружающей его местности. Она именуется «районом источника» прибора и зависит от его высоты и характеристик процесса передачи информации о характеристиках поверхности датчиком. Для сигналов уходящей радиации (коротко- и длинноволновая радиация, а также приземная температура, воспринимаемые инфракрасным термометром) поле зрения прибора и геометрия нижерасположенной поверхности определяют просматриваемый участок. По аналогии с этим, такие датчики как термометры, гигрометры, газоанализаторы и анемометры, «видят» такие характеристики, как температура, влажность, атмосферные

газы, скорость и направление ветра, которые воздействуют на соответствующий датчик с поверхности земли в результате турбулентного переноса. Схематическое представление этих районов источника приводится на рисунке 9.2.

Районом источника направленного вниз радиометра с его сенсорным элементом, расположенным параллельно поверхности земли, является круговой участок земной поверхности, в центре которого установлен данный прибор (рисунок 9.2). Радиус (r) кругового участка земли, на котором принимается сигнал радиометра на высоте (z_1), приводится в публикации Schmid et al. (1991):

<<8_III_ch9_ru-001.eps>> (9.1)

где F — это коэффициент формы, а именно доля измеряемого датчиком потока, создаваемая этим участком. В зависимости от поля зрения радиометр может видеть только ограниченный круг или его обзор может доходить до горизонта. В последнем случае прибор обычно имеет косинусный выходной сигнал, и поэтому в направлении горизонта становится все более трудно определить реальный видимый район источника. Следствием этого является использование коэффициента формы, который определяет участок, дающий возможность получения лишь части (которая обычно устанавливается в 50, 90, 95, 99 или 99,5 %) сигнала данного прибора.

Исходный район источника датчика, который выдает свой сигнал в результате турбулентного переноса, не является симметрично распределенным вокруг места расположения датчика. Он имеет форму эллипса и вытянут против ветра по направлению от мачты (рисунок 9.2). Если дует ветер, то воздействие поверхностной зоны у основания мачты фактически равно нулю, поскольку турбулентность не может транспортировать данное воздействие в верхнем направлении до уровня датчика. На определенном расстоянии в направлении против ветра данный источник начинает воздействовать на датчик; это воздействие достигает пикового значения, после чего оно ослабевает с увеличением расстояния (форму как в направлении x, так и в направлении y, см. в работах Kljun et al., 2002; Schmid, 2002). Со временем значительно меняется расстояние до наветренного первого наземного участка, способствующего образованию сигнала, до

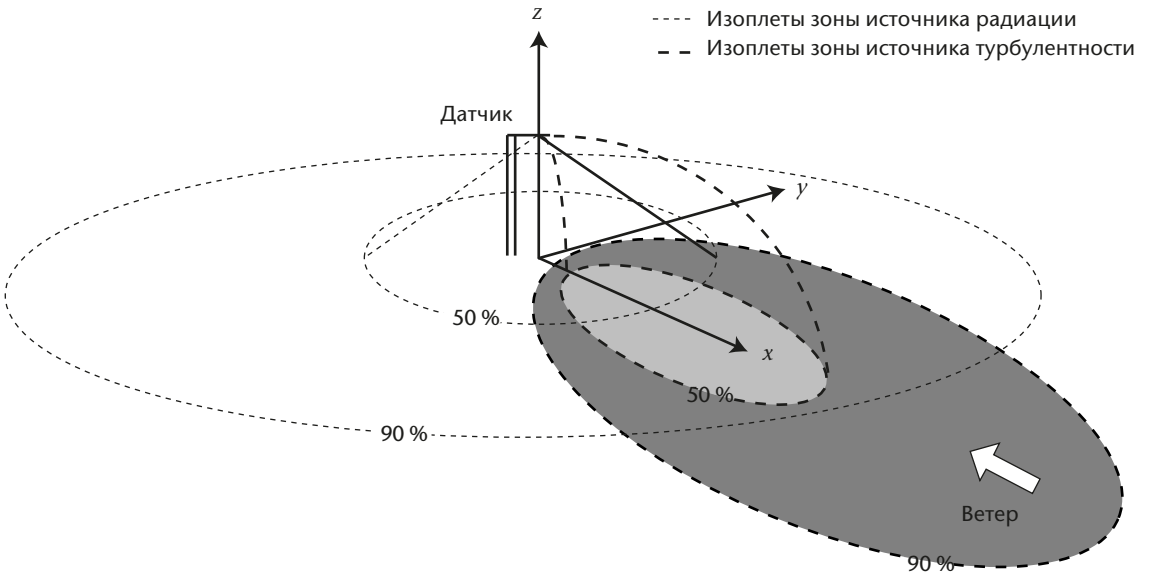


Рисунок 9.2. Схематическое представление районов источника для датчиков концентраций потоков радиации и турбулентности. Если датчиком является радиометр, 50 % или 90 % потока возникает от зоны внутри круга перспективы. Если датчик реагирует на турбулентный перенос, то 50 % или 90 % сигнала приходит от районов источников внутри соответствующих эллипсов. Они динамичны в известном смысле, т. к. ориентированы на ветер и, следовательно, перемещаются в зависимости от направления ветра и его стабильности.

точки пикового воздействия, до последующей наветренной поверхности, влияющей на данное измерение, и участка так называемого «отпечатка». Оно зависит от высоты проводимого измерения (увеличивается с увеличением высоты), шероховатости поверхности, стабильности атмосферы (увеличивается при переходе от нестабильного к стабильному состоянию), а также от того, проводится ли измерение турбулентного потока или совокупности метеорологических переменных (Kljun et al., 2002). Существуют методы расчета размеров «отпечатков» и потока концентрации (Schmid, 2002; Kljun et al., 2004).

Хотя обычной является ситуация, показанная на рисунке 9.2, она лучше всего подходит для приборов, размещенных в инерционном подслое, гораздо выше возмущений, которые могут быть вызваны ПСШ и комплексной геометрией трехмерной городской поверхности. В пределах ГПС еще не проведено достоверной оценки того, каким образом с расстоянием ослабевают воздействия участков, являющихся источниками потоков радиации и турбулентности. Можно предположить, что они зависят от тех же самых характеристик и напоминают общие формы воздействий, показанные на рисунке 9.2. Однако очевидные трудности возникают из-за сложной геометрии распространения радиации, а также блокирования направления и пропускания потока, которые являются характерными для ПСШ. Безусловно, непосредственная окружающая среда вокруг станции имеет гораздо более важное значение, и размер участка источника влияния конвекции увеличивается благодаря стабильности ветра и высоте расположения датчика. Расстояние, влияющее на датчики, расположенные на уровне метеорологической будки (~1,5 м), может составлять несколько десятков метров в нейтральных условиях, быть меньшим, когда они являются нестабильными, и, вероятно, больше 100 м, когда они являются стабильными. На высоте 3 м, соответственно, расстояния достигают, порядка 300 м в случае стабильного ветра. Предполагается, что обычно круг воздействия на датчик температуры или влажности, находящийся в метеорологической будке, имеет радиус, как правило, около 0,5 км, однако это может зависеть от плотности застройки.

9.1.1.5 ***Концепции измерений***

Из предыдущего рассмотрения видно, что если цель оборудованной приборами городской площадки заключается в мониторинге климата вблизи поверхности земли в локальном масштабе, то существуют следующие две концепции:

a) размещать площадку в ГПС в месте, окруженном усредненными или «типичными» для городской местности условиями, и разместить датчики на высотах, аналогичных тем, которые используются на не городских площадках. Это предполагает, что перемешивание, вызываемое потоком, образующимся вокруг препятствий, является достаточным для смешения характеристик и формирования среднего ГПС в локальном (местном) масштабе;

b) устанавливать датчики на высокой башне выше ПСШ и получать смешанные значения, которые могут быть экстраполированы для получения значений ГПС.

В целом концепция (a) действует лучше всего для получения данных о температуре и влажности воздуха, а концепция (b) — данных о скорости и направлении ветра и осадках. В отношении радиации единственным существенным требованием является чистый горизонт. В этой связи городские станции часто оборудованы приборами, размещенными как ниже, так и выше уровня крыш; для этого требуется, чтобы оценка и описание места размещения приборов включали масштабы, соответствующие обоим контекстам.

9.1.1.6 ***Описание городской площадки***

Величина каждого городского масштаба не соответствует точным образом тем данным, которые обычно приводятся в учебниках. Масштабы обычно диктуются размерами морфометрических характеристик, которые определяют городской ландшафт. Это подчеркивает необходимость адекватного описания характеристик городских районов, которые оказывают влияние на состояние атмосферы. Самыми важными основными

характеристиками являются городская структура (размеры зданий и пространства между ними, ширина улиц и пространство между ними); городское покрытие (застроенные, вымощенные и покрытые растительностью районы, голая почва, водоемы), городские отделочные материалы (строительные и естественные материалы) и метаболизм городской среды (тепло, вода и загрязняющие вещества, образующиеся в результате деятельности человека). Соответственно характеристика площадок для городских климатических станций должна учитывать эти условия, использовать их при отборе потенциальных площадок и включать их в метаданные, которые точно описывают место расположения станции.

Эти четыре основные характеристики городов позволяют группировать их в городские классы. Например, в большинстве центральных районов городов расположены относительно высокие здания, которые плотно прилегают друг к другу, и поэтому на данной территории находятся в основном здания или вымощенные поверхности, изготовленные из прочных материалов, таких как камень, бетон, кирпич и асфальт, и где происходят значительные выбросы из печей, кондиционеров, каминов и автомашин. Недалеко от другого края этого спектра находятся районы с низкой плотностью застройки домами в один или два этажа с относительно легкой конструкцией и большими садовыми или растительными зонами с низкими выбросами тепла, но, вероятно, со значительным потреблением воды на цели орошения.

Не существует никакой общепринятой системы городской классификации для климатических целей. Эффективным подходом к понятию застроенных компонентов является концепция Эллефсена (Ellefsen, 1991), который разработал набор типов зон урбанизированных территорий (ЗУТ). Изначально он разделяет застройку на три типа (пристроенные друг к другу здания (ряд); отдельные, но близко расположенные здания; отдельные и открыто расположенные здания). Эта категория подразделяется далее на совокупность семнадцати подтипов в соответствии с функцией, расположением в городе, а также высотой, конструкцией и возрастом зданий. Для применения этой системы требуется лишь аэрофотосъемка, которая обычно является доступной, и она применялась в нескольких городах мира и имеет, по-видимому, универсальный характер.

Система Эллефсена может использоваться для описания таких характеристик городской структуры, как шероховатость, воздушный поток, подверженность радиации и защита от нее. Можно утверждать, что она включает косвенным образом такие аспекты, как городское покрытие поверхности, отделочные материалы и обменные процессы, поскольку каждая структура характеризуется данным типом покрытия, материалов и деятельности человека. В то же время, система Эллефсена является менее полезной, когда строительные объекты являются немногочисленными и имеются обширные территории растительности (городской лес, низкий растительный покров, луга, кустарники, сельскохозяйственные культуры), голая земля (почва или камень) и вода (озера, болота, реки). Упрощенная топология городских климатических зон (ГКЗ) показана в таблице 9.1. Она включает группы зон Эллефсена, показатель данной структуры z_H/W (см. таблицу 9.1, примечание (с)), который тесно связан как с потоками, солнечным затенением, так и островом тепла, а также показатель покрытия поверхности (% застройки) по отношению к степени проницаемости поверхности.

Важное значение ГКЗ заключается не в их абсолютной точности в описании места расположения, а в их способности классифицировать территории населенного места по районам, которые являются аналогичными по своей способности изменять местный климат, а также идентифицировать потенциальные переходы к другим ГКЗ. Подобная классификация является исключительно важной при планировании открытия городской станции, с тем чтобы критерии пространственной однородности приблизительно соблюдались для станции в ГПС или выше уровня ПСШ. Исходя из этого, предполагается, что морфометрия городской территории или ее части оценивалась с использованием подробных карт и/или аэрофотоснимков, спутниковых изображений (в видимой и/или инфракрасной области спектра), документов планирования или, по меньше мере, визуального обследования, проведенного из автомашины и/или пешком. Хотя полезными могут оказаться карты землепользования, следует понимать, что они изображают

функцию и не обязательно физическую форму населенного пункта. Задача описания городской территории должна заключаться в создании карты с разграничением территорий ГКЗ.

В данном документе используются ГКЗ, приведенные в таблице 9.1. Возможно, необходимо будет адаптировать эти категории с целью учета особенно характерных городских форм некоторых древних городов или незапланированного городского развития, которое имеет место в некоторых менее развитых странах. Например, многие малые и большие города в Африке и Азии не имеют столь большой доли поверхности, покрытой водоупорными материалами, а дороги в них могут быть без покрытия асфальтом.

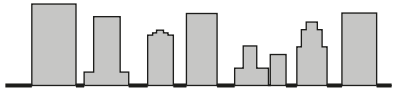
9.2 ВЫБОР МЕСТА И ПЛОЩАДКИ ДЛЯ РАЗМЕЩЕНИЯ ГОРОДСКОЙ СТАНЦИИ

9.2.1 Место размещения

Во-первых, необходимо четко определить стоящую перед станцией задачу. Если в пределах городской территории будет находиться только одна станция, должно быть принято решение о том, является ли целью мониторинг самого большого климатического воздействия города или же более репрезентативного или типичного района, или же она заключается в характеристике конкретного места (в котором может предполагаться наличие климатических проблем или в котором планируется будущее градостроительство). Территории, на которых с наибольшей вероятностью будут выявлены максимальные воздействия, могут быть оценены на первоначальном этапе путем сравнения с классификационным списком типов ГКЗ, содержащемся в таблице 9.1. Подобным образом, вероятность того, что станция будет типичной, может быть оценена на основе идей, которые подразумеваются таблице 9.1, а также выбора обширных территорий аналогичного городского развития с целью более тщательного изучения.

Данное исследование может быть с пользой усовершенствовано в том случае, если речь идет о температуре и влажности воздуха, посредством проведения территориальных обследований, во время которых датчик несут на себе или устанавливают на велосипед или автомобиль, и перемещают его по всем представляющим интерес территориям. После нескольких повторов делаются карты с поперечным сечением или карты с изолиниями (см. рисунок 9.3), на которых показаны представляющие интерес зоны аномалий тепла или влажности. Обычно наилучшим временем для этой работы являются несколько часов после захода солнца или до его восхода в те ночи, когда поток воздуха бывает относительно спокойным, а небо безоблачным. Это максимально увеличивает возможности для дифференциации различий между микроклиматом и местным климатом. Не рекомендуется проводить эти обследования незадолго до восхода или захода солнца, поскольку метеорологические переменные меняются так быстро в это время, что затрудняет пространственные сравнения.

Таблица 9.1. Упрощенная классификация определенных городских форм, ранжированных в порядке снижения их способности воздействия на локальный климат (Oke, 2004, не опубликована)

	Городская климатическая зона[a]	*Изображение*	*Класс шероховатости*[b]	*Коэффициент вида*[c]	*% застройки (непроницаемость)*[d]
1.	Развитые города с одиночными плотно стоящими высотными зданиями, т. е. деловая часть города		8	> 2	> 90
2.	Развитый город с 2–5-этажной очень плотной застройкой часто из кирпича или камня, т. е. центр старого города		7	1,0–2,5	> 85
3.	Развитый город со средней плотностью ярусной и частной застройки вдоль дорог, т. е. городское хозяйство		7	0,5–1,5	70–85
4.	Развитый город с низкой и средней плотностью застройки невысокими зданиями и паркингами, т. е. торговая зона		5	0,05–0,2	70–95
5.	Среднеразвитый пригород, с одноэтажной застройкой, т. е. пригородное хозяйство		6	0,2–0,6, до включительно > 1, с деревьями	35–65
6.	Смешанная застройка большими зданиями в открытом ландшафте, т. е. учреждения — больницы, университеты, аэропорты		5	0,1–0,5, в зависимости от деревьев	< 40

Городская климатическая зона[a]	*Изображение*	*Класс шероховатости*[b]	*Коэффициент вида*[c]	*% застройки (непроницаемость)*[d]
7. Развитое сельское хозяйство, включающее строения в природных и агрокультурных зонах, т. е. фермы, склады имущества		4	> 0,05, в зависимости от деревьев	< 10
	Buildings; Vegetation Impervious ground; ... Pervious ground			

Примечания:

a Выделенный набор классов включает аспекты схемы Auer (1978) и Ellesfen (1991) плюс физические измерения для контроля ветра, тепла и влаги (колонка справа). Приблизительное соответствие между ГКЗ и группами зон Эллефсена: 1 (Dc1, Dc8), 2 (A1–A4, Dc2), 3 (A5, Dc3–5, Do2), 4 (Do1, Do4, Do5), 5 (Do3), 6 (Do6), 7 (ни один).

b Эффективная шероховатость ландшафта согласно классификации Дейвенпорта (Davenport et al., 2000); см. таблицу 9.2.

c Коэффициент вида = z_h/W является средней высотой главных элементов шероховатости (здания, деревья), отделенных средними дистанциями; в центре города — это высота/ширина уличных каньонов. Эти величины известны как относящиеся к типам режимов потоков (Oke, 1987) и контроля тепла (солнечное сияние и длинноволновый отбор) (Oke, 1981). Высокие деревья значительно увеличивают это соотношение.

d Средняя пропорция территории поверхности под застройкой (зданиями, дорогами и мостовыми и другими водонепроницаемыми зонами); остаток зоны, занятый покровом (зелеными насаждениями, водой и другими естественными поверхностями). Проницаемость почвы влияет на увлажнение земли и, следовательно, потенциал влажности и охлаждения за счет испарения.

Если станция является частью сети, предназначенной для описания пространственных характеристик городского климата, то требуется более широкий подход. Этот фактор должен быть сформулирован с учетом типичной пространственной формы климатических распределений в городской среде. Например, изолинии городских «тепловых островов» и влажности действительно выглядят подобно контурам их одноименных топографических названий (рисунок 9.3). Они имеют относительно крутые «обрывы», часто с «плато» на значительной части городской территории, в которые вкрапливаются локализованные «холмы» и «бассейны» тепла/прохлады и влажности/сухости. Эти параметры соответствуют более или менее урбанизированным участкам земли, таким как жилые зоны, магазины, фабрики или парки, открытые территории или водные поверхности. Поэтому должно быть принято решение: является ли целью подготовка репрезентативного образца разнообразия ГКЗ, или же она заключается в достоверном отображении пространственной структуры.

