

Руководство по приборам и методам наблюдений

Том I — Измерения метеорологических переменных

Издание 2023 г.

ПОГОДА КЛИМАТ ВОДА



ВСЕМИРНАЯ
МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКАЯ
ОРГАНИЗАЦИЯ

ВМО-№ 8

Руководство по приборам и методам наблюдений

Том I — Измерения метеорологических переменных

Издание 2023 г.



ВСЕМИРНАЯ
МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКАЯ
ОРГАНИЗАЦИЯ

ВМО-№ 8

РЕДАКТОРСКОЕ ПРИМЕЧАНИЕ

Терминологическая база данных ВМО «МЕТЕОТЕРМ» доступна по адресу: <https://wmo.int/ru/wmo-community/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, 2023

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
Электронная 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.

СОДЕРЖАНИЕ

Стр.

ПРЕДИСЛОВИЕ.....	xix
------------------	-----

ГЛАВА 1. ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ	1
1.1 Метеорологические наблюдения	1
1.1.1 Общие сведения	1
1.1.2 Репрезентативность	2
1.1.3 Метаданные	3
1.2 Системы метеорологических наблюдений	4
1.3 Общие требования к метеорологической станции	4
1.3.1 Автоматические метеорологические станции	5
1.3.2 Наблюдатели	5
1.3.3 Размещение и установка приборов	6
1.3.3.1 Выбор места размещения	6
1.3.3.2 Координаты станции	8
1.3.3.3 Эксплуатация оборудования в экстремальных условиях окружающей среды	9
1.3.4 Замены приборного обеспечения и однородность показаний приборов ..	9
1.3.5 Инспекция и обслуживание	10
1.3.5.1 Инспекция станций	10
1.3.5.2 Обслуживание	10
1.4 Общие требования к приборам	11
1.4.1 Желательные характеристики	11
1.4.2 Воздействие Минаматской конвенции	12
1.4.3 Механические самописцы	12
1.5 Эталоны измерений, прослеживаемость и единицы измерения	13
1.5.1 Определения эталонов измерений	13
1.5.2 Обеспечение прослеживаемости	15
1.5.3 Условные обозначения, единицы измерения и константы	16
1.5.3.1 Условные обозначения и единицы измерения	16
1.5.3.2 Константы	17
1.6 Погрешность измерений	18
1.6.1 Метеорологические измерения	18
1.6.1.1 Общие сведения	18
1.6.1.2 Определения измерений и погрешностей измерений	18
1.6.1.3 Характеристики приборов	20
1.6.2 Источники и оценки погрешности	21
1.6.3 Погрешности измерения одного прибора	22
1.6.3.1 Статистические распределения данных наблюдений	23
1.6.3.2 Оценка действительного значения	24
1.6.3.3 Выражение погрешности	26
1.6.3.4 Измерения дискретных значений	26
1.6.4 Требования к точности	27
1.6.4.1 Общие сведения	27
1.6.4.2 Требуемая и достижимая эффективность	27
Приложение 1.A. Требования к оперативной погрешности измерений и рабочим характеристикам приборов	29
Приложение 1.B. Стратегия обеспечения прослеживаемости	41
Приложение 1.C. Региональные центры по приборам	49
Приложение 1.D. Классификации размещения площадок для станций приземных наблюдений на суше	51
Приложение 1.E. Эксплуатация оборудования в экстремальных условиях	65
Приложение 1.F. Описание установки станции	89

Приложение 1.С. Классификации качества измерений для наземных станций приземных наблюдений	91
Справочная и дополнительная литература	100

ГЛАВА 2. ИЗМЕРЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ	102
2.1 Общие сведения	102
2.1.1 Определение	102
2.1.2 Единицы измерения и шкалы	102
2.1.3 Метеорологические требования	103
2.1.3.1 Общие сведения	103
2.1.3.2 Погрешность измерений	103
2.1.3.3 Инерционность	104
2.1.3.4 Регистрация условий, в которых производятся измерения	104
2.1.4 Методы измерений и наблюдений	104
2.1.4.1 Общие принципы измерений	105
2.1.4.2 Общие требования к размещению	106
2.1.4.3 Источники погрешностей — общие замечания	107
2.1.4.4 Уход за приборами — общие положения	108
2.1.4.5 Последствия Минаматской конвенции с точки зрения измерения температуры	109
2.2 Электрические термометры	109
2.2.1 Общее описание	109
2.2.1.1 Металлические термометры сопротивления	109
2.2.1.2 Термисторы	111
2.2.1.3 Термопары	113
2.2.2 Порядок проведения измерений	115
2.2.2.1 Электрические термометры сопротивления	115
2.2.2.2 Термопары	116
2.2.3 Размещение и установка	117
2.2.4 Источники ошибки	117
2.2.4.1 Электрические термометры сопротивления	117
2.2.4.2 Термопары	118
2.2.5 Сравнение и калибровка	118
2.2.5.1 Электрические термометры сопротивления	118
2.2.5.2 Термопары	119
2.2.6 Поправки	119
2.2.7 Обслуживание	120
2.3 Жидкостные стеклянные термометры	121
2.3.1 Общие положения	121
2.3.1.1 Обычные (станционные) термометры	122
2.3.1.2 Максимальные термометры	122
2.3.1.3 Минимальные термометры	122
2.3.1.4 Почвенные термометры	123
2.3.2 Порядок проведения измерений	123
2.3.2.1 Снятие показаний обычных термометров	123
2.3.2.2 Измерение минимальной температуры воздуха в травостое	124
2.3.3 Размещение и установка термометров	124
2.3.4 Источники погрешностей жидкостных стеклянных термометров	124
2.3.4.1 Погрешности упругости	125
2.3.4.2 Погрешности, вызываемые капиллярной трубкой термометра	125
2.3.4.3 Ошибки параллакса и грубые ошибки при снятии показаний	125
2.3.4.4 Погрешности, обусловленные различным расширением	126
2.3.4.5 Погрешности спиртовых термометров	126
2.3.5 Сравнение и калибровка в лабораторных условиях и в условиях эксплуатации	126
2.3.5.1 Калибровка в лабораторных условиях	126
2.3.5.2 Проверка в полевых условиях	127