Поскольку цель заключается в осуществлении контроля за локальными климатическими условиями, характерного для городской территории, необходимо избегать внешних микроклиматических воздействий или других локальных или мезомасштабных климатических явлений, которые будут усложнять регистрацию данных о городском климате. В этой связи, если только не присутствует особый интерес к климатическим режимам, определяемым топографическим характером местности, таким как воздействия потока холодного воздуха из низин долин и вдоль склонов в направлении территории города, повышение скорости ветров или защита от них, благодаря холмам и впадинам, или туман в речных долинах и прилегающих к ним водоемах, или географически замкнутые системы облачности и т. д., целесообразно избегать мест, подвергаемых таким местным и мезомасштабным воздействиям. С другой стороны, если в результате подобных явлений можно извлечь выгоду или столкнуться с опасностью, целесообразным может оказаться разработка сети, специально предназначенной для смягчения этих воздействий на городской климат, таких как улучшение слишком теплого климата города благодаря морскому или озерному бризу.

9.2.2 Площадка для установки приборов

После того, как сделан выбор типа ГКЗ и его общего местоположения внутри городской территории, следующий шаг заключается в изучении карты, изображений

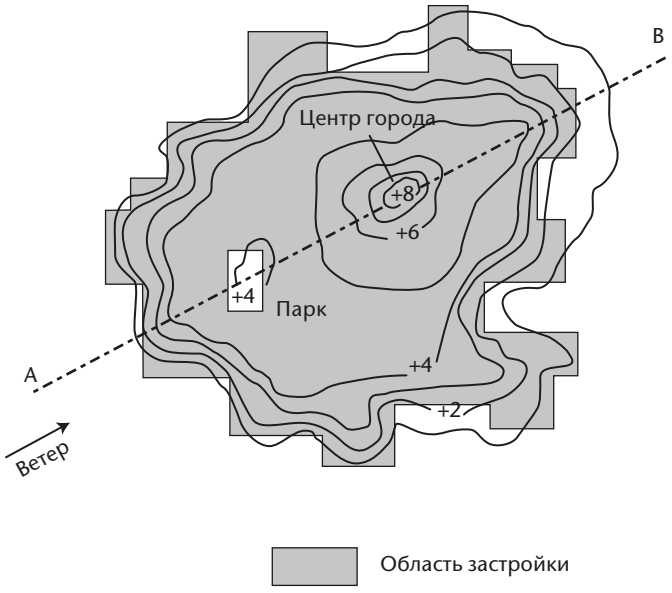


Рисунок 9.3. Типичная пространственная картина изотерм в большом городе ночью при безветренной ясной погоде, иллюстрирующая влияние эффекта «теплового острова» (Oke, 1982).

и фотографических свидетельств, с тем чтобы сузить рамки выбора возможных мест в пределах ГКЗ. Изыскиваются зоны разумно однородного градостроительства без обширных участков аномальной структуры, покрова или материала. В то же время, невозможно точно определить понятие «разумно»; почти каждый реальный городской район обладает своими собственными специфическими особенностями, которые уменьшают, в определенной степени, его однородность. Хотя полный перечень является поэтому невозможным, ниже приводятся примеры того, чего следует избегать: необычно увлажненные участки земли в сухом в прочих ситуациях месте; отдельные здания, которые выступают более чем на половину выше средней высоты строений квартала; обширная асфальтированная автостоянка в месте орошаемых садов; крупный источник концентрированного тепла, такой как теплоцентраль или вытяжной вентилятор туннеля. Следует избегать близости к сопряженным зонам между разными типами ГКЗ, равно как и тех мест, в отношении которых имеются планы или вероятность широкомасштабной реконструкции городских районов. Степень озабоченности по поводу аномальных параметров снижается по мере увеличения расстояния от выбранного места размещения, как это обсуждалось в связи с районами источников.

На практике для каждого потенциального места размещения следует проводить оценку «отпечатка», связанного с радиацией (например, по уравнению 9.1), и характеристик турбулентности. После этого следует документально оформить в рамках этих отпечатков ключевые характеристики поверхности, такие как средняя высота и плотность препятствий, параметры наземного покрытия и материалы. Затем следует проанализировать показатели однородности и сделать это либо визуально, либо при помощи статистических методов. После того, как сделан выбор целевых участков с приемлемой однородностью для станции на уровне метеорологической будки или станции, установленной на высоком уровне (выше ПСШ), полезно выявить потенциальных «дружественных» владельцев данного места, которые могли бы разместить станцию. Если поиск места размещения ведется государственным учреждением, то оно уже может быть владельцем земли в том районе, который используется для других целей, или иметь хорошие отношения с другими ведомствами или деловыми предприятиями (имеющими офисы, рабочие площадки, свободные земли, права прохода и проезда), включая школы, университеты, инженерные сети (электричество, телефон, трубопроводы) и транспортные артерии (автодороги, железные дороги). Это разумные места размещения, поскольку может быть обеспечен доступ к ним, они во многих случаях защищены от вандализма и могут быть подсоединены к электроснабжению.

Крыши зданий часто используются в качестве места для проведения метеорологических наблюдений. Это часто основывалось, вероятно, на ошибочном мнении о том, что на такой высоте приборная будка свободна от осложнений, связанных с ГПС. На самом деле поверхности крыш обладают своим собственным, совершенно отчетливо анормальным микроклиматом, что ведет к получению ошибочных результатов. Воздушный поток над зданием создает сильные возмущения в плане скорости, направления и порывистости ветра, которые полностью отличаются от воздушного потока на той же самой высоте в стороне от данного здания или у земли (рисунок 9.5). Здания с плоскими крышами могут фактически создавать потоки на своих крышах, которые направлены против основного внешнего потока, а скорости меняются от мощных воздушных струй до почти полного безветрия. Крыши также строятся из материалов, которые имеют довольно экстремальные температурные характеристики. При слабом ветре и безоблачном небе они могут становиться очень горячими днем и холодными ночью. Таким образом, вблизи крыши часто существует резкий градиент температуры воздуха. Кроме того, крыши предназначены для того, чтобы защищать от воды и быстро ее удалять. Это, наряду с их открытостью для солнечной радиации и ветра, делает их анормально сухими. В целом поэтому крыши являются весьма неподходящими местами для проведения наблюдений за температурой воздуха, влажностью, ветром и осадками, если только приборы не размещаются на очень высоких мачтах. В то же время они могут хорошо подходить для наблюдений за компонентами приходящей радиации.

После того, как площадка для установки приборов размещения выбрана, важно, чтобы подробное описание характеристик этого места (метаданные) было полностью документировано (см. 9.4).

9.3 УСТАНОВКА ПРИБОРОВ

9.3.1 Изменения в стандартной практике

Во многих отношениях общепринятые стандарты для установки метеорологических приборов, изложенные в томе I настоящего Руководства, применяются и к городским площадкам. В то же время, есть много случаев, когда невозможно или бессмысленно соблюдать эти стандарты. В этом разделе рекомендуются некоторые принципы, которые окажут помощь в подобных обстоятельствах; однако невозможно предусмотреть все случайности. Изложенные в этом разделе рекомендации по-прежнему согласуются с общими целями, изложенными в томе I, глава 1.

Многие городские станции размещались над низкой травой в открытых местах (парки, игровые поля), и в результате этого они фактически осуществляют мониторинг измененных условий сельского типа, которые не являются репрезентативными с городскими условиями. Это ведет к удивительному выводу о том, что некоторые городские станции, спаренные с сельскими станциями, не показывают никакого воздействия городской среды на температуру (Peterson, 2003).

Руководящий принцип установки датчиков в ГПС заключается в том, что их следует располагать таким образом, чтобы они могли осуществлять мониторинг репрезентативных условий окружающей среды отобранной ГКЗ. В больших и малых городах нецелесообразно пользоваться площадками, аналогичными тем, которые являются стандартом в открытой сельской местности. Вместо этого рекомендуется размещать городские станции над поверхностями, которые в пределах микромасштабного радиуса являются репрезентативными для городской окружающей среды локального (местного) масштаба. Приблизительным ориентиром для рекомендуемой поверхности является категория процента застройки (таблица 9.1).

Требованием, которое с наибольшей очевидностью невозможно удовлетворить на многих городских площадках, является расстояние до препятствий – данная площадка должна находиться достаточно далеко от деревьев, зданий, стен и других препятствий (том I, глава 1). Поэтому рекомендуется помещать городскую станцию в центре открытого пространства, где коэффициент (z_H/W) формы окружающей территории является приблизительно репрезентативным для данной местности.

При монтаже приборов на городских площадках особенно важно пользоваться экранированными кабелями из-за повсеместной прокладки силовых линий и наличия других источников электрических помех в таких местах.

9.3.2 Температура

9.3.2.1 *Температура воздуха*

Датчики, обычно применяемые для измерения температуры воздуха (включая их точность и характеристики чувствительности), являются пригодными для городских районов. Особенно рекомендуется уделять тщательное внимание защите от радиации и обеспечению вентиляции. В ГПС комплект датчиков может находиться в относительной близости к теплым поверхностям, таким как освещенная солнцем стена, дорога или автомашины с горячим двигателем, или на него может попадать тепло, отраженное от застекленных поверхностей. Поэтому используемые защитные экраны должны эффективно блокировать тепловое излучение. Кроме того, поскольку датчики, размещенные в ГПС на более низком уровне, могут быть слишком хорошо защищены, рекомендуется применение принудительной вентиляции датчика. Если сеть включает сочетание комплектов датчиков с защитными экранами и вентиляцией или без них, это может способствовать различиям в показаниях на разных площадках. В этой связи следует обеспечить единообразную практику.

Поверхность, над которой производится измерение температуры воздуха, а также установка комплекта датчиков, должны соответствовать рекомендациям, изложенным в предыдущем разделе, а именно данная поверхность должна быть характерной ГКЗ, а экран или навес термометра должны помещаться в центре пространства с приблизительным коэффициентом формы z_H/W. В случае очень плотной застройки ГКЗ это может означать размещение датчиков на расстоянии только 5–10 м от зданий высотой 20–30 м. Если местом размещения приборов является улица типа «каньон», то величина z_H/W применяется только к поперечному сечению, перпендикулярному оси улицы. Ориентация уличной оси может также иметь значение из-за наличия систематических конфигураций солнце-тень. Если планируется проведение постоянного мониторинга, то предпочтение отдается улицам, ориентированным на север-юг, а не улицам, ориентированным на восток-запад, поскольку фазовое искажение является меньшим, даже если значения температуры в течение дня могут достигать максимума.

На не городских станциях рекомендуемая высота экрана составляет 1,25–2 м над уровнем земли. Хотя эта рекомендация является также приемлемой для городских приборных площадок, лучше, вероятно, ослабить это требование, с тем чтобы разрешить бóльшие высоты. Это не должно приводить к существенной ошибке в большинстве случаев, особенно в плотно застроенных районах, поскольку данные наблюдений в напоминающих каньоны улицах свидетельствуют о весьма незначительных градиентах температуры воздуха в большей части ГПС при том условии, что данное место находится на расстоянии более 1 м от поверхности (Nakamura и Oke, 1988). Измерения на высотах 3 или 5 м не отличаются весьма существенным образом от измерений на стандартной высоте, охватывают несколько более обширные районы источника, а датчик находится вне пределов досягаемости, благодаря чему предотвращается причинение ему ущерба, и он находится далеко от пути следования автомашин. Эти высоты также обеспечивают бóльшее рассеивание тепла выхлопных газов автомобилей и снижают загрязнение пылью.

Измерения температуры воздуха, выполняемые выше ГПС с использованием смонтированных на башне датчиков, испытывают воздействие потоков воздуха в результате их обмена с ГПС плюс воздействия крыш. Крыши характеризуются гораздо большей тепловой изменчивостью по сравнению с большинством поверхностей внутри ГПС. Большинство крыш предназначено для обеспечения изоляции и, соответственно, минимизации теплообмена с внутренней частью здания. В результате этого значения температуры крыши-поверхности часто становятся очень высокими днем, в то время как частично затененные и имеющие бóльшую проводимость стены зданий на улицах типа «каньон» и их поверхность являются более холодными. Ночью ситуация меняется в обратную сторону, и при этом крыши остаются относительно прохладными, а поверхности «каньона» более теплыми, поскольку они выбрасывают тепло, накопленное в течение дневного времени. Могут быть также осложнения, вызванные выбросом тепла из вытяжных вентиляционных отверстий крыш. Поэтому несмотря на незначительное колебание температуры в зависимости от высоты в ГПС, поблизости от крыши, наблюдается нарушение однородности как на горизонтальном, так и вертикальном уровнях. Таким образом для получения средней значимой пространственной величины датчики должны находиться гораздо выше среднего уровня крыши, если возможно, > 1,5 z_H, с тем чтобы происходило смешение воздуха между крышей и «каньоном». На основе данных о температуре воздуха, полученных находящимся на возвышении датчиком, трудно экстраполировать зарегистрированные значения до уровня экрана, поскольку в настоящее время отсутствуют какие-либо стандартные методы. Кроме того, нет ни одного простого общего механизма для экстраполирования температуры воздуха горизонтально внутри ГПС. Статистические модели дают хорошие результаты, однако они требуют большого объема архивированных данных наблюдений, осуществленных плотной сетью датчиков, но эти данные не всегда имеются.

9.3.2.2 ***Приземная температура***

На городских станциях температура подстилающей поверхности обычно не измеряется, однако она может быть весьма полезной переменной величиной для ее использования в качестве исходных данных в моделях, предназначенных для расчета потоков. Получение

такой репрезентативной температуры требует усреднения адекватных данных измерений многих поверхностей — как вертикальных, так и горизонтальных, которые образуют городскую территорию. Это возможно только благодаря использованию дистанционного зондирования в инфракрасной области излучения либо со сканера, установленного на воздушном судне или спутнике, либо направленного вниз пиргеометра, или одного или нескольких радиационных термометров, общее поле зрения которых охватывает репрезентативную площадку городского района. Таким образом, для получения точных результатов площадка должна быть правильно выбрана и должна быть известна ее средняя величина излучающей способности.

9.3.2.3 *Температура почвы и автодороги*

В городских районах желательно проводить измерения температуры почвы. Эффект острова тепла распространяется в нижнюю подповерхностную часть города, и это может иметь значение для инженерного проектирования водопроводов или дорожного строительства. На практике измерение этой переменной может оказаться трудным на участках города с более плотной инфраструктурой. Земля, лишенная растительности, может отсутствовать, структура почвы часто сильно разрушена, а на глубине могут находиться препятствия или аномально теплые или прохладные объекты (например, пустые, полные или дающие протечку трубы водопровода, канализационные трубы, трубы теплоснабжения). В городских районах измерение минимальной температуры в травостое не имеет почти никакой практической пользы.

Датчики температуры часто вставляются в дорожное покрытие, особенно в местах, подверженных замерзанию. Они являются обычно частью станции контроля метеорологических условий на автодорожных магистралях. Во многих случаях полезно иметь датчики, расположенные как в том месте, где проходят колеса машин, так и в центре автодороги.

9.3.3 **Атмосферное давление**

В масштабе городских районов не будет, вероятно, необходимости в мониторинге атмосферного давления, если в данном регионе уже имеется синоптическая станция. Если в комплект приборов входят датчики давления, применяются рекомендации, изложенные в томе I, глава 3. В помещениях и в других местах поблизости от зданий имеется вероятность «нагнетания» давления, вызванного порывами ветра. Кроме того, могут существовать различия между внутренним и внешним давлением, если датчик находится в помещении с кондиционированием воздуха. Обе эти трудности могут быть частично устранены в том случае, если устанавливается приемник статического давления (см. том I, глава 3, раздел 3.1.4.3).

9.3.4 **Влажность**

Для городских районов подходят приборы, которые обычно используются для измерения влажности (том I, глава 4). В равной мере к датчикам влажности применяются руководящие указания, изложенные в п. 9.3.2.1 относительно места размещения и установки датчиков температуры в ГПС и выше ПСШ.

Общеизвестно, что городская окружающая среда является загрязненной (пыль, горюче-смазочные материалы, загрязняющие вещества). Несколько видов гигрометров подвержены деградации или требуют более тщательного технического обслуживания в условиях городской окружающей среды. Таким образом, в случае использования психрометрических методов замену обвязки из ткани для смоченного термометра необходимо проводить чаще, чем обычно, и особое внимание следует уделять тому, чтобы дистиллированная вода оставалась незагрязненной. Загрязненный городской воздух может разрушить влагочувствительный элемент волосного гигрометра; следовательно, их не рекомендуется использовать в течение длительных периодов времени. Необходимо

часто чистить зеркальце гигрометров точки росы и окна гигрометров ультрафиолетового и инфракрасного излучения. Некоторые приборы деградируют в такой степени, что приходится весьма регулярно проводить полную замену датчиков. Из-за наличия в ГПС укрытия от ветра важное значение имеет принудительная вентиляция со скоростью, рекомендованной в томе I, глава 4, раздел 4.3, равно как и обеспечение экранирования от внешних источников солнечной и длинноволновой радиации.

9.3.5 Скорость и направление ветра

Результаты измерений скорости и направления ветра очень чувствительно реагируют на отклонения потока препятствиями. Препятствия являются причиной изменений в потоке среднего ветра и турбулентности. Подобные воздействия касаются всех масштабов, включая воздействия местного рельефа, холмов, долин и отвесных скал, резкие изменения шероховатости или фактической высоты поверхности шероховатости (z_d, см. ниже), возмущение потока вокруг групп деревьев или зданий, отдельных деревьев и зданий и даже нарушение потока, вызванного физической массой башни или несущим кронштейном, на котором крепятся приборы.

9.3.5.1 *Средний профиль ветра*

В то же время, если площадка находится на относительно ровной поверхности земли, имеется достаточный разгон волны в нижнем направлении основных изменений шероховатости поверхности и находится в единой ГКЗ без аномально высоких зданий, то должен существовать средний профиль ветра подобный тому, который показан на рисунке 9.4. Средняя величина является как пространственной, так и временной. В ГПС ни от одной площадки невозможно ожидать наличия подобного профиля. Отдельные места размещения подвержены воздействию весьма резких изменений скорости и направления ветра, поскольку воздушный поток взаимодействует с отдельными элементами компоновок зданий, улиц, дворов и деревьев. На улицах типа «каньон» форма профиля является иной для потока вдоль «каньона» по сравнению с потоком поперек «каньона» (Christen et al., 2002) и зависит от позиции поперек и вдоль данной улицы (DePaul и Shieh, 1986). Градиенты скорости ветра в ГПС являются малыми практически до самой поверхности. В первой аппроксимации профиль в ГПС может быть описан при помощи экспоненциальной формы (Britter и Hanna, 2003), сливающейся с логарифмическим профилем вблизи крыши (рисунок 9.4).