	<i>Стр.</i>
2.3.6 Поправки	128
2.3.7 Обслуживание	128
2.3.7.1 Разрыв столбика жидкости	128
2.3.7.2 Нечеткость шкалы	129
2.3.8 Безопасность	129
2.4 Механические термографы	129
2.4.1 Общие положения	129
2.4.1.1 Биметаллический термограф	129
2.4.1.2 Термограф с трубкой Бурдона	130
2.4.2 Порядок проведения измерений	130
2.4.3 Размещение и установка	130
2.4.4 Источники погрешностей	130
2.4.5 Сравнение и калибровка	130
2.4.5.1 Калибровка в лабораторных условиях	130
2.4.5.2 Сравнение в условиях эксплуатации	131
2.4.6 Поправки	131
2.4.7 Обслуживание	131
2.5 Радиационные защиты	131
2.5.1 Жалюзийные будки	132
2.5.2 Другие искусственно вентилируемые средства защиты	133
2.6 Обеспечение прослеживаемости и калибровка	134
Приложение. Определение реперных точек международной температурной шкалы, принятой в 1990 году	136
Справочная и дополнительная литература	137
 ГЛАВА 3. ИЗМЕРЕНИЕ АТМОСФЕРНОГО ДАВЛЕНИЯ	140
3.1 Общие сведения	140
3.1.1 Определение	140
3.1.2 Единицы измерения и шкалы	140
3.1.3 Метеорологические требования	140
3.1.4 Методы измерений и наблюдений	141
3.1.4.1 Общие принципы измерений	141
3.1.4.2 Общие требования к размещению	142
3.1.4.3 Источники погрешностей: общие замечания	142
3.1.4.4 Уход за приборами: общие положения	144
3.1.4.5 Последствия Минаматской конвенции с точки зрения измерения давления	144
3.2 Электронные барометры	144
3.2.1 Емкостные датчики с переменной емкостью на основе интегральных схем	145
3.2.2 Цифровые пьезорезистивные барометры	145
3.2.3 Вибрационно-частотные барометры	146
3.2.4 Деформационные датчики с детекторами смещения	146
3.2.5 Размещение электронных барометров	147
3.2.6 Снятие показаний электронных барометров	147
3.2.7 Источники ошибки	147
3.2.7.1 Смещение в период между калибровками	147
3.2.7.2 Температура	148
3.2.7.3 Электрические помехи	148
3.2.7.4 Характер работы	148
3.3 Барометры-анероиды	148
3.3.1 Требования к конструкции	148
3.3.2 Достижимая погрешность измерения	149
3.3.3 Размещение барометров-анероидов	149
3.3.4 Снятие показаний барометров-анероидов	149
3.3.4.1 Точность снятия показаний	149
3.3.4.2 Приведения, применяемые к барометрам	149

3.3.5	Источники ошибки.	150
3.3.5.1	Неполная компенсация на температуру.	150
3.3.5.2	Погрешности упругости.	150
3.4	Барографы.	150
3.4.1	Общие требования.	150
3.4.2	Устройство барографов.	151
3.4.3	Размещение барографов.	151
3.4.4	Источники ошибки.	152
3.4.5	Снятие показаний барографа.	152
3.4.5.1	Точность снятия показаний.	152
3.4.5.2	Поправки, вводимые в показания барографа.	152
3.4.5	Транспортировка.	152
3.5	Изменение давления и барическая тенденция.	152
3.5.1	Барическая тенденция и характеристика барической тенденции.	152
3.5.2	Измерение барической тенденции.	153
3.6	Обеспечение прослеживаемости и калибровка.	153
3.6.1	Замечания общего характера.	153
3.6.2	Лабораторная калибровка.	153
3.6.2.1	Общепринятая установка оборудования.	154
3.6.2.2	Лабораторные эталонные приборы.	155
3.6.2.3	Метод калибровки.	158
3.6.3	Инспекции в полевых условиях.	160
3.7	Приведение показаний барометра к эталонному и другим уровням.	160
3.7.1	Стандартные уровни.	160
3.7.2	Общая формула приведения.	161
3.7.3	Формула приведения для станций, расположенных на небольшой высоте.	161
	Приложение 3.А. Методы измерения с помощью ртутных барометров.	162
	Приложение 3.В. Приведение показаний ртутного барометра к стандартным условиям.	172
	Справочная и дополнительная литература.	176
	ГЛАВА 4. ИЗМЕРЕНИЕ ВЛАЖНОСТИ.	177
4.1	Общие сведения.	177
4.1.1	Определения.	177
4.1.2	Единицы измерения.	178
4.1.3	Метеорологические потребности.	178
4.1.4	Методы измерений и наблюдений.	178
4.1.4.1	Обзор общих принципов измерений.	179
4.1.4.4	Уход за приборами: общие положения.	182
4.1.5	Последствия Минаматской конвенции с точки зрения измерения влажности.	183
4.2	Электрические емкостные гигрометры.	184
4.2.1	Соображения общего характера.	184
4.2.2	Электрический емкостный гигрометр.	184
4.2.3	Процедура наблюдений.	185
4.2.4	Размещение и установка.	185
4.2.5	Источники ошибки.	185
4.2.6	Калибровка и инспекция в полевых условиях.	186
4.2.7	Обслуживание.	187
4.3	Психрометр.	188
4.3.1	Соображения общего характера.	188
4.3.1.1	Психрометрические формулы.	188
4.3.1.2	Спецификация психрометра.	188
4.3.1.3	Обвязка из ткани для смоченного термометра.	189