В инерционном подслое применяется теория подобия Монина-Обухова, включая логарифмический закон:

<<8_III_ch9_ru-002.eps>> (9.2)

где u_* — это скорость трения; k — константа фон Кармана (0,40); z_0 — высота шероховатости подстилающей поверхности; z_d — высота смещения нулевой плоскости (рисунок 9.4); L — длина стабильности Обухова ($= -u_*^3/[k(g/\theta_v)Q_H]$), где g — это ускорение свободного падения, θ_v — виртуальная потенциальная температура, и Q_H — чувствительный к турбулентности поток тепла); и Ψ_M — безразмерная функция, которая учитывает отклонение в кривой профиля ветра от нейтрального профиля при увеличении стабильности или нестабильности[1]. В нейтральном случае (обычно при сильных ветрах и облачности), когда Ψ_M является единицей, уравнение 9.2 сводится к следующему:

<<8_III_ch9_ru-003.eps>> (9.3)

Параметры профиля ветра могут измеряться при помощи вертикального ряда анемометров или могут проводиться измерения потока импульса или порывистости ветра посредством малоинерционной анемометрии в инерционном слое, однако оценки меняются в зависимости от направления ветра и чувствительны к ошибкам

[1] Более подробную информацию о L и форме функции ψ_M см. стандартное пособие по микрометеорологии, например, Stull, 1988; Garratt, 1992; или Arya, 2001. Отметим, что u_* и Q_H следует оценивать в инерционном слое над ПСШ.

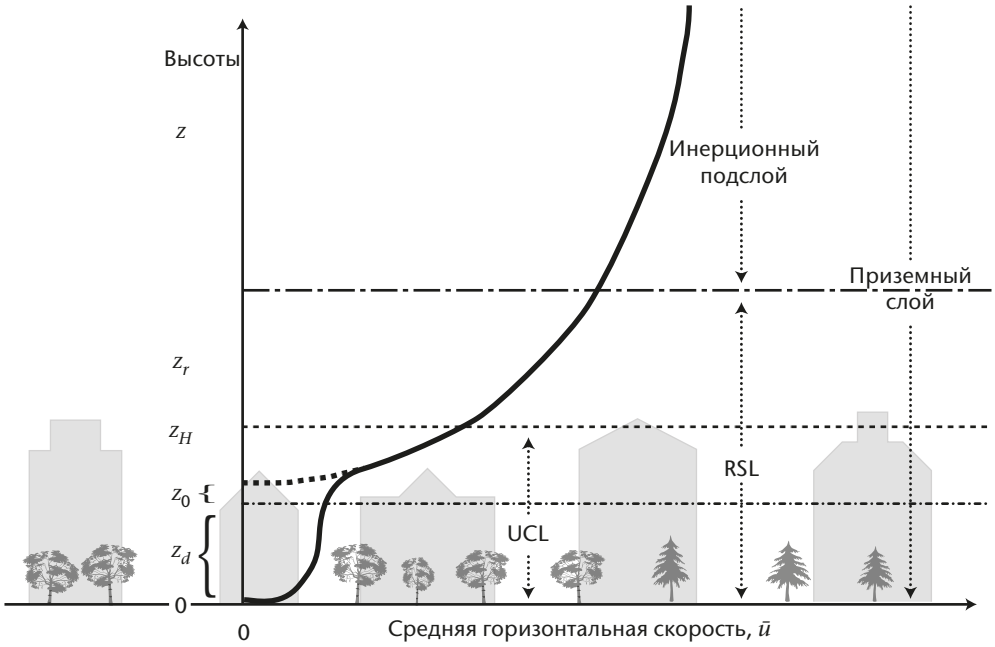


Рисунок 9.4. Осредненный (по пространству и времени) вертикальный профиль скорости ветра ($\bar{u}$) в городском районе, включая положение подслоев приземного слоя. Значениями по оси высот являются средняя высота элементов шероховатости (z_H) подслоя шероховатости (z_r или высота перемешивания), высота шероховатости подстилающей поверхности (z_0) и высота смещения нулевой плоскости (z_d). Пунктирная кривая представляет экстраполяцию профиля из инерционного подслоя, сплошная линия представляет фактический профиль ветра.

(Wieringa, 1996; Verkaik, 2000). Имеются также методы параметризации профилей ветра z_0 и z_d для городской территории (обзоры данного вопроса см. в публикациях Grimmond и Oke, 1999; Britter и Hanna, 2003). Самые простые методы связаны с использованием общих описаний землепользования и препятствий (см. таблицы 9.1 и 9.2; а также Davenport et al., 2000; Grimmond и Oke, 1999), или подробного описания высот различных элементов шероховатости и их пространственного распределения, основанных либо на географической информационной системе с данными о размерах зданий и улиц, либо на картах и перспективных аэрофотоснимках, или изображениях с воздушных судов/спутников, а также применений одной из нескольких эмпирических формул (рекомендации см. в Grimmond и Oke, 1999).

Важно включать в оценки городского профиля ветра высоту смещения z_d. Фактически это эквивалентно созданию основы для логарифмического профиля ветра, который учитывает физическую массу растительного покрова города. Это напоминает создание новой «наземной поверхности» на высоте, где происходит поглощение среднего импульса потока (рисунок 9.4).

В зависимости от плотности застройки и деревьев, это могло бы определить основу профиля на высоте 0,5–0,8 z_H (Grimmond и Oke, 1999). Таким образом, не включение этого параметра в расчеты порождает серьезные ошибки. Первые оценки могут быть сделаны путем использования долей z_H, приведенных в таблице 9.2 (примечание b).

9.3.5.2 *Высота измерения и установка*

Проблематичным является выбор высоты, на которой следует проводить измерения параметров ветра в городских районах. В то же время, если применяются определенные базовые принципы, то могут быть получены значимые результаты. Неправильное размещение датчиков ветра в крупных городах является причиной бесполезной затраты

Таблица 9.2. Классификация Дейвенпорта эффективной земной шероховатости[a]

Класс	*z_0 (м)*	*Описание ландшафта*
4 Почти открытый	0,10	Умеренно открытая местность со случайными препятствиями (например, изолированные низкие здания или деревья) в относительном горизонтальном удалении по крайней мере на 20 высот препятствия
5 Шероховатый	0,25	Рассеянные препятствия (здания) на относительных расстояниях 8–12 высот препятствия для низких капитальных объектов (например, здания) (анализ возможно потребует z_d)[b]
6 Очень шероховатый	0,5	Область, умеренно покрытая низкими зданиями в относительном удалении на 3–7 высот препятствия и отсутствие высоких деревьев (анализ требует z_d)[b]
7 Скользящий	1,0	Плотная зона застройки без большого изменения высоты застройки (анализ требует z_d)[b]
8 Хаотический	2,0	Центры городов с наличием низких и высотных зданий (рекомендуется анализ в аэродинамической трубе)

Примечания:

a Сокращенная версия (редакция 2000 г., только для городской шероховатости) Дейвенпорта и других (2000); для классов 1–3 и для сельскохозяйственных классов 4–8, см. том I, глава 5, приложение, и WMO (2003).

b Первые расчетные значения z_d даны как доли средней высоты препятствия, то есть: 0,5 z_H, 0,6 z_H и 0,7 z_H для классов 5, 6 и 7 Дейвенпорта соответственно.

значительных ресурсов и усилий и приводит к потенциально ошибочным расчетам рассеивания загрязняющих веществ. Разумеется, это является причиной затруднений и на открытой территории вследствие наличия препятствий и топографических воздействий. По этой причине эталонная высота для наблюдений за ветром в сельской местности устанавливается в 10 м над поверхностью земли, а не на уровне метеорологической будки, а анемометр должен находиться на горизонтальном расстоянии от препятствий, равном не менее чем десяти размерам высоты препятствия (том I, глава 5, раздел 5.9.2, настоящего Руководства). В типичных городских районах невозможно найти подобные места, например, в ГКЗ со зданиями и деревьями высотой в 10 м потребуется участок территории с радиусом как минимум 100 м. Если подобная площадка существует, то почти наверняка она не является репрезентативной для данной зоны. Уже отмечалось, что подуровень шероховатости, в котором сохраняются воздействия отдельных элементов шероховатости, простирается до высоты порядка 1,5 z_H на плотно застроенной территории и, возможно, еще выше на площадях с меньшей плотностью застройки. Таким образом, в рассматриваемом районе минимальная допустимая высота анемометра составляет как минимум 15 м, а не предписанные 10 м. В случае гораздо более высоких зданий анемометр, расположенный на эталонной высоте в 10 м, будет находиться гораздо ниже ГПС, и учитывая однородность городской структуры и соответственно структуры ветра, небольшую пользу принесет размещение датчика ветра ниже уровня крыш или даже приблизительно на этом уровне.

Из наблюдений в аэродинамической трубе и в полевых условиях хорошо известно, что поток над отдельным твердым препятствием, таким как высотное здание, подвергается значительному возмущению как непосредственно над данным зданием, так и вокруг него. Эти возмущения включают изменения в направлении воздушного течения, появление зон рециркуляции на крыше и в так называемом «пузыре» или впадине за зданием, а также эффекты следа струи, которые сохраняются в нижнем течении на расстоянии, в десятки раз превышающем высоту здания, и которые затрагивают значительную часть смежного пространства (рисунок 9.5).

Имеется много примеров плохо установленных в городах систем анемометр-флюгер. Регистрируемые такими приборами данные являются ошибочными, вводящими в заблуждение, потенциально вредными в том случае, если они используются с целью

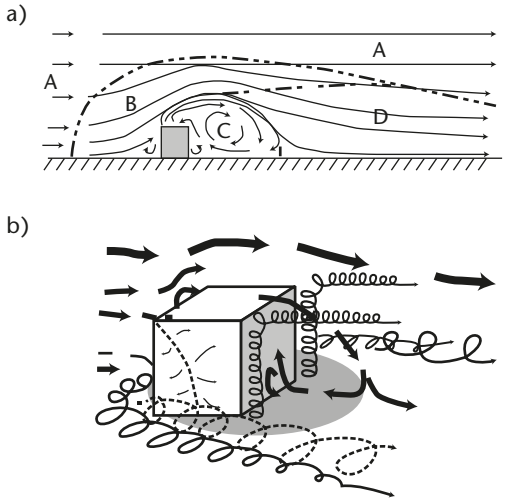


Рисунок 9.5. Типичный двумерный поток, огибающий здание, стоящее против набегающего потока (a): направления потока и его зоны; A представляет невозмущенный поток, B — возмущенный поток, C — впадину, D — след возмущенного потока (по Halitsky, 1963), и (b): поток и структуры вихрей (упрощение по Hunt et al., 1978).

получения исходных данных о ветре для применений, связанных с ветровой нагрузкой или дисперсией, и на них напрасно расходуются имеющиеся ресурсы. Невозможно переоценить бессмысленность размещения анемометров и флюгеров на коротких мачтах наверху зданий. Скорость и направление ветра резко меняются на коротких дистанциях, как горизонтально, так и вертикально. Результаты, полученные от размещенных подобным образом приборов, мало похожи на общий поток воздуха и полностью зависят от конкретных характеристик самого здания, местоположения мачты на данной структуре и угла атаки потока по отношению к зданию. Циркулирующие и вихревые потоки, показанные на рисунке 9.5, означают, что если мачта ставится перед областью кавитации, наверху ее или в самой этой области позади здания, то результаты измерения направления могут быть совершенно противоположными тем, которые доминируют в потоке за пределами зоны воздействия непосредственного режима ветра вокруг данного здания (а именно в зоне A рисунка 9.5 (a)), а скорости колеблются в значительных пределах. Для того, чтобы выйти за пределы зоны возмущения, приборы для измерения параметров ветра должны монтироваться на значительной высоте. Например, предлагалось размещать такие датчики на высоте, превышающей максимальный горизонтальный размер основной крыши (Wieringa, 1996). Это предполагает наличие дорогостоящей мачтовой системы, возможно с оттяжками, которые занимают обширную площадку и, вероятно, трудности с получением разрешения на установку. Тем не менее, это единственный приемлемый подход, если необходимо получить значимые данные.

При столкновении с подобными реальностями следует устанавливать датчики таким образом, чтобы их набегающий поток не слишком перекрывался их опорной структурой. Предлагаются следующие рекомендации:

a) в городских районах с незначительной высотой и плотностью элементов (ГКЗ 6 и 7) возможно использование площадки, на которой могут соблюдаться рекомендации в отношении эталонной установки в «открытом поле». При использовании высоты в 10 м самые близкие препятствия должны находиться на расстоянии от анемометра, по меньшей мере, в 10 раз превышающем их высоту, а их средняя высота должна быть не более 6 м;

b) в районах с более плотной застройкой с относительно единообразной высотой и плотностью разных элементов (здания и деревья), измерения скорости и

направления ветра следует проводить при помощи анемометра, установленного на мачте сквозной конструкции с минимальной высотой, которая в 1,5 раза превышает среднюю высоту указанных элементов;

c) в городских районах с разбросанными высотными зданиями рекомендации такие же, как и в пункте (b), однако особое внимание необходимо уделять тому, чтобы не попасть в зону турбулентности, создаваемую высотными сооружениями;

d) не рекомендуется проводить измерения скорости или направления ветра на плотно застроенных территориях с большим количеством высотных сооружений, если только не используется очень высокая башня.

Анемометры на башнях с открытой конструкцией должны монтироваться на стрелах (поперечных балках), которые являются достаточно длинными для того, чтобы обеспечивать нахождение этих датчиков на расстоянии от боковой стороны мачты, равном по меньше мере двум (желательно трем) диаметрам башни (Gill et al., 1967). Датчики следует монтировать таким образом, чтобы как можно реже направление потока проходило через башню. Если это невозможно или если решетка башни является очень плотной, необходимо будет, вероятно, смонтировать две или три стрелы с дублирующими датчиками, с тем чтобы предотвратить воздействия турбулентности и угасания встречного ветра, вызванного самой башней.

Если мачты анемометров приходится монтировать на высоких или изолированных зданиях, необходимо учитывать воздействия размеров этой структуры на воздушный поток (см. главу 5, 5.3.3, настоящего тома). Это потребует, вероятно, проведения анализа с использованием аэродинамической трубы, гидрологического лотка или расчетных гидродинамических моделей, специально разработанных применительно к представляющему интерес зданию, включая также окружающую его территорию и структуры.

Цель состоит в том, чтобы обеспечить проведение всех измерений параметров ветра на высотах, где они являются репрезентативными для потоков над поверхностью с шероховатостью, характерной в местном масштабе, и чтобы эти измерения были свободны от возможных, вводящих в заблуждение воздействий в результате поверхностных аномалий в микромасштабе или локальном (местном) масштабе. Соответственно, особое внимание уделяется проведению точных измерений на любой высоте, которая необходима для уменьшения погрешности, вместо того, чтобы проводить измерения на стандартной высоте. Для этого может потребоваться отделение площадки для измерения параметров ветра от места размещения других измерительных систем. Это может также привести к проведению наблюдений за ветром на нескольких различных высотах в одном и том же населенном пункте. Для этого необходимо будет экстраполировать измеряемые величины на общую высоту, если необходимо получить пространственное распределение или если эти данные должны стать исходными для мезомасштабной модели. Подобная экстраполяция легко достигается путем применения логарифмического профиля (уравнение 9.2) для двух высот:

<<8_III_ch9_ru-004.eps>> (9.4)

где z_{ref} — это выбранная «эталонная» высота; z_1 — высота установки анемометра; и z_0 — высота шероховатости ГКЗ. На городской территории правильным является определение «эталонной» высоты для включения высоты смещения нулевой плоскости, а именно z_1 и z_{ref} имеют вид $(z_x - z_d)$, где нижний индекс x означает «1» или «ref». Подходящей «эталонной» высотой может быть 50 м над высотой смещения.

Другие поправки при установке приборов, связанные с отклонением потока, топографией и воздействиями шероховатости, могут быть внесены в соответствии с рекомендациями, содержащимися в томе I, глава 5 (см. раздел 5.9.4: поправка с учетом установки приборов), настоящего Руководства. Вполне может оказаться, что для данной городской площадки невозможно организовать проведение подходящих наблюдений за ветром. В таком случае

возможно все же проводить расчеты параметров ветра для «эталонной» высоты на основе данных наблюдений за ветром на другой городской станции или в аэропорту, применяя для этого модель «логарифмического преобразования» Wieringa (1986):

<<8_III_ch9_ru-005.eps>> (9.5)

где нижние индексы A и B относятся к представляющей интерес площадке, где необходимо получение параметров ветра, и к площадке, где имеются данные о стандартных измерениях параметров ветра соответственно. Высота перемешивания z_r должна либо быть равной 4 z_H (см. 9.1.1.3), либо принимать стандартное значение в 60 м; данный метод не очень зависит от этого показателя. Кроме того, если на любой из этих площадок имеются высокие тесно расположенные элементы шероховатости, то соответствующая шкала высоты должна учитывать z_d.

9.3.5.3 ***Соображения, касающиеся датчиков ветра***

Для городских территорий применимы приборы, используемые для измерения скорости и направления ветра, порывистости и других характеристик потока во вне городской окружающей среде. В крупных городах следует всегда измерять направление ветра, а также его скорость, с тем чтобы можно было вносить зависящие от азимута поправки на влияние башни. В случае использования механических чашечных анемометров техническое обслуживание должно проводиться более часто из-за загрязнения атмосферы, и особое внимание следует уделять состоянию подшипников и коррозии. Если измерения проводятся в ГПС, то порывистость ветра может усугубить проблему чрезмерной скорости вращения чашек, а слишком большое укрытие может стать причиной того, что анемометры функционируют со скоростью, которая близка или ниже их предельной минимальной скорости. Эту проблему надо решать посредством более эффективного технического обслуживания и, возможно, использования быстродействующих анемометров, анемометров пропеллерного типа или акустических анемометров. Пропеллерные анемометры в меньшей степени склонны к превышению скорости, а акустические анемометры, не имеющие никаких подвижных частей, практически не нуждаются в техническом обслуживании. В то же время, они являются дорогостоящими и требуют сложной электронной схемы регистрации и обработки данных, и не все их модели работают во время дождя.

9.3.6 **Осадки**

Приборы и методы измерения осадков, описанные в томе I, глава 6, настоящего Руководства, также адаптированы к городской среде. Измерение осадков, таких как дождь или снег, всегда подвержено ошибкам, связанным с установкой измерительного прибора, особенно из-за искажения поля ветра вокруг него. Учитывая городские условия и весьма изменчивый характер поля ветра в ГПС и ПСШ, озабоченность вызывают следующие четыре основных источника ошибок:

a) перехват осадков на их траектории к поверхности земли находящимися рядом собирающими поверхностями, такими как деревья и здания;

b) твердые поверхности вблизи измерительного прибора, которые также могут вызвать попадание брызг в измерительный прибор и наличие нависающих объектов, с которых может попадать вода в измерительный прибор;

c) пространственная сложность поля ветра вокруг препятствий в ГПС вызывает весьма локализированную концентрацию или отсутствие воздушного потока, несущего дождь или снег;

d) порывистость ветра в сочетании с физическим присутствием самого измерительного прибора, что вызывает аномальную турбулентность вокруг него, которая приводит к переоценке или недооценке количества осадков.

На открытой местности стандартная установка требует, чтобы окружающие препятствия находились от осадкомера на расстоянии, не меньшем, чем их двукратная высота. В определенном смысле это менее строгое требование по сравнению с требованиями, предъявляемыми к измерениям температуры, влажности или ветра. В то же время, в ГПС турбулентная активность, создаваемая потоком воздуха вокруг зданий с острыми выступами, является более значительной по сравнению с турбулентностью вокруг естественных препятствий, и она может проявляться на большей протяженности их турбулентного следа. Кроме того, следует избегать площадок на крыше здания из-за большой изменчивости скорости и направления ветра там.

С другой стороны, в отличие от измерений температуры, влажности и ветра, цель измерения осадков часто заключается не в проведении анализа локальных воздействий, за исключением, возможно, интенсивности выпадения дождевых осадков. Некоторые воздействия городской среды на осадки могут быть инициированы в локальном (местном) масштабе (например, крупным промышленным предприятием), однако они могут проявляться на значительном расстоянии в подветренной стороне города. Различия, наблюдаемые в пределах городской зоны, с большей степенью вероятности объясняются воздействиями или топографическими эффектами.

Приемлемым может оказаться выбор обширной открытой площадки в городе, где могут быть соблюдены стандарты нормальной установки, однако с почти полной очевидностью это будет означать, что измерительный прибор не будет размещаться совместно с датчиками температуры воздуха, влажности и ветра. В то время, как последние упомянутые датчики должны быть репрезентативными для городской структуры местного масштаба, покрытия, структуры и обменных процессов конкретной ГКЗ; в отношении измерения осадков это требование не действует.

Однако местная окружающая среда измерительного прибора имеет важное значение, если станция должна использоваться для изучения межгородских изменений типа осадков. Например, «тепловой остров» в городских условиях оказывает влияние на срок существования различных видов осадков, например, снег или мокрый снег в «основании» облаков может таять в более теплой городской атмосфере и выпадать на землю в виде дождя. Результатом этого может быть выпадение снега в сельских и пригородных районах, в то время как в центре города регистрируется дождь.

В отношении осадкомеров в городских районах рекомендуется следующее:

a) осадкомеры следует размещать на открытых площадках в пределах города, где могут быть соблюдены критерии стандартной установки (например, игровые поля, открытые парковые территории с незначительной плотностью деревьев, городские аэропорты);

b) осадкомеры следует размещать вместе с приборами для измерения ветра, если для них найдена репрезентативная площадка. В других местах, которые не характеризуются низкой плотностью застройки, это, вероятно, повлечет за собой установку осадкомера на мачте выше уровня крыш. Это означает, что осадкомер будет подвергаться воздействию ветра, скорость которого больше репрезентативной, и соответственно ошибка в оценке будет больше, чем ошибка вблизи поверхности, и необходимо будет вносить поправку в показания осадкомера. Подобная поправка является практически возможной, если ветер измеряется на той же самой мачте. Это также означает, что предпочтение отдается автоматической регистрации, и осадкомер должен проходить регулярную проверку для обеспечения того, чтобы он был установлен горизонтально, а его отверстие было свободно от мусора;

c) осадкомеры не следует размещать на крышах зданий, если только их не устанавливают на достаточной высоте, с тем чтобы предотвратить воздействие ветровой зоны здания;

d) измерение глубины выпавшего снега следует проводить на открытой площадке, или, если это делается на застроенных участках, следует провести измерения

на обширном пространстве, с тем чтобы было учтено неизбежное накопление снега вокруг препятствий. Подобные измерения должны охватывать улицы, ориентированные в разных направлениях.

Гидрологи городов интересуются показателями интенсивности жидких осадков, особенно во время сильных ливней. Соответственно полезными являются дождемеры с опрокидывающимся ковшом (челночные) или весовые плювиографы. Измерение жидких и твердых осадков в городских районах выигрывает от разработки новых технических средств, таких как оптические дождемеры и радиолокаторы.

Осадки в виде росы, инея и тумана также имеют место в городах и могут иметь значение для водохозяйственного баланса, особенно для некоторых поверхностей, и быть связанными с такими применениями, как учет влияния на болезни растений, активность насекомых, безопасность на дорогах и выявление дополнительного источника водных ресурсов. Методы, описанные в томе I, глава 6, подходят для городских площадок.

9.3.7 **Радиация**

В настоящее время в городских районах недостаточно осуществляется измерений радиационных потоков. Например, почти ни об одной их составляющей не упоминается в Архиве мирового энергетического баланса Всемирной климатической программы и в Программе измерений атмосферной радиации Министерства энергетики США. Площадки для измерения радиации специально размещаются в сельской местности или отдаленных местах с тем, чтобы избежать воздействия аэрозольных и газообразных загрязняющих веществ городов, влияющих на результаты измерений. Даже в тех случаях, когда станция носит название города, метаданные обычно показывают, что они фактически расположены далеко за пределами городской черты. Если станции размещены в застроенном районе, то измерению подлежит, вероятно, только приходящая солнечная (суммарная) радиация; не ведется мониторинг ни приходящей длинноволновой радиации, ни каких-либо потоков с исходящими компонентами. В большинстве своем краткосрочные экспериментальные проекты, ориентированные в первую очередь на воздействия городских условий, предусматривают измерения радиационного баланса в городах. Все коротко- и длинноволновые потоки испытывают воздействие особых характеристик атмосферы и подстилающей поверхности в городах, и это же относится к полному радиационному балансу, который фактически определяет энергетический баланс в условиях города (Oke, 1988*a*).

На городских территориях могут применяться все приборы с имеющимися для них калибровками и поправками, а также большинство полевых методов, изложенных в томе I, глава 7, настоящего Руководства, для измерения радиации в естественных условиях. В данном документе речь идет только о различиях или конкретных городских потребностях либо трудностях.

9.3.7.1 ***Приходящая радиация***

Приходящая солнечная радиация является фундаментальной переменной величиной, влияющей на городские климатические условия, и поэтому ее измерению следует уделять приоритетное внимание, особенно после того, как станция организована или модернизирована. Знание этого параметра наряду с данными стандартных наблюдений за температурой и влажностью воздуха, скоростью ветра, а также простые измерения структуры и покрова площадки, дают возможность использовать метеорологическую предпроцессорную схему (а именно: методы и алгоритмы, применяемые для преобразования стандартных полей наблюдений в переменные величины, необходимые в качестве исходных, но не измеряемых элементов для моделей, например радиация, стабильность, высота перемешивания, коэффициенты рассеяния и т. д.), подобную Гибридной модели дисперсии факела загрязнения (Hanna и Chang, 1992) или Схеме параметризации городских метеорологических процессов в местном масштабе (Grimmond и Oke, 2002), для расчета характеристик на базе данных гораздо более сложных

измерений, таких как атмосферная стабильность, статистика турбулентности, потоки импульса, тепла и водяного пара. В свою очередь это делает возможным предсказание высоты перемешивания и дисперсии загрязняющих веществ (COST 710, 1998; COST 715, 2001). Кроме того, в дневное время солнечная радиация может быть использована в качестве параметра, отражающего наличие облаков, и это является важным при оценке условий, связанных с солнечной энергетикой, уровнями дневного освещения в зданиях, комфортом пешеходов, определенными законодательными правами на солнечное освещение и многими другими областями. В то же время измерение солнечной радиации автоматическими станциями является простым и относительно недорогостоящим.

В городских условиях соблюдать требования по установке пиранометров и датчиков других видов приходящей радиации довольно просто. Главным образом, необходимо обеспечить, чтобы чувствительный элемент датчика располагался горизонтально, не подвергался вибрации и не экранировался горизонт окружающими объектами, включая как стационарные объекты (здания, мачты, деревья и холмы), так и эпизодически возникающие (облака, образовавшиеся от вытяжных вентиляторов или шлейфа загрязняющих веществ). Поэтому часто идеальным вариантом является высоко расположенная, стабильная и доступная платформа, например крыша высотного здания. Однако бывает невозможным предотвратить краткосрочное экранирование прямой солнечной радиации мачтами, антеннами, флагштоками и аналогичными структурами. В таких случаях следует полностью документировать местонахождение препятствия и продолжительность его воздействия на чувствительный элемент датчика (см. 9.4). Методы корректировки для подобных помех изложены в томе I, глава 7. Важно также исключить попадание на датчик радиации, отраженной от светлоокрашенных стен, находящихся выше линии местного горизонта. Важно регулярно очищать открытые входные окна датчиков (плоские или полусферические). В случае сильно загрязненной окружающей среды чистку следует выполнять ежедневно.

Желательно также учитывать другие виды приходящей радиации, однако это зависит от природы городской среды, потребностей и стоимости датчиков. Этими видами радиации (и приборами для их измерения) являются: прямая солнечная (пиргелиометр), рассеянная небом (пиранометр с затеняющим диском либо с теневым кольцом), ультрафиолетовая (широкополосные либо узкополосные датчики и спектрометры), и длинноволновая (пиргеометр). Результаты измерений этих видов радиации имеют широкое применение: прямая солнечная радиация (характеристики прозрачности атмосферы в целях принятия мер по удалению загрязнения); рассеянная радиация (дневное освещение внутри помещений, солнечные панели); ультрафиолетовая радиация (общее содержание озона и предотвращение вредного воздействия на людей, растения, материалы); длинноволновая (мониторинг ночных облаков, усиление потока в результате воздействия загрязняющих веществ и острова тепла).

9.3.7.2 ***Уходящие виды радиации радиационный баланс***

В настоящее время на городских станциях редко осуществляется мониторинг отраженной солнечной радиации, излучаемой и отражаемой длинноволновой радиации, а также радиационного баланса полного, коротковолнового и длинноволнового излучения. Это означает, что важные характеристики городской климатической системы остаются неисследованными. Неизвестным остается альбедо подстилающих поверхностей в городах, от которого зависит, будет ли солнечная радиация поглощаться данной структурой или вернется обратно в атмосферу и космос. Утрачивается возможность применения закона Стефана-Больцмана для определения температуры излучаемой поверхности. Теряется значение критической чистой радиации, которая определяет нагрев/охлаждение городской структуры, а также обмен водой и теплом между поверхностью и городским пограничным слоем. Из этих данных больше всего не хватает данных о радиационном балансе. Итоговые данные от хорошо обслуживаемого чистого радиометра являются бесценными для введения в предпроцессорную схему, а также замены измерений облачности.

Основной трудностью для точного измерения параметров уходящей радиации является установка направленного вниз радиометра таким образом, чтобы обеспечить обзор репрезентативной зоны, расположенной ниже городских строений. Приемник радиации (уравнение 9.1 и рисунок 9.2) должен идеально «видеть» репрезентативную выборку основных поверхностей, способствующих образованию данного вида радиации. В случаях эталонной установки, определенных в соответствующих разделах томе I, глава 7, надлежащей считается высота датчика в 2 м над поверхностью скошенного газона. На этой высоте 90 % исследуемого потока поступает от участка поверхности диаметром 12 м. Очевидно, что требуется гораздо большая высота размещения датчика над территорией, которая содержит достаточную совокупность поверхностных характеристик для того, чтобы быть репрезентативной для данной ГКЗ. В случае установки радиометра на высоте 20 м (наверху 10-метровой мачты, смонтированной на здании высотой 10 м) в районе с плотной инфраструктурой 90 % исследуемого потока поступает от участка поверхности диаметром 120 м. Это может показаться достаточным для того, чтобы «видеть» несколько зданий и дорог, однако необходимо также учитывать, что данная система является трехмерной, а не почти такой же плоской, как трава. В этом примере на уровне крыши зона обзора охватывает только 60 м в диаметре, и в нее может попасть относительно небольшое число зданий.

Возникает вопрос о том, может ли этот датчик «видеть» соответствующий спектр климатически активных поверхностей. Это означает, что этот датчик должен не только видеть необходимый набор типов поверхности в горизонтальной проекции, но также и делать выборку соответствующих частей крыши, стены и наземных поверхностей, включая правильные части каждого из этих элементов, которые находятся на солнце или в тени. Это не является тривиальной задачей, решение которой зависит от структуры поверхности и позиций как датчика, так и солнца, в пространстве над местом размещения группы датчиков. Soux et al. (2004) разработали модель для расчета этих разных частей для относительно простых, схожих с городскими, геометрических групп. Однако необходимо проделать больший объем работы перед тем как будут получены руководящие указания, конкретно касающиеся отдельных типов ГКЗ. Как представляется, высота датчика должна быть больше высоты проведения измерений турбулентности. Нелинейный характер воздействий, связанных с зоной радиационного источника, четко вытекает из уравнения 9.1 (см. рисунок 9.2). Увеличение весового коэффициента поверхностей, находящихся ближе к мачте, означает, что наибольшее значение имеет непосредственное окружение. В предыдущем примере радиометра, находящегося на высоте 20 м здания высотой 10 м, 50 % сигнала на уровне крыши поступает из круга диаметром всего лишь в 20 м (возможно, только одно здание). Если крыша этого здания или любая другая поверхность, на которой смонтирована мачта, имеет не типичные радиационные характеристики (альбедо, излучательная способность или температура), то это диспропорционально воздействует на поток, который предположительно является репрезентативным для более обширной территории. Вследствие этого следует избегать крыш с большими участками из стекла или металла, либо крыш нехарактерного темного или светлого цвета, или крыш, предназначенных для того, чтобы не пропускать удерживаемую стоячую воду.

Проблемы, связанные с направленными вниз и находящимися на больших высотах радиометрами, включают: (a) трудность обеспечения горизонтального расположения плоскости чувствительного элемента; (b) обеспечение условий отсутствия попадания на чувствительный элемент датчика прямой солнечной радиации при больших зенитных углах солнца или приходящей длинноволновой радиации атмосферы; (c) рассмотрение вопроса о необходимости корректировать результаты измерений с учетом ослабления радиации воздушным слоем между прибором и изучаемой поверхностью. Для исключения помех, создаваемых солнечным или длинноволновым излучением вблизи горизонта, может использоваться узкополосный круглый экран, ограничивающий поле зрения у горизонта на несколько градусов. Это вызовет необходимость ввода незначительной поправки к показаниям прибора, учитывающей недостающий вклад рассеянной солнечной радиации (см. том I, глава 7, приложение 7.E, для случая применения круглого экрана) и дополнительного длинноволнового излучения ободка.

Обращенные вниз датчики могут иметь дополнительную погрешность, обусловленную нагревом солнцем открытой их задней части. Этого следует избегать посредством использования определенного вида укрытия или изоляции. Также более трудным может оказаться поддержание чистоты входных окон прибора и удаления попавших на них капель воды или кристаллов льда. Отсутствие возможности следить за скоростью и эффективностью вентиляции прибора на определенной высоте означает, что предпочтение следует отдавать приборам, которые не нуждаются в вентиляции. Преимуществом является возможность опускания мачты для проведения чистки, замены осушителя и полиэтиленовых куполов, а также корректировки горизонтальности.

Рекомендуется следующее:

a) размещать направленные вниз радиометры на высоте, по меньшей мере, равной высоте датчика турбулентности (а именно, рекомендуется высота, равная как минимум 2 z_H), а предпочтительно — еще выше;

b) радиационные характеристики непосредственного окружения радиационной мачты должны быть репрезентативными для изучаемого городского района.

9.3.8 Продолжительность солнечного сияния

Загрязненная атмосфера городских районов является причиной уменьшения продолжительности солнечного сияния по сравнению с окружающей их местностью или величинами ее в период, предшествующий урбанизации (Landsberg, 1981). К городской станции применимы рекомендации в отношении приборов, методов и установки приборов, изложенные в томе I, глава 8, настоящего Руководства.

9.3.9 Видимость и метеорологическая оптическая дальность

Воздействия городских районов на показатели видимости и метеорологической оптической дальности (МОД) имеют сложный характер, поскольку, с одной стороны, загрязняющие вещества, как правило, снижают видимость и МОД в результате того, что они уменьшают освещенность и способствуют образованию определенных видов тумана, с другой стороны, воздействия, вызванные городским островом тепла и влажности, часто способствуют уменьшению частоты и плотности тумана и низкой облачности. Получение информации о видимости и МОД в пределах города имеет большую практическую ценность для таких сфер деятельности, как авиация, перевозки по дорогам и рекам, оптическая связь, что объясняет необходимость включения подобных наблюдений в программу наблюдений городских станций.

Оптическая видимость снижается в городах. Хотя имеются многочисленные объекты и огни, которые могут служить в качестве ориентиров дальности до цели, трудным может оказаться получение достаточно непрерывной линии видимости на рекомендованной высоте в 1,5 м. Использование поднятой платформы или верхнего уровня зданий считается нестандартным и не рекомендуется. На наблюдения, проводимые вблизи от уровня крыш, могут также повлиять «мерцание» нагретых крыш или «испускание пара» воды с мокрых крыш во время их высыхания, или загрязняющие вещества и водные облака, выбрасываемые из каминов и других вентиляционных отверстий.