4.3.1.4	Работа со смоченным термометром при температуре ниже точки инея	190
4.3.1.5	Общая процедура проведения наблюдений	191
4.3.1.6	Использование электрических термометров сопротивления ...	191
4.3.1.7	Психрометрические формулы и таблицы	191
4.3.1.8	Источники погрешностей в психрометрии	192
4.3.2	Психрометр Ассмана и другие аспирационные психрометры	193
4.3.2.1	Описание	194
4.3.2.2	Процедура наблюдения	194
4.3.2.3	Размещение и установка прибора	195
4.3.2.4	Калибровка	195
4.3.2.5	Обслуживание	196
4.3.3	Психрометр в жалюзийном метеорологическом экране (будке)	197
4.3.3.1	Описание	197
4.3.3.2	Процедура наблюдений	198
4.3.3.3	Размещение и установка прибора	198
4.3.3.4	Калибровка	198
4.3.3.5	Обслуживание	198
4.3.4	Працевые психрометры	198
4.3.4.1	Описание	199
4.3.4.2	Процедура наблюдений	199
4.4	Гигрометр точки росы с охлаждаемым зеркалом	199
4.4.1	Общие сведения	199
4.4.1.1	Теория	199
4.4.1.2	Принципы	200
4.4.2	Описание	200
4.4.2.1	Устройство датчика	200
4.4.2.2	Устройство оптического обнаружения	201
4.4.2.3	Устройство регулирования температуры	201
4.4.2.4	Система визуального отображения температуры	202
4.4.2.5	Формат прибора	202
4.4.2.6	Вспомогательные системы	202
4.4.3	Процедура наблюдения	203
4.4.4	Размещение и установка прибора	203
4.4.5	Калибровка и инспекция в полевых условиях	204
4.4.5.1	Калибровка	204
4.4.5.2	Инспекция в полевых условиях	205
4.5	Гигрометры, основанные на поглощении электромагнитного излучения	206
4.6	Волосной гигрограф	206
4.6.1	Общие соображения	206
4.6.2	Описание	207
4.6.3	Процедура наблюдений	208
4.6.4	Размещение и установка	208
4.6.5	Источники ошибки	208
4.6.5.1	Смещение нуля	208
4.6.5.2	Погрешности, обусловленные загрязнением волоса	208
4.6.5.3	Гистерезис	209
4.6.6	Калибровка и инспекция в полевых условиях	209
4.6.7	Обслуживание	209
4.7	Обеспечение прослеживаемости и калибровка	210
4.7.1	Принципы калибровки гигрометров	210
4.7.2	Первичные эталоны	210
4.7.2.1	Гравиметрическая гигрометрия	210
4.7.2.2	Динамический эталонный генератор влажности с использованием двух давлений	210
4.7.2.3	Динамический эталонный генератор влажности с использованием двух температур	212
4.7.3	Вторичные эталоны	212
4.7.4	Рабочие эталоны (и образцовые приборы для полевых условий)	212

4.7.5	Растворы солей	213
4.7.6	Методы калибровки	214
4.7.6.1	Замечания общего характера	214
4.7.6.2	Лабораторная калибровка	214
4.7.6.3	Полевая калибровка	215
4.8	Постоянные времени, защитные фильтры и безопасность	216
4.8.1	Постоянные времени датчиков влажности	216
4.8.2	Защитные фильтры	216
4.8.3	Безопасность	217
	Приложение 4.А. Водяной пар в атмосфере — термины и определения	220
	Приложение 4.В. Формулы для расчета характеристик влажности	224
	Приложение 4.С. Инструменты и методы, которые имеют ограниченное применение или более не применяются	226
	Справочная и дополнительная литература	232
	ГЛАВА 5. ИЗМЕРЕНИЕ ПРИЗЕМНОГО ВЕТРА	233
5.1	Общие сведения	233
5.1.1	Определения	233
5.1.2	Единицы и шкалы измерения	234
5.1.3	Метеорологические требования	235
5.1.4	Методы измерения и наблюдения	235
5.2	Визуальная оценка ветра	237
5.2.1	Скорость ветра	237
5.2.2	Направление ветра	238
5.2.3	Пульсации ветра	238
5.3	Простые методы инструментальных наблюдений	238
5.3.1	Скорость ветра	238
5.3.2	Направление ветра	238
5.4	Чашечные и крыльчатые анемометры	239
5.5	Флюгеры для измерения направления ветра	239
5.6	Другие приборы для измерения ветра	240
5.7	Датчики и их комбинации для измерения составляющих ветра	241
5.8	Методы обработки данных	241
5.8.1	Осреднение	241
5.8.2	Максимальные порывы и средние квадратические отклонения	242
5.8.3	Рекомендации по конструированию систем для измерения ветра	244
5.9	Размещение приборов для наблюдения за ветром	245
5.9.1	Общее описание проблем	245
5.9.2	Размещение анемометров над сушей	245
5.9.3	Размещение анемометров на море	247
5.9.4	Корректировка данных с учетом размещения датчиков	248
5.10	Калибровка и обслуживание	249
	Приложение. Интегральный параметр шероховатости	251
	Справочная и дополнительная литература	253
	ГЛАВА 6. ИЗМЕРЕНИЕ КОЛИЧЕСТВА ОСАДКОВ	255
6.1	Общие сведения	255
6.1.1	Определения	255
6.1.2	Единицы измерения	256
6.1.3	Метеорологические и гидрологические требования	256
6.1.4	Методы измерений	256
6.1.4.1	Приборы	256
6.1.4.2	Эталонные осадкомеры и взаимные сравнения	257
6.1.4.3	Документация	258