Приборы для измерения МОД, такие как трансмиссометры и измерители рассеяния (нефелометры), обычно хорошо работают в городских районах. Они требуют относительно коротких расстояний и будут давать хорошие результаты, если оптика поддерживается в чистом состоянии. Естественно, прибор должен быть установлен в месте, которое является репрезентативным для окружающей атмосферной среды, однако требования не являются более строгими по сравнению с теми, которые предъявляются к другим приборам, размещенным в ГПС. Может оказаться, что для определенных применений знание колебания высоты МОД имеет ценное значение, к примеру положение верхней части тумана или основания облаков.

9.3.10 **Испарение и другие потоки**

Градостроительство обычно ведет к уменьшению испарения, главным образом, вследствие того факта, что застроенные объекты делают поверхность водонепроницаемой, а растительность уничтожается. Тем не менее, в некоторых естественных засушливых регионах испарение может усилиться, если водоснабжение осуществляется из других мест и используется для полива городской растительности.

В городских районах существует очень мало станций для измерения испарения. Это объяснимо, поскольку почти невозможно толковать данные измерений испарения, осуществленных в ГПС с использованием различных методов измерения испарения — атмометров, испарительных бассейнов или лизиметров. Как об этом подробно говорится в томе I, глава 10, настоящего Руководства, подобные измерения должны проводиться в месте, которое является репрезентативным для данной территории; на расстоянии от препятствий не менее пятикратного размера их высоты или десятикратного размера в случае группы препятствий; приборы не должны находиться на бетоне или асфальте; они не должны быть в тени; и рядом с приборами не должно быть твердых поверхностей, которые могут вызвать попадание в них воды. Помимо этих проблем, предполагается, что поверхности приборов действуют в качестве заменителей растительности или открытых водных систем. Такие поверхности не являются, вероятно, репрезентативными для расположенной вокруг городской территории. Следовательно, на них действует микро-адвекция, которая, вероятно, вызывает испарение с аномально высокой скоростью.

Рассмотрим случай эвапорометра, функционирующего в течение длительного периода, первоначально в полузасушливом месте, которое отводится затем для сельскохозяйственных целей с использованием орошения, после чего это место отводится для строительства пригородных районов, а позднее оказывается в центре плотно застроенного городского района. Первые регистрируемые этим прибором данные об испарении характеризуются весьма высокими показателями, поскольку это место было с открытым водным пространством, окруженное территорией с жарким сухим климатом. Поэтому, хотя фактическое испарение в этом районе находится на весьма низком уровне, адвекция обусловила значительные потери воды из эвапорометра. Поскольку, благодаря введению орошения, климатические условия стали более прохладными и более влажными, показания его резко снизились, однако фактическое испарение является значительным. Поскольку городское развитие в значительной мере приводит к обратным экологическим изменениям и уменьшает скорость ветра у земли, потери воды из эвапорометра увеличиваются, однако фактическое испарение, вероятно, резко уменьшается. Таким образом, в рамках всей этой последовательности испарение, регистрируемое прибором, и фактическое испарение находятся, вероятно, в противофазе. Во время сельскохозяйственного периода коэффициент испарения мог бы, вероятно, применяться для приведения показаний эвапорометра к показаниям, характерным для короткой травы или зерновых культур. Не существует ни одного подобного коэффициента для пересчета показаний приора в показатели испарения в городских условиях, даже в том случае, если эти показания не искажаются сложным характером окружающей среды в ГПС. Короче говоря, использование стандартных приборов для измерения испарения в ГПС не рекомендуется.

Размеры и неоднородность городских районов делают нецелесообразным использование полномасштабных лизиметров (например, требование о том, чтобы прибор находился на расстоянии не менее 100–150 м от места изменения окружающей территории). Микролизиметры могут измерять испарение с отдельных поверхностей, однако они все же чувствительны к условиям окружающей их среды. Подобные лизиметры требуют большого внимания, включая обновление почвенного монолита для предотвращения высыхания, и не подходят для регулярных долгосрочных наблюдений.

Информация об усредненном испарении в пространстве и других турбулентных потоках (импульс, теплосодержание, двуокись углерода) может быть получена посредством проведения наблюдений над ПСШ. Некоторые из этих потоков вызывают значительный практический интерес в городских районах по сравнению с многими районами в сельской местности. Например, для определения ветровой нагрузки на структуры и

дисперсию факелов от загрязнителей воздуха необходимы данные о вертикальном потоке горизонтального импульса и суммарные статистические данные и характеристики ветра. Поток сухого тепла является существенным исходным элементом для расчета атмосферной стабильности (например, число Ричардсона для потока и длина Обухова) и толщины городского слоя перемешивания. Вместо методов градиента по профилю рекомендуются быстродействующие методы турбулентной ковариации или стандартного отклонения. К числу соответствующих приборов относятся акустические анемометры, инфракрасные гигрометры, газовые анализаторы и сцинтилляционные спектрометры. Датчики должны быть установлены точно так же, как и датчики ветра: выше ПСШ, но ниже внутреннего пограничного слоя изучаемой ГКЗ. Кроме того, подобные измерения основаны на том, что «отпечаток» потока является достаточно крупным для того, чтобы быть репрезентативным для изучаемого ограниченного района.

Если подобные измерения потока являются невозможными с точки зрения имеющихся финансовых и технических ресурсов, то приемлемым методом получения репрезентативных в отношении воздуха величин испарения и потока тепла в городе является метеорологическая предпроцессорная схема, такая как метод ограничения озона, гибридная модель дисперсии шлейфа загрязняющих веществ или схема параметризации городских метеорологических процессов (см. 9.3.7). Подобные схемы требуют только пространственно репрезентативных наблюдений за приходящей солнечной радиацией, температурой воздуха, влажностью, скоростью ветра и общих оценок усредненных характеристик подстилающей поверхности, таких как альбедо, излучательная способность, высота шероховатости и части городского района, которые озеленены, застроены или орошаются. Очевидно, что наблюдения за скоростью ветра должны соответствовать рекомендациям, содержащимся в п. 9.3.5. В идеальном варианте должны также проводиться наблюдения температуры воздуха и влажности над ПСШ; однако если имеются только значения по ГПС, это обычно является приемлемым, поскольку подобные схемы не являются очень чувствительными к указанным переменным.

9.3.11 **Влажность почвы**

Информация о влажности городской почвы может быть полезной, например, для садовников или при расчетах испарения. О ее тепловом значении в городских ландшафтах свидетельствуют совершенно отчетливо видимые очертания на изображениях в инфракрасном диапазоне частот, полученные посредством методов дистанционного зондирования. В дневное время любой участок земли с активной растительностью или орошением является заметно более холодным по сравнению с застроенным, заасфальтированным или голым участком земли. Однако задача по проведению выборочных измерений для получения репрезентативных данных о влажности почвы является весьма сложной.

Одна из упомянутых проблем объясняется тем фактом, что значительные части поверхностей городских территорий являются полностью герметичными из-за вымощенных или строительных объектов; структура значительной части открытой почвы была грубо нарушена в прошлом при проведении строительных работ или когда эти территории были покинуты после их использования в целях урбанизации; «почва» может быть фактически сформирована в значительной степени из каменных обломков старых зданий или материалов для мощения улиц или могла быть привезена для замены существующей почвы или наполнительного материала из дальних мест; влажность почвы может также испытывать воздействие в результате утечки воды из локализованных источников, таких как сломанные трубы водопровода или канализации или в результате орошения. Следствием воздействия всех этих элементов является весьма пятнистая картина влажности почвы в городах, которая может включать совершенно сухие участки, расположенные в непосредственной близости от залитых водой лужаек. Таким образом, хотя можно получить определенное представление о влажности почвы в местном масштабе, в районах с весьма низким уровнем урбанизации или в тех местах, где был сохранен полудикий ландшафт, почти невозможно характеризовать состояние влаги почвы в большинстве городских районов. Кроме того, в этом случае лучшим вариантом

может быть использование величин, характерных для сельской местности, которые дают общее фоновое значение для региона, вместо того чтобы вообще не иметь никаких оценочных данных о почвенной влаге.

9.3.12 Текущая погода

При наличии наблюдателей и обычного приборного обеспечения станции значительную ценность представляют наблюдения за текущей погодой и атмосферными явлениями, такими как изморозь, поверхностный лед, туман, пыльные и песчаные бури, воронкообразные облака и ливни, грозы с молнией, в особенности те из них, которые представляют угрозу для эффективности или безопасности городской деятельности, к примеру транспорта. Если имеются возможности архивации, то веб-камеры могут предоставить очень полезные сведения о состоянии облаков, краткосрочных изменениях в облачности, связанных с фронтами, полосах тумана, которые убывают и перемещаются, низкой облачности, которая поднимается и снижается, а также о появлении фронтов пыльных и песчаных бурь.

9.3.13 Облачность

Хотя в крупных городах редко проводятся наблюдения за облачным покровом, эта информация является весьма полезной. Все методы и приборы, описанные в томе I, глава 15, настоящего Руководства, применимы и для условий городов. Визуальное наблюдение затрудняется из-за большого количества и интенсивности источников света в городах, сочетающихся с поддернутой дымкой и иногда загрязненной атмосферой. По мере возможности, при размещении наблюдательной площадки следует избегать мест с особенно ярким освещением.

9.3.14 Состав атмосферы

Все более важное значение приобретает мониторинг атмосферного загрязнения городской окружающей среды. Однако это другая специальная дисциплина, и она не будет рассматриваться в этой главе. В томе I, глава 16, настоящего Руководства, рассматривается данная проблематика в более широком контексте Глобальной службы атмосферы.

9.3.15 Методы зондирования городского пограничного слоя

Поскольку вызываемые городскими условиями воздействия простираются по всему планетарному пограничному слою (рисунок 9.1), необходимо использовать башни и мачты для получения данных наблюдений над ПСШ. Особый интерес вызывают воздействия на поле ветра и вертикальную структуру температуры, включая высоту слоя перемешивания и их общую роль в оказании влияния на распространение загрязняющих веществ.

Для городских районов приемлемы все специальные методы зондирования, изложенные в главе 5 настоящего тома. Потенциально весьма полезными являются акустические зонды (содары); тем не менее необходимо признать, что они страдают двумя недостатками: во-первых, их сигналам часто мешают различные городские источники шума (дорожное движение, воздушные суда, строительные работы и даже газонокосилки); и во-вторых, их работа может быть запрещена, если они вызывают раздражение у населения. Радиолокаторы для получения профилей ветра, радиоакустические системы зондирования, микроволновые радиометры, микроволновые профилометры температуры, лазерные радары (лидары) и модифицированные облакомеры — все эти измерительные средства являются подходящими системами для мониторинга городской атмосферы, если можно избежать помех в результате отражения от наземных предметов. Кроме того, шары-зонды для отслеживания траектории ветра, радиозонды пограничного слоя (минизонды) и оснащенные приборами привязные аэростаты — все они могут использоваться весьма успешно, если органы управления воздушным

движением дают разрешение на их использование. Оснащенные приборами башни и мачты могут стать великолепным средством для размещения датчиков над уровнем крыши и в инерционном подслое, а очень высокие строения и конструкции могут обеспечить проведение измерений выше слоя перемешивания. Однако необходимо уделять особое внимание мерам предосторожности, изложенным в главе 5, 5.3.3, настоящего тома, которые касаются потенциального воздействия инфраструктуры на характеристики атмосферы. Хотя высотные здания могут, по-видимому, явиться средством для проникновения выше в городской пограничный слой, развертывание датчиков может быть бесполезным и, возможно, вводящим в заблуждение до тех пор, пока не будет дана полная оценка воздействий создающих помехи препятствий и не будут приняты меры для их предотвращения.

9.3.16 Спутниковые наблюдения

Дистанционное зондирование со спутника с адекватным разрешением в инфракрасном диапазоне может оказаться полезным для обследования обширных городских районов. Описание этих методов имеется в томе IV, а обзор их использования в науке о городском климате содержится в публикации Voogt and Oke (2003).

9.4 МЕТАДАННЫЕ

Полная и точная документация по метаданным станции (том I, глава 1, настоящего Руководства) является абсолютно необходимой для любой станции; она должна «обеспечить, чтобы у конечного пользователя данных не было никаких сомнений относительно тех условий, в которых данные были зарегистрированы, собраны и переданы, для того чтобы сделать точные выводы из их анализа» (WMO, 2003). Можно утверждать, что это является даже еще более существенным в отношении городской станции, поскольку городские участки характеризуются как необычайно высокой степенью сложности, так и большей склонностью к переменам. Эта сложность делает каждый участок действительно уникальным, в то время как большие открытые участки в сельской местности соответствуют относительно стандартному образцу. Перемены означают, что контрольные мероприятия по данному участку являются весьма динамичными, в связи с чем документация должна часто обновляться. На рисунке 9.6 отражено, что минимальные требования к метаданным станции, установленные ВМО (WMO, 2003), полностью выполняются и что есть надежда на то, что некоторые или все из рекомендованных в этих требованиях видов эффективной практики осуществляются. В данном случае особое внимание уделяется специальным городским характеристикам, которые необходимо включать в метаданные, в частности в категориях «местная окружающая среда» и «исторические события».

9.4.1 Местная окружающая среда

Как отмечается в п. 9.1.1, в случае городских станций приборы устанавливаются как внутри городского полога (ГПС), так и над ним. Следовательно, описание условий окружающей местности должно быть сделано как в микромасштабе, так и в местном масштабе. Как следует из публикации ВМО (WMO, 2003), для адаптации с целью характеристики городской окружающей среды рекомендуется регистрировать на станции следующую описательную информацию:

a) карта в местном масштабе — мезомасштабе (~1:50 000), как показано на рисунке 9.6 (a), которая обновляется, в случае необходимости, для описания крупномасштабных изменений в городском развитии (например, передача незастроенных участков земли под жилищное строительство, сооружение торгового центра или аэропорта, строительство новых высотных зданий, вырубка лесного массива, осушение озера, создание водохранилища). В идеальном варианте следует также предоставить аэрофотоснимок данного района, а также

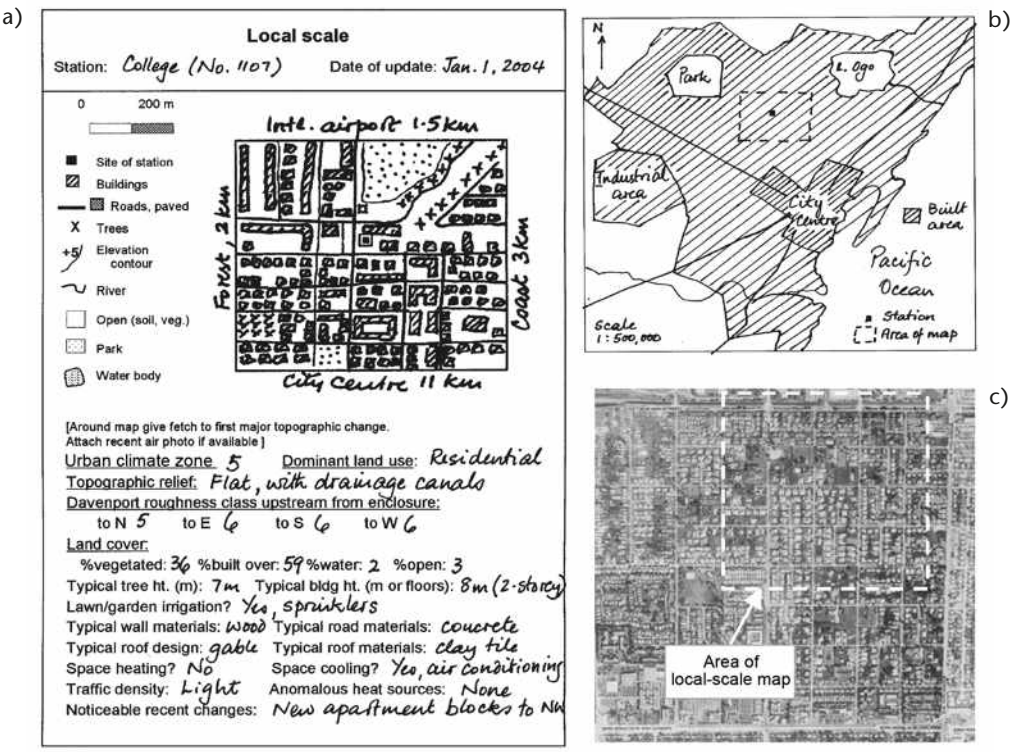


Рисунок 9.6. Минимальная информация, необходимая для описания локального (местного) масштаба окружающей среды городской станции, содержит a) шаблон для документирования местных условий; b) схематическую карту расположения станции в более крупной городской зоне и c) аэрофотоснимок.