	<i>Стр.</i>
6.2 Размещение и установка	259
6.3 Нерегистрирующие осадкомеры	260
6.3.1 Обычные осадкомеры	260
6.3.1.1 Приборы	260
6.3.1.2 Эксплуатация	262
6.3.1.3 Калибровка и техническое обслуживание	262
6.3.2 Суммарные осадкомеры	262
6.4 Погрешности и поправки при измерении количества осадков	263
6.5 Плювиографы	267
6.5.1 Весовой плювиограф	268
6.5.1.1 Приборы	268
6.5.1.2 Погрешности и поправки	268
6.5.1.3 Калибровка и техническое обслуживание	269
6.5.2 Плювиограф с самоопорожняющимся контейнером	270
6.5.2.1 Приборы	270
6.5.2.2 Погрешности и поправки	271
6.5.2.3 Калибровка и техническое обслуживание	273
6.5.3 Поплавковый плювиограф	273
6.5.4 Другие приборы для измерения осадков	274
6.6 Измерение росы, отложения льда и осадков в виде тумана	274
6.6.1 Измерение росы и увлажненности листа	274
6.6.2 Измерение отложения льда	276
6.6.2.1 Методы измерений	276
6.6.2.2 Лед на дорожном покрытии	277
6.6.3 Измерение осадков в виде тумана	278
Приложение 6.A. Стандартный эталонный осадкомер ямочного типа	280
Приложение 6.B. Станции проведения взаимных сравнений измерений осадков	282
Приложение 6.C. Стандартизированная процедура для лабораторной калибровки приборов накопительного типа, измеряющих интенсивность дождя	283
Приложение 6.D. Предложенные процедуры коррекции для измерений осадков	287
Приложение 6.E. Процедура для калибровки в полевых условиях приборов накопительного типа, измеряющих интенсивность дождя	288
Справочная и дополнительная литература	290
ГЛАВА 7. ИЗМЕРЕНИЕ РАДИАЦИИ	293
7.1 Общие сведения	293
7.1.1 Определения	293
7.1.2 Единицы и шкалы	294
7.1.2.1 Единицы	294
7.1.2.2 Стандартизация	294
7.1.3 Метеорологические требования	296
7.1.3.1 Данные для составления отчетности	296
7.1.3.2 Погрешность	296
7.1.3.3 Частота проведения наблюдений и регистрация данных	296
7.1.3.4 Время наблюдений	297
7.1.4 Методы измерений	297
7.2 Измерения прямой солнечной радиации	299
7.2.1 Прямая солнечная радиация	300
7.2.1.1 Основные эталонные пиргелиометры	301
7.2.1.2 Вторичные эталонные пиргелиометры	302
7.2.1.3 Полевые и сетевые пиргелиометры	303
7.2.1.4 Калибровка пиргелиометров	304
7.2.2 Экспонирование	304

7.3	Измерение суммарной и рассеянной радиации	305
7.3.1	Калибровка пиранометров	305
7.3.1.1	Поверка по эталонному пиргелиометру и затеняемому эталонному пиранометру	308
7.3.1.2	Поверка по эталонному пиргелиометру	308
7.3.1.3	Поочередная калибровка двух пиранометров с использованием пиргелиометра	309
7.3.1.4	Сравнения с эталонным пиранометром	310
7.3.1.5	Сравнения в лабораторных условиях	310
7.3.1.6	Регулярный контроль калибровочных коэффициентов	311
7.3.2	Характеристики пиранометров	311
7.3.2.1	Установка датчика в горизонтальном положении	312
7.3.2.2	Изменение чувствительности, обусловленное колебаниями температуры окружающей среды	312
7.3.2.3	Изменение чувствительности в зависимости от ориентации	312
7.3.2.4	Изменение чувствительности в зависимости от угла падения солнечных лучей	312
7.3.2.5	Погрешности определения часовых и суточных сумм	313
7.3.3	Установка и техническое обслуживание пиранометров	313
7.3.3.1	Поправки на закрытость горизонта	314
7.3.3.2	Установка пиранометров для измерения суммарной радиации .	314
7.3.3.3	Установка пиранометров для измерения рассеянной радиации	315
7.3.3.4	Установка пиранометров для измерения отраженной радиации	316
7.3.3.5	Техническое обслуживание пиранометров	316
7.3.3.6	Установка и техническое обслуживание пиранометров на специальных платформах	316
7.4	Измерение интегральной и длинноволновой радиации	317
7.4.1	Приборы для измерения длинноволновой радиации	317
7.4.2	Приборы для измерения суммарной радиации	321
7.4.3	Калибровка пиргеометров	322
7.4.4	Установка пиррадиометров и пиргеометров	323
7.4.5	Регистрация и преобразование данных	324
7.5	Измерение специальных радиационных параметров	324
7.5.1	Измерение дневной освещенности	324
7.5.1.1	Приборы	326
7.5.1.2	Поверка	326
7.5.1.3	Регистрация и преобразование данных	327
7.6	Измерение ультрафиолетового излучения	327
7.6.1	Приборы	330
7.6.1.1	Широкополосные датчики	330
7.6.1.2	Узкополосные датчики	331
7.6.1.3	Спектрорадиометры	333
7.6.2	Калибровка	334
	Приложение 7.A. Номенклатура актинометрических и фотометрических величин	336
	Приложение 7.B. Метеорологические радиационные величины, символы и определения	338
	Приложение 7.C. Установленные требования для мировых, региональных и национальных радиационных центров	340
	Приложение 7.D. Используемые формулы	344
	Приложение 7.E. Рассеянная радиация — поправка на затеняющее кольцо	347
	Приложение 7.F. Управление и прослеживаемость атмосферного длинноволнового излучения	349
	Справочная и дополнительная литература	350

Стр.

ГЛАВА 8. ИЗМЕРЕНИЕ ПРОДОЛЖИТЕЛЬНОСТИ СОЛНЕЧНОГО СИЯНИЯ	352
8.1 Общие сведения	352
8.1.1 Определение	352
8.1.2 Единицы и шкалы	353
8.1.3 Метеорологические требования	353
8.1.3.1 Использование данных о продолжительности солнечного сияния	353
8.1.3.2 Корреляция с другими метеорологическими параметрами	354
8.1.3.3 Требования к автоматической регистрации	354
8.1.4 Методы измерения	354
8.2 Приборы и датчики	356
8.2.1 Пиргелиометрический метод	356
8.2.1.1 Общие сведения	356
8.2.1.2 Источники погрешностей	356
8.2.2 Пиранометрический метод	356
8.2.2.1 Общие сведения	356
8.2.2.2 Источники погрешностей	358
8.2.3 Регистратор солнечного сияния Кэмпбелла-Стокса (метод прожигания)	358
8.2.3.1 Настройка	358
8.2.3.2 Оценка данных	359
8.2.3.3 Специальные модификации прибора	360
8.2.3.4 Источники погрешностей	360
8.2.4 Приборы для оценки контраста	360
8.2.5 Приборы для оценки контраста и сканирующие приборы	360
8.2.5.1 Общие сведения	360
8.2.5.2 Источники погрешностей	361
8.3 Установка приемников солнечного сияния	361
8.4 Общие источники погрешностей	362
8.5 Калибровка	362
8.5.1 Методы калибровки	363
8.5.1.1 Сравнение данных о продолжительности солнечного сияния	363
8.5.1.2 Сравнение аналоговых сигналов	363
8.5.1.3 Метод определения среднего эффективного порога солнечной радиации (MEIT)	364
8.5.2 Метод калибровки в лаборатории	364
8.6 Техническое обслуживание	365
Приложение 8.А. Алгоритм вычисления продолжительности солнечного сияния на основе измерений прямой суммарной солнечной радиации	366
Приложение 8.В. Алгоритм вычисления продолжительности солнечного сияния на основе 1-минутных измерений суммарной солнечной радиации	367
Справочная и дополнительная литература	369
ГЛАВА 9. ИЗМЕРЕНИЕ ВИДИМОСТИ	371
9.1 Общие сведения	371
9.1.1 Определения	371
9.1.2 Единицы измерения и шкалы	372
9.1.3 Метеорологические требования	373
9.1.4 Методы измерения	374
9.2 Визуальная оценка метеорологической оптической дальности	377
9.2.1 Общие сведения	377
9.2.2 Оценка метеорологической оптической дальности в дневное время	378
9.2.3 Оценка метеорологической оптической дальности в ночное время	378
9.2.4 Оценка метеорологической оптической дальности при отсутствии удаленных объектов	380
9.2.5 Точность визуальных наблюдений	381
9.2.6 Использование передающих камер	382

9.3	Инструментальные измерения метеорологической оптической дальности	382
9.3.1	Общие сведения	382
9.3.2	Приборы для измерения коэффициента ослабления	383
9.3.3	Инструменты для оценки коэффициента рассеяния	385
9.3.4	Выбор места и установка приборов	388
9.3.5	Калибровка и техническое обслуживание приборов	388
9.3.5.1	Техническое обслуживание	389
9.3.5.2	Калибровка	389
9.3.6	Оценки точности измерения метеорологического оптического диапазона	393
9.3.6.1	Общие сведения	393
9.3.6.2	Точность трансмиссометров	394
9.3.6.3	Точность измерителей рассеяния	395
9.3.6.4	Точность телефотометров и визуальных фотометров	395
	Справочная и дополнительная литература	396
ГЛАВА 10. ИЗМЕРЕНИЕ ИСПАРЕНИЯ		397
10.1	Общие сведения	397
10.1.1	Определения	397
10.1.2	Единицы измерения	397
10.1.3	Метеорологические требования	397
10.1.4	Методы измерения	398
10.2	Атмометры	399
10.2.1	Виды приборов	399
10.2.2	Измерение с помощью атмометров	399
10.2.3	Источники ошибки в атмометрах	400
10.3	Испарители и испарительные бассейны	400
10.3.1	Испаритель класса А (США)	400
10.3.2	Испаритель ГГИ-3000 (Россия)	401
10.3.3	Испарительный бассейн площадью 20 м ² (Россия)	401
10.3.4	Измерения с помощью испарителей и испарительных бассейнов	401
10.3.5	Размещение испарителей и испарительных бассейнов	402
10.3.6	Источники ошибки в испарителях и испарительных бассейнах	402
10.3.7	Обслуживание испарителей и испарительных бассейнов	403
10.4	Измерители суммарного испарения (лизиметры)	404
10.4.1	Измерение с помощью лизиметра	405
10.4.2	Размещение измерителей суммарного испарения	405
10.4.3	Источники ошибки в измерениях с помощью лизиметров	406
10.4.4	Обслуживание лизиметров	407
10.5	Оценка испарения с естественных поверхностей	407
	Справочная и дополнительная литература	410
ГЛАВА 11. ИЗМЕРЕНИЕ ВЛАЖНОСТИ ПОЧВЫ		411
11.1	Общие сведения	411
11.1.1	Определения	411
11.1.2	Единицы измерения	413
11.1.3	Метеорологические требования	413
11.1.4	Методы измерения	414
11.2	Прямое гравиметрическое измерение содержания влаги в почве	415
11.3	Содержание влаги в почве: косвенные методы	416
11.3.1	Радиологические методы	416
11.3.1.1	Метод рассеяния нейтронов	417
11.3.1.2	Ослабление гамма-излучения	418
11.3.2	Диэлектрические постоянные системы почва–вода	418
11.3.2.1	Динамическая рефлектометрия	419
11.3.2.2	Измерение частотного диапазона	419

Стр.