простую схематическую карту (в масштабе 1:500 000 или 1:1 000 000) для указания местоположения станции по отношению к остальному урбанизированному району (рисунки 9.6 (b) и (c)), и любые основные географические характеристики, такие как водоемы, горы и долины или изменение типа экосистемы (пустыня, болото, лес). Особенно показательным может быть перспективный аэрофотоснимок, поскольку на нем также видна высота зданий и деревьев. Важное значение в том, что касается воздействий на микроклимат, имеют, при их наличии, аэрофотоснимки или спутниковые изображения в инфракрасном диапазоне частот. Например, относительно прохладные днем поверхности свидетельствуют о наличии влаги или материалов с аномальной излучательной способностью поверхности. Районы, более теплые по сравнению с обычными, могут быть очень сухими или иметь низкое альбедо или очень хорошую изоляцию. В ночное время относительная прохлада свидетельствует о хорошей изоляции, а относительное тепло говорит об обратном или показывает наличие материала с высокой теплопроводимостью, который отдает накопленное в дневное время тепло, или же анормального источника тепла антропогенного происхождения. ГКЗ и классы шероховатости Дейвенпорта могут оцениваться при помощи таблиц 9.1 или 9.2;

b) микромасштабная схематическая карта (~1:5 000), составленная на основе метаданных и обновляемая каждый год (рисунок 9.7 (a));

c) картирование горизонта с использованием данных обследования с помощью клинометра и компаса вокруг метеорологической будки (как показано на диаграмме в нижней части модели, рисунок 9.7 (a), и фотография аппаратом с линзами типа «рыбий глаз», сделанная вертикально по отношению к зениту, когда задняя часть фотоаппарата находится на поверхности земли поблизости от метеорологической будки, но таким образом, чтобы она не закрывала какую-либо часть неба (рисунок 9.7 (b)). При отсутствии фотоаппарата с линзами типа «рыбий глаз» более

простым подходом является снятие фотографии полусферического рефлектора (рисунок 9.7 (c)). Эти материалы следует обновлять ежегодно или еще чаще, если наблюдаются явные изменения в закрытии горизонта, такие как сооружение или снос находящегося поблизости здания или удаление деревьев;

d) фотографии, сделанные с основных направлений по отношению к приборному укрытию или другим местам нахождения приборов и башен;

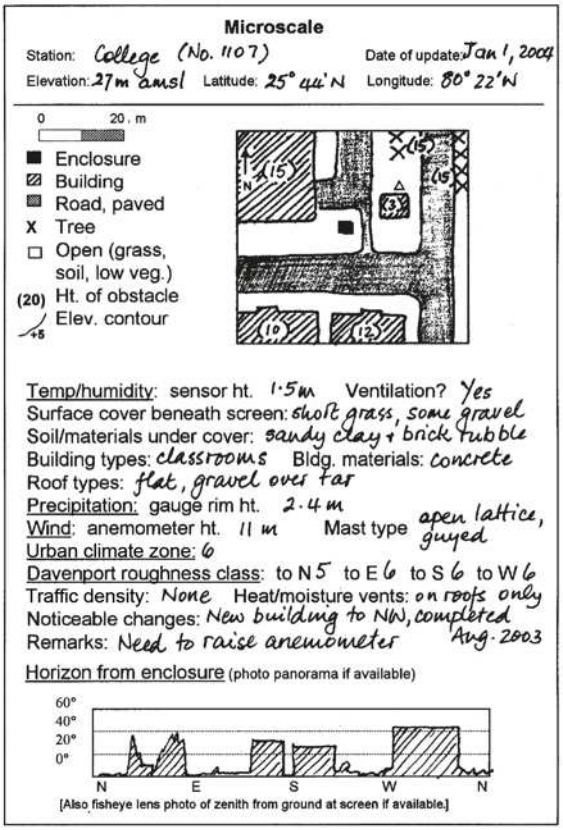
e) микромасштабная зарисовка приборного укрытия, которая обновляется, когда приборы перемещаются или происходят другие серьезные изменения;

f) если некоторые из проводимых на станции измерений (ветер, радиация) проводятся в стороне от укрытия (на мачтах, крышах, в более открытых местах), повторить пункты (b)–(d) выше для каждой площадки.

9.4.2 Исторические события

Городские районы подвержены воздействию многочисленных факторов перемен, включая новое муниципальное законодательство, которое может изменить виды землепользования, разрешенные в данной местности, или высоту зданий, или допустимые материалы и строительную технологию, а также законы и нормативы, касающиеся окружающей среды, орошения или дорожного движения. Весьма кардинальные изменения в определенном районе могут быть вызваны инициативами в области центрального планирования, связанными с возобновлением градостроительства. Многие

a)



b)



c)

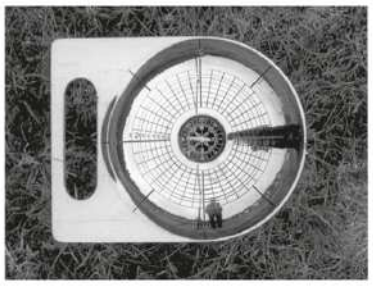


Рисунок 9.7. Информация, требуемая для описания микромасштаба окружения городской климатической станции; (a) шаблон для файла метаданных; (b) пример фотоснимка объективом типа «рыбий глаз» уличного каньона иллюстрирует закрытость горизонта и (c) полусферический рефлектор Метеорологического бюро СК, расположенный на дождемере.

главные изменения в природной среде района могут быть также следствием миграций групп людей в этот район или из него или когда район становится или перестает быть удобным или престижным для проживания или работы. Городская территория может быть центром конфликта и разрушения. Подобные события следует оформлять документально, с тем, чтобы последующие пользователи данных понимали определенный контекст изменений, которые могут, вероятно, проявиться в городском климате.

9.4.3 Соблюдение других рекомендаций ВМО

На городских станциях следует соблюдать все другие рекомендации ВМО, касающиеся документального оформления метаданных, включая идентификаторы станции, географические данные, установку приборов, типы приборов, монтаж и укрытие приборов, регистрацию и передачу данных, практические методы наблюдений, хранение метаданных и доступ к ним, а также обработку данных.

9.5 ОЦЕНКА ОКАЗЫВАЕМЫХ ГОРОДОМ ВОЗДЕЙСТВИЙ

Исследование городской погоды и климата характеризуется почти уникальной перспективой. Люди интересуются ролью человека в изменении городской атмосферы. Поэтому, в отличие от других представляющих интерес видов окружающей среды, для которых достаточным является изучение атмосферы как таковой, в городских районах существует интерес к изучению оказываемых городом воздействий. Это означает оценку возможных изменений в метеорологических переменных, поскольку городская территория со временем развивается, и сравнение этих переменных с тем, что случилось бы, если бы данный населенный пункт не был построен. Это вопрос, на который по существу невозможно найти ответ, когда населенный пункт уже построен или даже если он не был построен, поскольку ландшафт вполне может перейти в иное состояние по сравнению с тем, которое существовало раньше (например, вследствие других видов деятельности человека, таких как сельское хозяйство или лесоводство). Оценка воздействий города чревата поэтому трудностями методологического характера, и невозможна никакая «истина», а лишь заменяющие истину аппроксимации. Если городская станция создана в качестве самостоятельной или является частью сети для оценки воздействий города на погоду и климат рекомендуется внимательно учитывать анализ, содержащийся в работах Lowry (1977) и Lowry и Lowry (2001).

9.6 РЕЗЮМЕ КЛЮЧЕВЫХ ПУНКТОВ ДЛЯ ГОРОДСКИХ СТАНЦИЙ

9.6.1 Принципы работы

При создании городской станции часто неприемлемыми являются строгие руководящие указания, касающиеся климатических станций. Необходимо применять руководящие принципы, а не правила, и придерживаться гибкого подхода. Часто это означает иные решения для отдельных атмосферных характеристик и может означать, что не все наблюдения на «площадке» проводятся в одном и том же месте.

Поскольку окружающая среда городских станций часто меняется по мере развития города, часто обновляемые метаданные имеют такое же важное значение, как и собранные метеорологические данные. Без четких описаний станций невозможно увязывать результаты измерений с характеристиками окружающей территории.

9.6.2 **Выбор места размещения**

Первым существенным шагом при выборе мест размещения городских станций является оценка физической природы городской территории, используя для этого классификацию климатических зон. Благодаря этому будут определены однородные территории.

Городская территория состоит из нескольких видов городских территорий. Для того, чтобы создать картину климата населенного пункта, необходимо иметь множество станций. Следует выбирать места их размещения, где можно проводить измерения параметров воздуха, поток которого проходит через относительно однородную городскую территорию, и которые являются, таким образом, репрезентативными для единой климатической зоны. Необходимо позаботиться об обеспечении того, чтобы микроклиматические воздействия не создавали помех для измерений параметров климата в местном масштабе.

9.6.3 **Измерения**

В отношении измерений следует учитывать следующие ключевые пункты:

a) измерения температуры и влажности воздуха, произведенные в ГПС, могут быть репрезентативными в местном масштабе при условии тщательного выбора места размещения станций. Если наблюдения за этими переменными проводятся на уровне выше крыши, в том числе выше ПСШ, то нет никакой установленной связи между последними и измерениями в ГПС;

b) измерения параметров ветра и потока турбулентности следует проводить над ПСШ, но в пределах внутреннего пограничного слоя выбранной ГКЗ. Подобные измерения должны свидетельствовать о том, что «отпечаток» поверхности, используемый для измерений, является репрезентативным для климатической зоны. Что касается ветра, то можно увязывать данные о потоке на этом уровне с данными потока, зарегистрированными в пределах растительного покрова;

c) наблюдения за осадками можно проводить либо вблизи поверхности земли на незакрытой препятствиями площадке, либо над ПСШ, с внесением поправок в соответствии с данными параллельных измерений параметров ветра;

d) за исключением измерений приходящей солнечной радиации следует избегать размещения приборов наверху крыш, если только они не устанавливаются на высокой мачте;

e) измерения суммарных и восходящих радиационных потоков должны проводиться на высотах, которые обеспечивают возможность адекватных измерений разных типов поверхности и их ориентации, характерной для изучаемой зоны.

СПРАВОЧНАЯ И ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ЛИТЕРАТУРА

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

———, 2011*b*: *Наставление по кодам* (ВМО-№ 306), тома I.1 и I.2. Женева.

———, 201*5a* (обновлено в 2018 году): *Технический регламент* (ВМО-№ 49), том I. Женева.

———, 201*5b* (обновлено в 2017 году): *Наставление по Глобальной системе наблюдений* (ВМО-№ 544), том I. Женева.

Arya, P.S., 2001: *Introduction to Micrometeorology*. Academic Press, New York.

Auer, A.H. Jr., 1978: Correlation of land use and cover with meteorological anomalies. *Journal of Applied Meteorology*, 17(5):636–643.

Britter, R.E. and S.R. Hanna, 2003: Flow and dispersion in urban areas. *Annual Review of Fluid Mechanics*, 35:469–496.

Christen, A., 2003: (personal communication). Institute of Meteorology, Climatology and Remote Sensing, University of Basel.

Christen, A., R. Vogt, M.W. Rotach and E. Parlow, 2002: *First results from BUBBLE I: Profiles of fluxes in the urban roughness sublayer. Proceedings of the Fourth Symposium on Urban Environment*, (Norfolk, Virginia), American Meteorological Society, Boston, pp. 105-106.

COST 710, 1998: *Final Report*: *Harmonisation of the Pre-processing of Meteorological Data for Atmospheric Dispersion Models*. European Commission. EUR 18195 EN.

COST 715, 2001: *Preparation of Meteorological Input Data for Urban Site Studies*. European Commission, EUR 19446 EN.

Davenport, A.G., C.S.B. Grimmond, T.R. Oke and J. Wieringa, 2000: *Estimating the roughness of cities and sheltered country. Proceedings of the Twelfth Conference on Applied Climatology* (Asheville, North Carolina), American Meteorological Society, Boston, pp. 96–99.

DePaul, F.T. and C.M. Shieh, 1986: Measurements of wind velocity in a street canyon. *Atmospheric Environment*, 20:455–459.

Ellefsen, R., 1991: Mapping and measuring buildings in the canopy boundary layer in ten US cities. *Energy and Buildings*, 16:1025–1049.

Garratt, J.R., 1992: *The Atmospheric Boundary Layer*. Cambridge University Press, Cambridge.

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.

Grimmond, C.S.B. and T.R. Oke, 1999: Aerodynamic properties of urban areas derived from analysis of surface form. *Journal of Applied Meteorology*, 38(9):1262–1292.

———, 2002: Turbulent heat fluxes in urban areas: Observations and a local-scale urban meteorological parameterization scheme (LUMPS). *Journal of Applied Meteorology*, 41(7):792–810.

Halitsky, J., 1963: Gas diffusion near buildings. *Transactions of the American Society of Heating, Refrigerating and Air-conditioning Engineers*, 69:464–485.

Hanna, S.R. and J. C. Chang, 1992: Boundary-layer parameterizations for applied dispersion modeling over urban areas. *Boundary-Layer Meteorology*, 58:229–259.

Hunt, J.C.R., C.J. Abell, J.A. Peterka and H.Woo, 1978: Kinematical studies of the flow around free or surface-mounted obstacles: Applying topology to flow visualization. *Journal of Fluid Mechanics,* 86:179–200.

Kljun, N., P. Calanca, M.W. Rotach, H.P. Schmid, 2004: A simple parameterization for flux footprint predictions. *Boundary-Layer Meteorology*, 112:503–523.

Kljun, N., M. Rotach and H.P. Schmid, 2002: A three-dimensional backward Lagrangian footprint model for a wide range of boundary-layer stratifications. *Boundary-Layer Meteorology*, 103(2):205–226.

Landsberg, H.E., 1981: *The Urban Climate*. Academic Press, New York.

Lowry, W.P., 1977: Empirical estimation of urban effects on climate: A problem analysis. *Journal of Applied Meteorology*, 16(2):129–135.

Lowry, W.P. and P.P. Lowry, 2001: *Fundamentals of Biometeorology: Volume 2 – The Biological Environment*. Chapter 17, Peavine Publications, St Louis, Missouri, pp. 496–575.

Nakamura, Y. and T.R. Oke, 1988: Wind, temperature and stability conditions in an east-west oriented urban canyon. *Atmospheric Environment*, 22:2691–2700.

Oke, T.R., 1981: Canyon geometry and the nocturnal heat island: Comparison of scale model and field observations. *Journal of Climatology*, 1(3):237–254.

———, 1982: The energetic basis of the urban heat island. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 108(455):1–24.

———, 1984: Methods in urban climatology. In: *Applied Climatology* (W. Kirchofer, A. Ohmura and W. Wanner, eds.). Zürcher Geographische Schriften, 14:19–29.
———, 1987: *Boundary Layer Climates*. Chapter 8, second edition, Routledge, pp. 262–303.
———, 1988*a*: The urban energy balance. *Progress in Physical Geography*, 12:471–508.
———, 1988*b*: Street design and urban canopy layer climate. *Energy and Buildings*, 11:103–113.
———, 1997: Urban environments. In: *The Surface Climates of Canada* (W.G. Bailey, T.R. Oke and W.R. Rouse, eds.). McGill-Queen's University Press, Montreal, pp. 303–327.
Peterson, T.C., 2003: Assessment of urban versus rural in situ surface temperatures in the contiguous United States: No difference found. *Journal of Climate*, 16:2941–2959.
Rotach, M.W., 1999: On the influence of the urban roughness sublayer on turbulence and dispersion. *Atmospheric Environment*, 33:4001–4008.
Schmid, H.P., 2002: Footprint modeling for vegetation atmosphere exchange studies: A review and perspective. *Agricultural and Forest Meteorology*, 113(1):159–183.
Schmid, H.P., H.A. Cleugh, C.S.B. Grimmond and T.R. Oke, 1991: Spatial variability of energy fluxes in suburban terrain. *Boundary-Layer Meteorology*, 54(3):249–276.
Soux, A., J.A. Voogt and T.R. Oke, 2004: A model to calculate what a remote sensor 'sees' of an urban surface. *Boundary-Layer Meteorology*, 111:109–132.
Stull, R.B., 1988: *An Introduction to Boundary Layer Meteorology*. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht.
Verkaik, J.W., 2000: Evaluation of two gustiness models for exposure correction calculations. *Journal of Applied Meteorology*, 39(9):1613–1626.
Voogt, J.A. and T.R. Oke, 2003: Thermal remote sensing of urban climates. *Remote Sensing of Environment*, 86(3):370–384.
Wieringa, J., 1986: Roughness-dependent geographical interpolation of surface wind speed averages. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society,* 112(473):867–889.
———, 1993: Representative roughness parameters for homogeneous terrain. *Boundary-Layer Meteorology*, 63(4):323–363.
———, 1996: Does representative wind information exist? *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 65(1):1–12.
World Meteorological Organization, 2003: *Guidelines on Climate Metadata and Homogenization* (E. Aguilar, I. Auer, M. Brunet, T.C. Peterson and J. Wieringa). World Climate Data and Monitoring Programme No. 53 (WMO/TD-No. 1186). Geneva.
———, 2006: *Initial Guidance to Obtain Representative Meteorological Observations at Urban Sites* (T.R. Oke). Instruments and Observing Methods Report No. 81 (WMO/TD-No. 1250). Geneva.

ГЛАВА 10. МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ НА ДОРОГАХ

10.1 ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

10.1.1 Определение

Метеорологические измерения на дорогах имеют особую ценность в странах, где возможность эксплуатации транспортной инфраструктуры в зимнее время оказывает большое влияние на национальную экономику. В некоторых странах на дорогах существуют и такие опасности как пыльные бури или извержения вулкана. Безопасность и эффективность дорожного транспорта испытывает негативное воздействие следующих условий, которые влияют на скорость, пройденный путь, сцепление покрышек колеса с дорогой и эффективность торможения: плохая видимость (обильные осадки, туман, дым, песчаная буря), сильные ветры, затопление поверхности, просадка земли, снег, переохлажденные осадки и лед.

10.1.2 Цель

Роль оператора дорожной сетью заключается в обеспечении оптимального, безопасного и свободного дорожного движения на магистральных дорогах. Принятие оперативных решений относительно выдачи информации о погоде на дорогах и начале действий по удалению льда и расчистке снега зависит от метеорологических наблюдений на дорогах, которые во все большей мере осуществляются специализированными автоматическими метеорологическими станциями (АМС). Пока эти станции должны соответствовать, насколько это практически возможно, стандартам обычных АМС, касающимся установки и параметров измерений (см. главу 1 настоящего тома), они будут иметь характеристики, конкретно определяющие их функцию, место расположения и требования к проведению измерений.

Решающее значение имеет надежность станций для метеорологических измерений на дорогах, которые предоставляют данные транспортной системе, отвечающей за принятие решений. Каждая станция будет представлять набор параметров, относящихся к ближайшей окружающей среды, которая примыкает к магистралям с высокой плотностью движения и может обеспечивать предоставление данных для повседневного прогнозирования метеорологических условий на дорогах и подачу автоматических сигналов тревоги. Таким образом, важными элементами при выборе, внедрении и управлении сетью наблюдений метеорологических измерений являются надежность оборудования и его техническое обслуживание, энергоснабжение, непрерывность связи и достоверность данных. Для решения этих задач необходимо воспользоваться преимуществами, которые дает эффективное сотрудничество между дорожными эксплуатационными службами и национальной метеорологической и гидрологической службой (НМГС).

10.1.3 Требования к метеорологическим наблюдениям на дорогах

Настоящая глава может помочь в стандартизации метеорологических измерений на дорогах на основе метода, который соответствует общим стандартам ВМО. Однако, тем пользователям, которые захотят использовать данные дорожных наблюдений в иных прикладных метеорологических целях, будут рекомендованы немаловажные отклонения от стандартных решений, к примеру, с местами установки датчиков.