11.4	Приборы для измерения потенциала влажности почвы	420
11.4.1	Тензиометры	420
11.4.2	Блоки электрического сопротивления	421
11.4.3	Психрометры.	422
11.5	Выбор места и размер пробы	422
11.6	Дистанционное зондирование влажности почвы.	423
11.6.1	Микроволновое дистанционное зондирование	424
11.6.1.1	Введение	424
11.6.1.2	Многочастотные радиометры	425
11.6.1.3	Скаттерометры	426
11.6.1.4	Радиолокаторы с синтезированной апертурой	427
11.6.1.5	Специализированные спутники с использованием L-полосы частот	428
11.6.1.6	Получение данных о влажности почвы	428
11.6.2	Дистанционное зондирование в тепловом инфракрасном диапазоне. . . .	431
	Справочная и дополнительная литература	433

ГЛАВА 12. АЭРОЛОГИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ ДАВЛЕНИЯ, ТЕМПЕРАТУРЫ И ВЛАЖНОСТИ.

437

12.1	Общие сведения	437
12.1.1	Определения.	437
12.1.2	Единицы, используемые при аэрологических измерениях	438
12.1.3	Метеорологические требования	438
12.1.3.1	Радиозондовые данные для метеорологического обеспечения.	438
12.1.3.2	Взаимосвязь между спутниковыми и радиозондовыми аэрологическими измерениями	442
12.1.3.3	Максимальная высота радиозондовых наблюдений	443
12.1.4	Требования к неопределенности измерений	444
12.1.4.1	Геопотенциальная высота: требования и точность измерения	445
12.1.4.2	Температура: требования и точность измерений	445
12.1.4.3	Относительная влажность: требования и точность измерений	446
12.1.5	Методы измерения	446
12.1.5.1	Ограничивающие факторы при проектировании радиозондов.	446
12.1.5.2	Радиочастоты, используемые для передач с радиозондов	447
12.1.6	Погрешности радиозондовых измерений: общие сведения	449
12.1.6.1	Типы погрешностей	449
12.1.6.2	Потенциальные стандартные значения.	449
12.1.6.3	Источники дополнительных ошибок во время функционирования радиозондов	450
12.2	Радиозондовые электронные средства	451
12.2.1	Общие характеристики	451
12.2.2	Источники питания для радиозондов.	451
12.2.3	Методы передачи данных	452
12.2.3.1	Радиопередатчик	452
12.3	Датчики температуры	452
12.3.1	Основные требования	452
12.3.2	Термисторы	453
12.3.3	Термоконденсаторы.	454
12.3.4	Термопары	455
12.3.5	Научные приборы зондирования.	455
12.3.6	Размещение датчиков	455
12.3.7	Погрешности измерения температуры.	456
12.3.7.1	Калибровка	456
12.3.7.2	Тепловая инерция	458
12.3.7.3	Теплообмен в инфракрасной области спектра	458

12.3.7.4	Разогрев солнечной радиацией	458
12.3.7.5	Осаждение льда или воды на датчике	462
12.3.7.6	Вопросы репрезентативности	462
12.4	Датчики относительной влажности	462
12.4.1	Общие аспекты	462
12.4.2	Емкостные тонкопленочные датчики	467
12.4.3	Угольные гигристоры и животная пленка	468
12.4.4	Научные приборы зондирования	468
12.4.5	Размещение датчиков	470
12.4.6	Погрешности измерений относительной влажности	470
12.4.6.1	Общие аспекты	470
12.4.6.2	Увлажнение или обледенение в облаке	472
12.4.6.3	Вопросы репрезентативности	472
12.5	Датчики давления (включая измерения высоты)	472
12.5.1	Общие аспекты	472
12.5.2	Кремниевые датчики	473
12.5.3	Анероидные коробки (емкостные)	473
12.5.4	Погрешности датчиков давления	474
12.5.4.1	Соотношение погрешностей в значениях геопотенциальной высоты и погрешностей в значениях давления	475
12.5.5	Использование геометрической высоты вместо данных датчика давления	476
12.5.5.1	Общие положения	476
12.5.5.2	Метод расчета	476
12.5.6	Источники погрешностей при прямом измерении высоты	480
12.5.6.1	При определении геометрической высоты с помощью ГНСС ...	480
12.5.6.2	При радиолокационных наблюдениях за высотой	481
12.6	Оборудование наземной станции	481
12.6.1	Общие характеристики	481
12.6.2	Программное обеспечение для обработки данных	482
12.7	Эксплуатация радиозондов	483
12.7.1	Контрольное внесение корректирующих поправок непосредственно перед использованием	483
12.7.2	Методы запуска радиозондов	484
12.7.3	Процедуры запуска радиозонда	485
12.7.4	Подвеска радиозонда во время полета	486
12.7.5	Безопасность населения	486
12.8	Сравнение, калибровка и обслуживание	487
12.8.1	Сравнения	487
12.8.1.1	Оценка качества с использованием краткосрочных прогнозов. .	488
12.8.1.2	Сравнение данных измерений водяного пара и дистанционного зондирования	488
12.8.1.3	Сравнения радиозондов	488
12.8.2	Калибровка	490
12.8.3	Техническое обслуживание и ремонт	491
12.9	Вычисления и результаты измерений	492
12.9.1	Процедуры вычислений и представления результатов радиозондовых измерений	492
12.9.2	Внесение поправок	492
12.10	Вопросы, связанные с закупками	494
12.10.1	Использование и обновление результатов, полученных при взаимном сравнении высококачественных систем радиозондирования ВМО	494
12.10.2	Некоторые вопросы, которые необходимо учитывать при закупках.	494
Приложение 12.А. Современные требования к перспективной и оптимальной неопределенности радиозондовых измерений		496

Приложение 12.В. Оценки целевой, перспективной и пороговой точности измерений ветра и температуры на высотах, относительной влажности и геопотенциальной высоты (на основе регулярного обзора потребностей ВМО в аэрологических наблюдениях)	498
Приложение 12.С. Безопасные для окружающей среды радиозонды	503
Приложение 12.Д. Рекомендации по организации сравнений радиозондов и учреждению центров проведения испытаний	505
Справочная и дополнительная литература	513
ГЛАВА 13. ИЗМЕРЕНИЕ ВЕТРА НА ВЫСОТАХ.	516
13.1 Общие положения	516
13.1.1 Определения	516
13.1.2 Единицы измерения ветра на высотах	516
13.1.3 Метеорологические требования	517
13.1.3.1 Области применения в метеорологической практике	517
13.1.3.2 Усовершенствование процедур передачи сообщений	518
13.1.3.3 Требования к неопределенности измерений	518
13.1.3.4 Требования к максимальной высоте	521
13.1.4 Методы измерений	521
13.1.4.1 Слежение с использованием радионавигационных сигналов	522
13.1.4.2 Слежение с использованием направленной антенны	523
13.2 Датчики и приборы для измерения ветра на высотах	524
13.2.1 Навигационные системы слежения	524
13.2.1.1 Использование навигационных сигналов	524
13.2.1.2 Глобальная система определения местоположения	525
13.2.2 Радиолокатор	526
13.2.2.1 Первичные радиолокаторы	526
13.2.2.2 Вторичные радиолокаторы	527
13.2.3 Радиотеодолит	527
13.2.4 Оптический теодолит	529
13.3 Методы измерений	529
13.3.1 Общие сведения, касающиеся обработки данных	529
13.3.2 Наблюдения с использованием радионавигационных систем	530
13.3.3 Наблюдения с использованием направленной антенны	531
13.3.4 Шаропилотные наблюдения	532
13.4 Размещение наземного оборудования	532
13.5 Источники неопределенности	533
13.5.1 Общие положения	533
13.5.1.1 Неопределенности при слежении за мишенью	533
13.5.1.2 Неопределенности определения высоты	534
13.5.1.3 Движение мишени по отношению к атмосфере	534
13.5.2 Неопределенности систем для измерения ветра, использующих Глобальную систему определения местоположения	535
13.5.3 Неопределенности систем, в которых используется направленная антенна	537
13.5.4 Неопределенности при шаропилотных наблюдениях	541
13.5.5 Неопределенности репрезентативности	541
13.6 Сравнения, калибровка и техническое обслуживание	543
13.6.1 Сравнение	543
13.6.1.1 Оперативный мониторинг посредством сравнения с прогностическими полями	544
13.6.1.2 Сравнение с другими системами измерения ветра	544
13.6.2 Калибровка	545
13.6.3 Техническое обслуживание	545
13.7 Поправки	546
Справочная и дополнительная литература	547

ГЛАВА 14. НАБЛЮДЕНИЯ ЗА ТЕКУЩЕЙ И ПРОШЕДШЕЙ ПОГОДОЙ; СОСТОЯНИЕ ПОВЕРХНОСТИ ЗЕМЛИ	549
14.1 Общие сведения	549
14.1.1 Определения	549
14.1.2 Единицы измерений и шкалы	549
14.1.3 Метеорологические требования	550
14.1.4 Методы наблюдений	550
14.2 Наблюдения за текущей и прошедшей погодой	551
14.2.1 Осадки	551
14.2.1.1 Объекты наблюдения	551
14.2.1.2 Приборы и измерительные устройства: типы осадков	552
14.2.1.3 Приборы и измерительные устройства: интенсивность и характер осадков.	555
14.2.1.4 Приборы и измерительные устройства: подход, предполагающий использование многих датчиков	556
14.2.2 Мутность атмосферы и взвеси	556
14.2.2.1 Объекты наблюдения	556
14.2.2.2 Приборы и измерительные устройства для определения характеристик мутности атмосферы и взвеси	556
14.2.3 Другие погодные явления	558
14.2.3.1 Объекты наблюдения	558
14.2.3.2 Приборы и измерительные устройства	558
14.2.4 Состояние неба	559
14.2.4.1 Объекты наблюдения	559
14.2.4.2 Приборы и измерительные устройства	559
14.3 Наблюдение за состоянием поверхности земли	559
14.3.1 Объекты наблюдения	559
14.3.2 Приборы и измерительные устройства	559
14.4 Наблюдение за особыми явлениями	560
14.4.1 Электрические явления	560
14.4.2 Оптические явления	560
Приложение. Критерии для интенсивности слабых, умеренных и сильных осадков.	562
Справочная и дополнительная литература	564
ГЛАВА 15. НАБЛЮДЕНИЯ И ИЗМЕРЕНИЕ ОБЛАКОВ	568
15.1 Общие сведения	568
15.1.1 Определения	568
15.1.2 Единицы и шкалы	570
15.1.3 Метеорологические требования	570
15.1.4 Методы наблюдения и измерения	570
15.1.4.1 Количество облаков	570
15.1.4.2 Высота нижней границы облаков	571
15.1.4.3 Тип облаков	572
15.2 Оценка и наблюдения за количеством и видами облаков, высотой нижней границы облаков, осуществляемые наблюдателем	572
15.2.1 Проведение эффективной оценки	572
15.2.2 Оценка количества облаков	572
15.2.3 Оценка высоты нижней границы облаков	573
15.2.4 Наблюдение за видами облаков	575
15.3 Инструментальное измерение количества облаков	575
15.3.1 Измерение количества облаков с помощью лазерного облакомера	575
15.3.2 Измерение количества облаков с помощью инфракрасного детектора	577
15.3.3 Измерение количества облаков с помощью камеры обзора небосвода	578
15.4 Инструментальные измерения высоты нижней границы облаков	578
15.4.1 Измерение высоты нижней границы облаков с помощью лазерного облакомера	579
15.4.1.1 Метод измерения	579

Стр.