Потребности операторов дорожных сетей сосредоточены в четырех основных областях (WMO, 1997; 2003):

a) *наблюдение метеорологических условий на дорогах в режиме реального времени*: практической задачей, с одной стороны, является информирование участников дорожного движения о тех рисках (прогнозируемых или наблюдаемых), с которыми они, вероятно, столкнутся на указанных магистралях; и, с другой стороны, начало осуществления ряда действий, направленных на усиление безопасности на дорогах, таких как очищение от снега или разбрызгивание химических веществ, понижающих температуру замерзания;

b) *повышение точности прогнозирования температуры дорожного покрытия*: данные измерений дорожных АМС являются важной исходной информацией для программ прогнозирования температуры и состояния дорожного покрытия, которые могут использоваться НМГС. Такая структура имеет возможности для обеспечения постоянных и круглосуточных наблюдений и прогностического обслуживания. На практике в распоряжении прогнозистов имеются два инструмента. Первый инструмент — это компьютерная модель для преобразования метеорологического прогноза атмосферных условий в прогноз температуры дорожного покрытия, учитывая при этом физические характеристики каждой станции. Вторым инструментом является применение алгоритма, основанного на конкретном климатологическом исследовании дорожной поверхности;

c) *база данных дорожных климатических условий*: создание базы данных дорожных климатических условий имеет важное значение, поскольку во многих ситуациях оценка текущих событий вместе с хорошим приборным обеспечением дает возможность опытным операторам дорожных сетей преобразовывать эти данные, пользуясь климатической моделью применительно к другим, хорошо им известным местам. В некоторых случаях для моделирования этого пространственного соотношения могут быть взяты «термальные отпечатки». Регистрация дорожных метеорологических данных будет полезной для анализа предыдущих зимних метеорологических возмущений и осуществления целевых климатологических исследований на дорогах. Национальные метеорологические и гидрологические службы могут восполнить пробелы в данных, а также сравнить и обеспечить качество данных измерений, поступающих из различных источников;

d) *достоверные данные*: лицам, ответственным за состояние дорог, не нужны слишком точные измерения (за исключением температуры дорожного покрытия). Скорее они хотят получить максимально достоверные данные. Иными словами, эти данные должны соответственно отражать реальную ситуацию, а измерительные устройства должны быть функциональными. Часто первостепенное значение имеет непрерывность связи и энергоснабжения.

10.2 СОЗДАНИЕ ДОРОЖНОЙ МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКОЙ СТАНЦИИ

10.2.1 Стандартизированные репрезентативные измерения

Общие требования к метеорологическим станциям, местам их размещения, а также к типу и частоте измерений, определены в публикациях ВМО (WMO, 2003; 2015*a*). Рекомендуется точно следовать этим стандартам и другому соответствующему материалу, содержащемуся в настоящем Руководстве, при создании дорожных метеорологических станций, для того, чтобы проводить стандартизированные репрезентативные измерения, которые могут быть соотнесены с данными измерений на других дорожных станций данной сети, а также с данными эталонных синоптических или климатологических станций, за исключением тех случаев, когда уникальные измерения метеорологических условий на дорогах требуют других стандартов, например в отношении местоположения

датчиков. Рекомендации по оптимальному размещению и плотности станций могут быть получены из местного отделения НМГС, которое может иметь доступ к климатологическим данным по конкретному региону.

Место размещения метеорологической станции выбирается таким образом, чтобы оно должным образом представляло конкретный географический регион. Дорожная метеорологическая станция будет размещаться так, чтобы наилучшим образом отражать ситуацию на дорожной сети или на конкретном участке важной магистрали, которые, как известно, подвергаются воздействию метеорологических и других опасных явлений. Станция должна прилегать поэтому к определенному участку дороги, с тем, чтобы можно было установить датчики состояния дорожного покрытия, и в этой связи может иметь место определенный компромисс между «идеальным» метеорологическим размещением и установкой датчиков. Датчики монтируются таким образом, чтобы их установка обеспечивала наилучшую оптимальную репрезентативность в пространстве и во времени измеряемых переменных величин без ненужных помех со стороны вторичных воздействий. В целом место размещения, непосредственно прилегающее к дороге, должно быть ровным, покрытым короткой травой и не затеняться зданиями или деревьями.

10.2.2 Метаданные станции

В любом случае, важно полностью задокументировать характеристики места размещения станции, а также спецификацию оборудования и датчиков, включая планы и фотографии места размещения. Эти метаданные (том I, глава 1, и том V, глава 1, настоящего Руководства) являются бесценными для управления работой станции и сравнения качества измерений с измерениями, проводимыми в других местах.

10.3 НАБЛЮДАЕМЫЕ ПЕРЕМЕННЫЕ

10.3.1 Метеорологические измерения на дорогах

Важные измерения на дорожных метеорологических станциях, необходимые для прогнозирования условий на дорогах, включают температуру и влажность воздуха, скорость и направление ветра, объем и тип осадков, видимость, суммарную и длинноволновую радиацию, температуру дорожного покрытия и состояние дорожной поверхности. Данные некоторых измерений, например температуры и влажности, будут использованы для прогнозирования условий, вызывающих повышенное внимание участников дорожного движения, в то время как другие данные (о ветре и видимости) могут быть предвестниками предстоящих или наблюдаемых в режиме реального времени опасных явлений; в то же самое время, другие данные (метеорологическая радиация, температура и условия дорожной поверхности) имеют конкретное значение для прогнозирования эксплуатационных характеристик дорожной поверхности.

Выбор датчиков производится в соответствии с их точностью, стабильностью, простотой в техническом обслуживании и калибровке, а также наличием электрических выходов, необходимых для подсоединения к системе автоматического сбора данных. Выбор датчиков и их установка должны соответствовать стандартной практике и рекомендациям ВМО (см. соответствующие главы в томе I настоящего Руководства), за исключением случаев их несовместимости с конкретными требованиями дорожной метеорологии. Точность измерений должна, как правило, соответствовать техническим характеристикам, изложенным в томе I, глава 1, приложение 1.A. Отметим также рекомендации по измерениям на АМС, содержащиеся в главе 1 настоящего тома.

10.3.1.1 ***Температура воздуха***

Датчиком может быть термометр сопротивления (платиновый или стабильный термистр). Датчик температуры воздуха, его защита от радиации или метеорологическая будка и установка должны соответствовать руководящим указаниям, содержащимся в томе I, глава 2, при этом защита должна монтироваться на высоте 1,25–2 м над короткой стриженной травой или естественной почвой.

Проблемы измерений: датчик и метеорологическая будка не должны монтироваться над бетонными или асфальтовыми поверхностями, которые могут завышать измеряемую температуру. Экран должен устанавливаться таким образом, чтобы закрывать датчик от забрызгивания водой из-под колес проходящих мимо транспортных средств; оно может вызывать существенные ошибки измерений.

10.3.1.2 ***Относительная влажность***

Гигрометрическим датчиком может быть датчик с элементом в виде тонкой электропроводимой пленки или датчик емкостного типа (том I, глава 4). Не рекомендуется психрометр со смоченным термометром из-за постоянного загрязнения увлажнителя углеводородами. Этот датчик может комбинироваться или располагаться вместе с датчиком температуры воздуха в его радиационном экране, поскольку тепловая выходная мощность датчика (самонагрев) является весьма низкой для того, чтобы влиять на измерение температуры.

Проблемы измерений: отметим, что, как и в случае датчика температуры, опасность представляет забрызгивание водой. Эксплуатационные характеристики датчика влажности зависят от последствий загрязнения, вызываемого воздействием атмосферы и транспортных средств. Регулярно должен проводиться функциональный контроль в рамках контроля качества сбора данных, а калибровка должна проверяться по меньшей мере каждые шесть месяцев, особенно перед зимним сезоном. Неправильно реагирующий датчик должен быть немедленно заменен.

10.3.1.3 ***Скорость и направление ветра***

Эти переменные обычно измеряются при помощи пары датчиков чашечного и флюгерного типа, либо посредством лопастного анемометра (том I, глава 5, настоящего Руководства) с импульсным или частотным выходом. Датчики должны монтироваться на стандартной высоте в 10 м над поверхностью земли и на репрезентативной открытой территории, с тем чтобы осуществлять измерения, которым не мешают возмущения потока воздушной массы, вызываемые дорожным движением или местными препятствиями.

Проблемы измерений: потенциальными опасностями являются замерзание движущихся частей, попадание воды и коррозия, а также удар молнии.

10.3.1.4 ***Осадки***

a) *Суммарные осадки*: на автоматических станциях обычно используется прибор-самописец с опрокидывающимся ведром (том I, глава 6), в котором суммируется увеличение осадков, составляющее обычно 0,2 мм. Для измерения осадков в виде снега и других твердых осадков могут применяться обогреваемые осадкомеры. Скорость выпадения осадков может оцениваться посредством регистрации числа отсчетов в установленный интервал времени.

   Проблемы измерений: осадкомер должен сохранять горизонтальное положение, а его воронка и контейнеры должны оставаться чистыми и открытыми. Дождемер с опрокидывающимся ведром не подходит для определения начала очень слабого дождя или во время длительных периодов морозной погоды. Суммарные показания

будут ниже истинных значений из-за воздействия ветра вокруг приемного отверстия, испарения из контейнеров в периоды между ливнями и потерями между краями контейнеров при сильном дожде;

b) *выпадение и тип осадков*: имеются датчики, в которых используются электронные средства (включая подогреваемые решетки, измерения с использованием элемента проводимости и емкости) для оценки характера выпадающих на них осадков (изморозь, дождь или снег). Более четкое различие при гораздо большей стоимости обеспечивается оптическими датчиками, которые определяют характеристику осадков (размер, плотность и движение частиц) посредством рассеяния луча полупроводникового лазера.

Проблемы измерений: эти наблюдения являются весьма желательными на всех станциях, однако существующим типам датчиков не хватает дискриминационной способности и стабильной воспроизводимости результатов. Должны приниматься меры (циклы обогрева) для удаления накопившегося на поверхности снега. Необходима регулярная очистка чувствительных элементов и оптических поверхностей.

Следует устанавливать только датчики, имеющие сертификаты и возможность калибровки по надлежащему эталону. Если в какой-либо системе используется алгоритм для косвенного выведения переменной величины, этот алгоритм следует также задокументировать.

10.3.1.5 ***Метеорологические радиационные параметры***

a) *Суммарная радиация*: солнечная радиация (прямая и рассеянная), попадающая под телесным углом 2 π ср на горизонтальную поверхность, должна измеряться при помощи пиранометра, оборудованного термоэлектрическими или фотоэлектрическими сенсорными элементами (том I, глава 7). Датчик должен быть размещен таким образом, чтобы над плоскостью прибора не было никаких расположенных рядом значительных препятствий и на датчик не падало никаких теней или световых отражений. Несмотря на то, что датчик должен быть размещен таким образом, чтобы предотвратить причинение ему случайного повреждения, он должен быть еще и доступен для проверки и чистки. Особое значение для оператора дорожной сети имеет суммарная радиация, измеряемая «в точке». Она характеризует количество энергии, которую получает данный участок дороги в течение дня. Отношение поступающей радиации к температуре дороги и инерции дороги будет зависеть от составных материалов и размеров дорожной массы.

Проблемы измерений: закрытие горизонта датчика; неровная установка датчика; грязная поверхность; снег или иней, закрывающий стеклянный купол или сенсорную поверхность, и конденсация воды внутри стеклянного купола;

b) *длинноволновая радиация*: может быть использован пиргеометр, который измеряет радиацию в инфракрасном диапазоне при помощи термопреобразователя, фильтрующего видимый спектр. Будучи смонтированным вместе с датчиком, направленным вниз и на достаточно открытый горизонт, он определяет длинноволновую радиацию, поступающую из атмосферы, в частности в темное время суток, и дает сведения об облачности и, соответственно, о радиационном охлаждении на дорогах. Достаточным для целей прогнозирования погодных условий на дорогах является датчик чувствительный к спектру 5–50 мкм, максимальной чувствительностью 15 мкм/Вм$^{-2}$ и временем реакции менее 5 с.

Проблемы измерений: см. проблемы, связанные с суммарной радиацией.

10.3.1.6 ***Видимость***

Могут применяться трансмиссометры и измерители прямого рассеяния (том I, глава 9, настоящего Руководства).

Проблемы измерения: операторы дорожных сетей заинтересованы в данных о видимости менее 200 м (порог опасности). Важное значение имеет чистота окон и линз датчиков. Некоторые системы будут компенсировать в определенной степени загрязнение окон. Во время планового технического обслуживания следует осуществлять соответствующую процедуру калибровки.

10.3.1.7 ***Температура дорожного покрытия***

Имеются активные датчики на основе 100 Ом платинового резистора и обеспечивающие цифровую последовательную передачу данных, которые могут быть установлены в поверхность дороги. Следует выполнять инструкции производителя, касающиеся установки датчика, его кабельного подключения и прикрепления к дорожному покрытию. Датчик должен размещаться за полосой движения автомобильных колес, поскольку в противном случае поверхность датчика будет загрязнена, а данные измерений искажены из-за тепла, образуемого трением. Датчик должен быть вмонтирован в ровной поверхности дороги без каких-либо углублений, в которых вода может собираться и влиять на измерение. Правильность расположения датчика должна проверяться на регулярной основе.

Проблемы измерений: время нагрева (постоянная времени) датчика и того материала, в который он вмонтирован, должны соответствовать составу дорожного покрытия. Датчик должен иметь поверхность с низким показателем поглощения инфракрасного излучения, с тем чтобы минимизировать вызываемую радиацией ошибку. Для длинных соединительных кабелей (более 20 м) рекомендуется компенсация кабельного сопротивления.

10.3.1.8 ***Температура грунта***

Температура грунта на глубине 5, 10 и 20 см ниже поверхности дороги может определяться посредством установки должным образом защищенных электрических датчиков сопротивления на соответствующие глубины и использования подходящего связывающего материала.

Проблемы измерения: см. проблемы, связанные с температурой дорожного покрытия.

10.3.1.9 ***Состояние дорожного покрытия и температура замерзания***

Этот датчик оценивает состояние дорожного покрытия (сухое, влажное, иней, лед) и температуру замерзания оставшейся на поверхности воды. Контрольная цепь датчика нагревает его, не допуская охлаждения, используя для этого эффект Пельтье. Скорость охлаждения является функцией состояния поверхности и температуры замерзания. См. также том I, глава 6, относительно льда на дорожном покрытии. Выходные данные датчика должны обеспечить операторов дорожных сетей сведениями о наличии химического противообледенительного вещества в конкретном месте и дать им возможность оптимизировать действия по разбрызгиванию химического вещества.

Проблемы измерений: датчик не должен быть закрыт чужеродным материалом или при нанесении нового дорожного покрытия. Датчик требует регулярной чистки. Трудно обеспечить реагирование датчика, которое является репрезентативным для подлинного состояния дорожного покрытия из-за малой площади выборочных измерений, места дорожного покрытия и отклонений при практической установке. Измерение зависит от плотности дорожного движения и, в противном случае, со временем не является стабильным. Может возникнуть трудность с применением датчика, у которого мало альтернативных моделей. Дистанционное зондирование температуры дорожной

поверхности при помощи тепловых инфракрасных датчиков обычно является практически невозможным из-за помех, создаваемых забрызгиванием водой, летящей из-под колес автомобилей. Оценка риска гололеда на поверхности дороги может быть улучшена благодаря более точному измерению температуры, влажности и температуры воздуха вблизи дорожного покрытия, а именно благодаря более точной установке датчика и уменьшению систематических и случайных ошибок.

10.3.1.10 *Видеонаблюдение*

Видеонаблюдение — это компонент того, что стало называться умными транспортными системами. Они используются, главным образом, для обнаружения дорожных аварий, а также для предоставления полезных сведений о текущей погоде в целях управления транспортным движением. Алгоритмы обработки изображений будут способствовать распознаванию разных погодных условий.

10.4 ВЫБОР ОБОРУДОВАНИЯ ДЛЯ ДОРОЖНОЙ МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКОЙ СТАНЦИИ

В главе 1 настоящего тома приводится информация, которая может быть использована для применений, связанных с метеорологическими измерениями на дорогах.
В последующих разделах внимание обращается на конкретные вопросы и проблемы, вытекающие из опыта управления дорожными сетями, в частности необходимости высокой эффективности работы в тех случаях, когда безопасность населения является первоочередной задачей.

10.4.1 Экологические условия на дорогах

Дорожная метеорологическая станция подвергается значительному стрессу из-за близости к дороге: вибрация, помехи от систем зажигания автомашин, выброс загрязняющих веществ, коррозия из-за разбрызгивания соляного раствора и негативное влияние населения. В некотором отношении можно считать, что станция действует в условиях промышленной окружающей среды, и все это предполагает прочность конструкции и озабоченность по поводу целостности данных. Часто встречающиеся проблемы включают: отсутствие защиты от перенапряжения в цепях сопряжения датчика; недостаточная электроизоляция между датчиками, кабелями датчиков и блоком сбора данных; переменное сопротивление соединительного контакта, вызывающее дрейф калибровки; сбой измерения и необходимость дополнительного технического обслуживания.

10.4.2 Обрабатывающая способность удаленной станции

Конструкция АМС модифицирована для того, чтобы расширить возможности по обработке и хранению данных в удаленном блоке для сбора данных, с тем чтобы применять алгоритмы обработки, которые действуют для нескольких сигналов датчиков, и получать комплексные выходные данные; гарантировать определенный уровень качества данных; обеспечивать двустороннюю связь между контрольным центром и удаленными блоками для диагностики эффективности работы как датчика, так и блоков; и обеспечивать загрузку новых алгоритмов и обновление программного обеспечения в удаленных блоках. С другой стороны, более надежную и менее дорогостоящую комплексную систему представляет собой сеть удаленных станций, которые являются не более сложными, чем это необходимо, для надежного сбора данных, а также центральный компьютер для контроля и сбора данных, в котором осуществляется обработка более сложных алгоритмов, обеспечение качества и преобразование кода, а также более высокий уровень обработки данных для решений, связанных с управлением дорожной сетью. От лиц, связанных с осуществлением сети метеорологических измерений на

дорогах, требуется рассмотрение вопроса о гибких и более оперативных решениях в отношении оборудования с вариантами мощного программного обеспечения для обработки данных датчиков и контроля системы.

Процесс обработки данных станцией может включать: контроль цикла измерений (начало, частота, сроки и дата); комплексное управление датчиком (включение/выключение энергоснабжения, режим выборочных измерений); обработку сигнала датчика (фильтрация, преобразование в научные единицы, алгоритмы); проверки качества данных; формирование сигнала опасности (переменные величины вне установленных пределах, частичный сбой системы, нарушение пригодности станции к эксплуатации); хранение данных (краткосрочное хранение и архивирование); формирование исходящего сообщения (кодовая форма, протокол связи); управление связью и обслуживание станции (энергоснабжение, проверки датчиков, связь).