15.4.1.2	Размещение и установка	580
15.4.1.3	Источники погрешностей.	580
15.4.1.4	Калибровка и техническое обслуживание	581
15.4.2	Измерение высоты нижней границы облаков с помощью облакомера с вращающимся лучом	582
15.4.2.1	Метод измерения	582
15.4.2.2	Размещение и установка	583
15.4.2.3	Источники погрешностей.	583
15.4.2.4	Калибровка и техническое обслуживание	584
15.4.3	Измерение высоты нижней границы облаков с помощью облачного прожектора	584
15.4.3.1	Метод измерения	584
15.4.3.2	Размещение и установка	584
15.4.3.3	Источники погрешностей.	585
15.4.3.4	Калибровка и техническое обслуживание	585
15.4.4	Измерение высоты нижней границы облаков с помощью шара-пилота. . .	586
15.4.4.1	Метод измерения	586
15.4.4.2	Источники погрешности.	587
15.5	Инструментальное измерение форм облаков.	587
15.6	Другие особенности, связанные с облаками	587
15.6.1	Вертикальная видимость	587
	Справочная и дополнительная литература	588
ГЛАВА 16. ИЗМЕРЕНИЕ СОСТАВА АТМОСФЕРЫ		590
16.1	Общие сведения	590
16.1.1	Определения и описания	591
16.1.2	Единицы и шкалы	592
16.1.3	Принципы и методы измерений	594
16.1.4	Обеспечение качества.	596
16.2	Измерения (стратосферного) озона	597
16.2.1	Общее содержание озона.	597
16.2.2	Измерения вертикального распределения озона	599
16.2.2.1	Умкер-метод	599
16.2.2.2	Измерения с помощью озонозондов.	600
16.2.2.3	Другие методы измерений.	600
16.2.3	Наблюдения с помощью самолетов и спутников	600
16.3	Парниковые газы	601
16.3.1	Диоксид углерода (включая $\Delta^{14}\text{C}$, $\delta^{13}\text{C}$ и $\delta^{18}\text{O}$ в CO_2 , и соотношения O_2/N_2)	601
16.3.2	Метан	603
16.3.3	Заись азота.	604
16.3.4	Галогенуглероды и SF_6	604
16.3.5	Дистанционное зондирование парниковых газов	605
16.4	Химически активные газы.	605
16.4.1	Тропосферный (приземный) озон	605
16.4.2	Моноксид углерода	607
16.4.3	Летучие органические соединения	608
16.4.4	Оксид азота	611
16.4.5	Двуокись серы.	613
16.4.6	Молекулярный водород.	614
16.5	Атмосферные влажные выпадения	614
16.5.1	Отбор проб	615
16.5.2	Химический анализ	616
16.6	Аэрозоли.	620
16.6.1	Измерения химического состава аэрозолей	620
16.6.2	Измерения <i>in situ</i> аэрозольных радиационных характеристик.	625
16.6.3	Численная концентрация частиц и фракционный состав	627
16.6.4	Облачные ядра конденсации	628

	<i>Стр.</i>
16.6.5 Оптическая плотность аэрозоля	628
16.6.6 Лидарные наблюдения за аэрозолями на станциях ГСА	629
16.7 Естественная радиоактивность	635
Приложение. Центральные учреждения ГСА	636
Справочная и дополнительная литература	639

ПРЕДИСЛОВИЕ

В руководствах ВМО описываются практики и процедуры, которым Членам предлагается следовать 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 впервые было опубликовано в 1950 году. 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 в большинство областей применений ВМО, таких как мониторинг климата, численное прогнозирование погоды, наукастинг и прогнозирование явлений суровой погоды, каждая из которых способствует повышению благополучия обществ по всему миру.

Основная цель Руководства — предоставить руководящие указания в отношении наиболее эффективных практик и процедур для выполнения метеорологических, гидрологических и связанных с окружающей средой измерений и наблюдений для удовлетворения конкретных потребностей в различных областях применения. В нем также содержится информация о возможностях приборов и систем, которые регулярно используются для проведения таких наблюдений. Теоретические основы техники и методов наблюдения изложены в тексте и подкреплены ссылками и списком справочной и дополнительной литературы для получения дополнительной справочной информации и сведений.

Постоянная эволюция и стандартизация практики измерений и наблюдений, а также быстрое развитие новых методов и технологий производства 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.

Текущее издание Руководства включает:

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 издание тома III, подготовленное в 2023 году, было утверждено на семьдесят шестой сессии (ИС-76) Исполнительного совета ВМО. По сравнению с изданием тома III 2018 года (обновленным в 2021 году) это издание включает обновления к главе 3 «Самолетные наблюдения», главе 5 «Специальные методы профилирования атмосферного пограничного слоя и тропосферы», главе 6 «Электромагнитные методы обнаружения молний» и главе 8 «Метеорологические шары-зонды». В главу 5 также включено новое приложение, содержащее совместный стандарт ВМО/ИСО: Приложение 5.A «Наземное дистанционное зондирование параметров ветра — радиолокационный профилометр ветра».

От имени ВМО позвольте выразить мою искреннюю признательность Постоянному комитету по вопросам измерений, приборного оснащения и прослеживаемости Комиссии по наблюдениям, инфраструктуре и информационным системам и, в частности, его Экспертной группе по аэрологическим измерениям, Объединенной экспертной группе по самолетным системам наблюдений и Редакционному совету, чьи колоссальные усилия сделали возможной публикацию этого нового издания.

A handwritten signature in black ink, consisting of several fluid, overlapping strokes that form a stylized representation of the name Silesta Saulo.

(Профессор Селеста Сауло)
Генеральный секретарь