10.4.3 Конфигурация сети и варианты оборудования

При выборе оборудования для станции, системы связи и контроля сети (сетевая инфраструктура) необходимо учитывать конкретные запросы дорожной метеорологии и процесс принятия решений лицами, отвечающими за управление дорожной сетью. На этот выбор существенно повлияют отношения между организацией, эксплуатирующей сеть дорог, и местной НМГС. Например, орган, отвечающий за эксплуатацию дорожной сети, может заключить договор с НМГС о предоставлении услуг по прогнозированию метеорологических условий на дорогах и конкретных данных о дорогах, к которым операторы дорожной сети применяют свои физические (метеорологические) условия для принятия оперативных решений. В подобном случае будет логично, если станции дорожной сети будут представлять собой продолжение сети АМС НМГС, используя общее аппаратное обеспечение станций, службу связи и техническое обслуживание с уделением особого внимания при этом надежности данной сети, и располагать специальными датчиками, алгоритмами и программным обеспечением для решения задач, связанных с метеорологическими измерениями на дорогах. В то же время, если подобная тесная интеграция является практически невозможной, орган, отвечающий за эксплуатацию дорог, может, тем не менее, пожелать обеспечить определенную унификацию с системами НМГС, с тем чтобы воспользоваться ее оперативным опытом и возможностью снабжения аппаратным обеспечением и запасными частями.

В том случае, если требуется абсолютно новая или отдельная сеть, рекомендуются следующие руководящие указания в отношении выбора оборудования для сбора данных и обеспечения связи. Вместо того, чтобы разрабатывать новое аппаратное и программное обеспечение для метеорологических измерений на дорогах, разумно использовать существующие и зарекомендовавшие себя системы, изготавливаемые пользующимися хорошей репутацией производителями и источниками, с единственной необходимой адаптацией применительно к дорожной сети, а также воспользоваться опытом и рекомендациями других операторов дорожной сети. Оборудование и его программное обеспечение должны быть модульными для того, чтобы позволить добавление в будущем датчиков и внесение изменений в их спецификации. В целях содействия расширению сети через несколько лет будет весьма полезно, если аппаратное обеспечение будет спроектировано на основе стандартизированных моделей на базе стабильного промышленного производства, когда последующие модели являются технически совместимыми с моделями предыдущих поколений.

10.4.4 Конструирование для обеспечения надежности

Модули для обработки данных должны иметь промышленную стандартную архитектуру с надежными стандартными операционными системами, которые характеризуются хорошо управляемой процедурой обновления. Прикладное программное обеспечение должно быть написано на стандартном языке и хорошо задокументировано. Для достижения желаемой надежности могут быть отобраны специальные промышленные компоненты и модули. Более дешевой альтернативой может быть использование

стандартных коммерческих моделей с дублирующими параллельными или резервными системами для обеспечения надежности системы. Особое внимание необходимо уделять дистанционному устройству для энергоснабжения. Может быть рекомендовано непрерывное энергоснабжение, однако следует признать, что системы связи будут также зависеть от функционирования местного источника энергоснабжения.

Какой бы ни была конструкция системы, ее надежность значительно повысится благодаря размещению электронных компонентов в прочной, коррозионностойкой, защищенной от перепадов температуры оболочке, в которую не проникает пыль и влага. Соединительные элементы, по которым проходят сигналы датчика, должны быть высококачественными в соответствии с классификацией, отвечающей требованиям промышленных или военного назначения стандартов, и хорошо защищенными от деформации кабеля, проникновения воды и коррозии. Кабельные соединения датчика должны иметь заземленный экран и прочную водонепроницаемую изолирующую оболочку и закладываться в кабельный канал.

Особое внимание следует уделять снижению воздействия электрического шума или помех, проникающих в систему сбора данных через кабели датчика, линии электроснабжения или связи. Эти нежелательные электрические сигналы могут явиться причиной ошибок в сигналах датчика и искажения данных, а также вызывать сбой в работе электронного оборудования, особенно в чувствительных цепях сопряжения. Большое внимание необходимо уделять: конструкции датчика и изоляции линии связи, а также защите от перенапряжения, включая надлежащий уровень защиты от атмосферного электричества; должному заземлению датчиков, систем электроснабжения, коммуникационных модемов и электрошкафов; и защите при помощи заземленного экрана всех частей цепи измерений, избегая при этом контурных токов заземления, которые могут вызывать ошибки в измерениях.

Надежности системы будет в значительной мере способствовать оптимальная стандартизированная практика установки и технического обслуживания. Надежность системы также связана со «средним временем ремонта», которое включает время на обработку вызова и поездку работников технического обслуживания для замены оборудования, используя для этого запасные цельные блоки и модули.

10.5 КОДИРОВАНИЕ СООБЩЕНИЙ

10.5.1 Функции кодирования

Сообщение, переданное с удаленной дорожной метеорологической станции, будет содержать идентификатор станции, время и дату сообщения, данные каналов датчика, включая идентификатор каналов, и некоторые данные о «состоянии» станции, которые могут включать информацию о безопасности, энергоснабжении и калибровке станции и о других проверках качества данных. Это сообщение будет содержаться в кодовом пакете, соответствующем каналу связи, с заголовком, содержащим адрес, а также символы, относящиеся к управляющей информации и проверке избыточности для обеспечения выявления ошибки. Часть сообщения с данными о дорожных метеорологических условиях может быть закодирована любым эффективным, недвусмысленным способом, который позволяет центральному компьютеру управления и сбора данных декодировать и обработать сообщение перед тем, как передавать доступную для понимания инструктивную информацию операторам дорожной сети для принятия ими решения.

10.5.2 Руководство ВМО по кодированию

Разработчикам сетей метеорологических измерений на дорогах следует также принимать во внимание руководство по кодированию сообщений ВМО (см. ВМО, 2011), которое дает возможность другим пользователям, таким как НМГС, получать данные в определенной форме и использовать их в других метеорологических применениях. Подобное

кодирование сообщений может осуществляться на удаленной АМС, что предъявляет определенные требования в отношении программного обеспечения станции и обработки данных или, что более вероятно, к центральному компьютеру управления и сбора данных после завершения любых операций по обеспечению качества этих данных.

10.6 ЦЕНТРАЛЬНЫЙ КОМПЬЮТЕР УПРАВЛЕНИЯ И СБОРА ДАННЫХ

О функциях центрального компьютера (или компьютеров) уже упоминалось. К этим функциям относится управление сетью посредством контролирования сообщений (см. ниже), получение сводок (сообщения о метеорологических условиях на дорогах, сообщения о состоянии АМС и информация о качестве) и обработка данных дорожных измерений для предоставления операторам дорожных сетей оперативной информации и тех возможностей для принятия решений, в которых они нуждаются. Архитектура сети может быть разработана таким образом, чтобы центральный компьютер мог действовать в качестве сервера интрасети или веб-сервера для обеспечения простого доступа к этой информации для региональных операторов и других пользователей метеорологических данных.

Отдельный компьютер будет, возможно, выделен для управления базой климатических данных дорожной сети и для подготовки и распространения аналитической информации и статистических резюме. В комплексной сети центральный компьютер будет управлять определенными операциями по техническому обслуживанию и калибровке, менять рабочие режимы АМС и обновлять программное обеспечение АМС.

10.7 К ВОПРОСУ О СВЯЗИ

Исключительно важное значение имеет надежное телекоммуникационное обслуживание, которое обеспечивает эффективное управление сетью станций и своевременное предоставление ею требуемых данных. Поскольку затраты на связь составят большую часть стоимости эксплуатации, важное значение имеет анализ вариантов связи, с тем чтобы можно было оптимизировать издержки в расчете на одно сообщение сообразно уровню требуемого обслуживания. Подробный обзор вариантов телесвязи для сбора данных и управления дорожной АМС выходит за рамки этой главы (см. главу 1 настоящего тома, где речь идет о руководящих указаниях относительно передачи данных). Сделанное в отношении связи решение будет зависеть от управленческих задач сети метеорологических наблюдений на дорогах и от обслуживания, предлагаемого поставщиками телекоммуникационных услуг данной страны и сопутствующих им тарифов.

10.8 ОБРАБОТКА СИГНАЛОВ ДАТЧИКА И ФОРМИРОВАНИЕ СИГНАЛОВ ОПАСНОСТИ

10.8.1 Алгоритмы обработки сигналов

Исходные данные сигналов от датчиков должны быть обработаны или отфильтрованы для получения репрезентативных средних значений. Это делается либо в некоторых активных датчиках, в интерфейсе датчика в блоке сбора данных, либо на более высоком уровне обработки данных – на станции. С техническими требованиями к усреднению выходных данных датчика можно ознакомиться в томе I, глава 1, приложение 1.A, настоящего Руководства.

Алгоритмы, которые применяются к выходным данным датчика (или группам выходных данных) либо на удаленной станции, либо в центральном компьютере, должны быть заданы авторитетными источниками, пройти тщательную проверку и желательно

быть опубликованными в открытой литературе. Любые алгоритмы для внутреннего пользования, принятые руководством дорожной сети, должны быть четко определены и зарегистрированы в метаданных станции или в наставлениях по работе сети.

10.8.2 **Формирование сигналов опасности**

Сигналы опасности могут формироваться на основе выходных данных датчика, когда величины превосходят заранее установленные пределы, в результаты чего АМС направляет сигналы опасности. Выбор сигналов опасности и испытания для определения предела нормы будут зависеть от национальной или региональной практики. Ниже приводятся некоторые примеры сигналов опасности от дорожной АМС. Отметим использование в алгоритмах логических комбинаций «и» и «или».

Примеры сигналов опасности включают:

Сигнал опасности 1: t(воздух) ИЛИ t(дорожное покрытие) 3 °C
И
t(экстраполированное дорожное покрытие)[a] ≤ 1 °C

Сигнал опасности 2: t(воздух) ≤ 0 °C

Сигнал опасности 3: Первое условие
t(дорожное покрытие) ≤ 1 °C
ИЛИ t(экстраполированное дорожное покрытие) ≤ 0 °C
ИЛИ t(покрытие на глубине –5 см) ≤ 0 °C
ИЛИ t(покрытие на глубине –10 см) ≤ –1 °C
ИЛИ t(покрытие на глубине –20 см) ≤ –2 °C
И
Второе условие
Проезжая часть дороги не сухая
ИЛИ по меньшей мере одно выпадение осадков за прошедший час
ИЛИ относительная влажность ≥ 95 %
ИЛИ t(дорожное покрытие) — t(точка росы) ≤ 1 °C

Сигнал опасности 4: t(дорожное покрытие) ≤ 0 °C
И
зарегистрированное состояние: изморозь или «черный лед»

Сигнал опасности 5: Первое условие
Зарегистрированные осадки = снег или град
И
Второе условие
t(воздух) ≤ 2 °C
ИЛИ t(дорожное покрытие) ≤ 0 °C

Сигнал опасности 6: Средняя скорость ветра ≥ 11 м·с$^{-1}$
И
Направление ветра относительно азимута дороги,
45°–135° ИЛИ 225°–315°

Сигнал опасности 7: Видимость ≤ 200 m

a Экстраполированная температура дорожного покрытия рассчитывается при помощи алгоритма, учитывающего последние измерения и формирующего квадратичное уравнение. Это может быть использовано для расчета оценочных значений температуры в последующие 3 ч.

Могут быть определены другие сигналы тревоги, если обнаруживаются дефекты в датчиках, форматах сообщений, электроснабжении или связи.

10.9 **КОНТРОЛЬ КАЧЕСТВА ИЗМЕРЕНИЙ**

Принятие взвешенных решений дорожным управлением зависит от достоверных данных измерений, и поэтому, когда у датчиков, их кабельного соединения или интерфейсов в

АМС появляется дефект, то дефективный блок выявляется и ремонтируется без лишней задержки. Оператору дорожной сетью очень трудно выявлять ошибочные измерения. Следует сделать ссылку на руководство по контролю качества, изложенное в главе 1 настоящего тома, и в томе V, глава 1. Крупные дефекты датчика могут выявляться системным программным обеспечением АМС, которое должно сообщить после этого о появлении тревожной ситуации.

10.9.1 **Проверка сомнительных значений**

Данные измерений, которые выходят за пределы предполагаемого оперативного диапазона датчика, могут не приниматься во внимание благодаря установлению пределов для каждой переменной. Например, значения направления ветра могут быть ограничены диапазоном 0°–359° для ветряного флюгера. Если имели место нулевой сигнал на выходе, быстрый дрейф или скачкообразное изменение в реакции датчика, недействительные данные измерений могут не приниматься программным обеспечением, которое осуществляет статистический анализ данных измерений во времени либо на АМС, если она имеет достаточную мощность для обработки данных, либо в центральном компьютере для сбора данных. В некоторых нижеследующих примерах стандартное отклонение последних величин n сравнивается с параметризованным пороговым значением.

Примеры проверочных алгоритмов (только для метеорологических измерений на дорогах) включают следующее:

a) *тест для всех температур*: данные принимаются только если стандартное отклонение последних 30 значений ≥ 0,2 °C;

b) *тест для скорости ветра*: данные принимаются только если стандартное отклонение последних 20 значений ≥ 1 км·ч$^{-1}$;

c) *тест для направления ветра*: данные принимаются только если стандартное отклонение последних 30 значений ≥ 10°;

d) *тест для жидких осадков*: сверить совместимость количества с отчетом за предыдущий день;

e) *тест для осадков в виде снега*: проверить данные, если t(воздух) > 4 °C;

f) *тест для атмосферной длинноволновой радиации (AR) (относительно облачного покрова)*: данные не принимаются, если AR > 130 Вт·м$^{-2}$, если относительная влажность > 97 % и AR > 10 Вт·м$^{-2}$, и если относительная влажность ≥ 90 % и AR > 10 Вт·м$^{-2}$ в течение четырех последовательных часов.

10.10 ТЕХНИЧЕСКОЕ ОБСЛУЖИВАНИЕ ДОРОЖНОЙ МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКОЙ СТАНЦИИ

10.10.1 **Дорожная окружающая среда**

В отношении разделов, касающихся инспекции, технического обслуживания и калибровки, следует сделать ссылку на том I, глава 1, и главу 1 настоящего тома. Главы тома I содержат рекомендации по техническому обслуживанию и калибровке конкретных датчиков. Отметим, однако, что дорожная АМС существует в окружающей среде с особыми проблемами: уязвимость АМС и ее датчиков для случайного или умышленного вреда; подверженность сильному загрязнению выхлопными газами автомашин; электрические помехи от системы зажигания автомашин и близлежащих линий электропередачи высокого напряжения; коррозия от разбрызгивания соли и вибрация (затрагивающая соединения между датчиками и кабелями).

10.10.2 Планы и документация технического обслуживания

Поскольку оперативные решения, касающиеся безопасности на дорогах, могут в значительной мере зависеть от достоверных данных АМС, существуют строгие требования в отношении технического обслуживания конкретных станций в определенное время года. Эти соображения изложены в плане управления техническим обслуживанием для данной сети, который должен включать регулярное плановое профилактическое и техническое обслуживание, а также эффективное реагирование на сообщение о неисправном состоянии.

Администрация дорожной сети должна иметь свое собственное наставление по техническому обслуживанию ее дорожных метеорологических станций, основу которого составляют рекомендации производителя оборудования; информация, почерпнутая из настоящего Руководства и своего собственного опыта. Хорошее наставление содержит контрольные списки в целях оказания содействия проведению инспекции и выполнению задач, связанных с техническим обслуживанием. Администрация может решить заключить договор об инспекции и техническом обслуживании с местной НМГС, которая должна обладать опытом работы с этим видом приборного обеспечения.

10.10.3 Инспекции и программы работы

На каждой станции два раза в год должна осуществляться программа полного технического обслуживания, в которую входят техническое обслуживание места размещения станции (стрижка травы и растительности, которые могут повлиять на установку датчика); проверка ограждений на предмет проникания воды и замена поглотителей влаги; ремонт и покраска ограждений, которые подверглись воздействию атмосферы и коррозии, а также экранов и опор; проверка целостности кабелей и соединений; чистка и выравнивание датчиков (отметим проблемы измерения, упомянутые ранее); и калибровка или замена датчиков и сети измерений АМС.

Операторы дорожной сети должны осуществлять программу инспекции для проверки целостности и надлежащего функционирования своих станций один раз в месяц зимой и раз в два месяца летом. При проведении любых работ на дорожном покрытии должны выставляться регулирующие предупредительные знаки, а работники должны носить одежду, предусмотренную техникой безопасности.

10.11 ПОДГОТОВКА КАДРОВ

Управление сетью дорожных метеорологических станций, ее эксплуатация и техническое обслуживание в целях получения непрерывного потока достоверных данных, а также интерпретация этих данных для предоставления значимой информации — все это требует наличия персонала со специальной профессиональной подготовкой по необходимым дисциплинам. К числу некоторых из этих областей профессиональной компетенции относятся экологические условия на дорогах и оперативное принятие решений для обеспечения безопасного и эффективного движения транспорта; дистанционный сбор данных, телекоммуникации и компьютерные расчеты; выбор, применение и техническое обслуживание метеорологических датчиков и обработка их сигналов; и интерпретация метеорологических и других данных в оперативном контексте. Администрации, отвечающей за дорожную сеть, следует сотрудничать, по мере необходимости, с другими учреждениями для поддержания требуемого уровня знаний и профессиональной подготовки в целях успешного функционирования сети метеорологических измерений на дорогах.

СПРАВОЧНАЯ И ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ЛИТЕРАТУРА

Всемирная метеорологическая организация, 2011: *Наставление по кодам* (ВМО-№ 306), том I.1 и I.2. Женева.

———, 2015*a* (обновлено в 2018 г.): *Технический регламент* (ВМО-№ 49), том I. Женева.

———, 2015*b* (обновлено в 2017 г.): *Наставление по Глобальной системе наблюдений* (ВМО-№ 544), том I. Женева.

World Road Association (PIARC), 2002: *Proceedings of the Eleventh PIARC International Winter Road Congress* (Sapporo, Japan).

World Meteorological Organization, 1997: *Road Meteorological Observations* (R.E.W. Pettifer and J. Terpstra). Instruments and Observing Methods Report No. 61 (WMO/TD-No. 842). Geneva.

———, 2003: *Road Managers and Meteorologists over Road Meteorological Observations: The Result of Questionnaires* (J.M. Terpstra and T. Ledent). Instruments and Observing Methods Report No. 77 (WMO/TD-No. 1159). Geneva.

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 211523