

Руководство по приборам и методам наблюдений

Том IV — Космические наблюдения

Издание 2018 г.

ПОГОДА КЛИМАТ ВОДА



ВСЕМИРНАЯ
МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКАЯ
ОРГАНИЗАЦИЯ

ВМО-№ 8

Руководство по приборам и методам наблюдений

Том IV — Космические наблюдения

Издание 2018 г.



ВСЕМИРНАЯ
МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКАЯ
ОРГАНИЗАЦИЯ

ВМО-№ 8

РЕДАКТОРСКОЕ ПРИМЕЧАНИЕ

Терминологическая база данных ВМО «МЕТЕОТЕРМ» доступна по адресу: <http://public.wmo.int/ru/ресурсы/«метеотерм»>.

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, 2018

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

[illegible]

СОДЕРЖАНИЕ

	Стр.
ГЛАВА 1. ВВЕДЕНИЕ	1
1.1 Исторический обзор	1
1.2 Пространственные и временные масштабы	2
1.3 Взаимодополняющий характер спутниковых и наземных измерений	2
 ГЛАВА 2. ПРИНЦИПЫ НАБЛЮДЕНИЯ ЗЕМЛИ ИЗ КОСМОСА	 4
2.1 Орбиты и наблюдение Земли из космоса	4
2.1.1 Поле зрения спутников и приборов	4
2.1.2 Орбитальный период, геостационарная орбита, цикл наблюдения и периодичность повторения орбиты	5
2.1.3 Орбитальная прецессия, солнечно-синхронные орбиты и дрейфующие орбиты	11
2.1.4 Эллиптические орбиты	12
2.1.5 Пусковые установки и вывод на орбиту	14
2.2 Принципы дистанционного зондирования	15
2.2.1 Электромагнитный спектр и диапазоны, используемые для дистанционного зондирования	16
2.2.2 Основные законы взаимодействия электромагнитного излучения и вещества	20
2.2.3 Наблюдения в окнах прозрачности атмосферы	23
2.2.3.1 Уходящее излучение	23
2.2.3.2 Измерения в видимом, ближнем инфракрасном и коротковолновом инфракрасном диапазонах	24
2.2.3.3 Измерения в средневолновом инфракрасном и тепловом инфракрасном диапазонах	25
2.2.3.4 Измерения в микроволновом диапазоне	28
2.2.4 Наблюдения в полосах поглощения	30
2.2.4.1 Уравнение переноса излучения	30
2.2.4.2 Восстановление профиля	31
2.2.4.3 Лимбовое зондирование	33
2.2.5 Активное зондирование	34
2.2.5.1 Радиозатменные наблюдения	35
2.2.5.2 Радиолокатор	36
2.2.5.3 Лидар	41
2.3 Космический и наземный сегменты	45
2.3.1 Космический сегмент	45
2.3.1.1 Обслуживающие платформы	45
2.3.1.2 Системы навигации и местопределения	46
2.3.1.3 Ориентация и стабилизация	47
2.3.1.4 Система проверки функционирования спутника	48
2.3.1.5 Передача данных	49
2.3.1.6 Услуги по ретрансляции данных	50
2.3.2 Наземный сегмент	51
2.3.2.1 Центральная станция управления и сбора глобальных данных	51
2.3.2.2 Центры управления полетами и операциями	52
2.3.2.3 Центры обработки и архивации данных	52
2.3.2.4 Распространение данных и продукции	53
2.3.2.5 Принимающие станции пользователей	53
2.3.2.6 Уровни обработки продукции	54
 ГЛАВА 3. ПРИБОРЫ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ	 56
3.1 Основные характеристики приборов	56
3.1.1 Сканирование, полоса захвата, цикл наблюдения	56
3.1.2 Спектральный диапазон: радиометры и спектрометры	60
3.1.3 Пространственное разрешение (мгновенное поле зрения, пиксель и функция рассеяния точки)	62

3.1.4	Радиометрическое разрешение	64
3.2	Классификация приборов	66
3.2.1	Формирователи оптических изображений среднего разрешения	67
3.2.2	Формирователи оптических изображений высокого разрешения	74
3.2.3	Надирные коротковолновые радиометры	76
3.2.4	Надирные сканирующие инфракрасные радиометры	80
3.2.5	Микроволновые радиометры	83
3.2.6	Лимбовые зондировщики	88
3.2.7	Радиозатменные зондировщики Глобальной навигационной спутниковой системы	89
3.2.8	Широкополосные радиометры	91
3.2.9	Приборы для мониторинга солнечного излучения	93
3.2.10	Формирователи изображений молний	94
3.2.11	Радиолокаторы обнаружения облаков и осадков	95
3.2.12	Радиолокационные скаттерометры	97
3.2.13	Радиолокационные альтиметры	99
3.2.14	Радиолокатор с получением изображений (радиолокатор с синтезированной апертурой)	100
3.2.15	Лидарная аппаратура	102
3.2.16	Градиометры/акселерометры	105
3.2.17	Приборы для мониторинга солнечной активности	106
3.2.18	Приборы для мониторинга параметров космической среды	107
3.2.19	Магнетометры и датчики электрического поля	108
ГЛАВА 4.	СПУТНИКОВЫЕ ПРОГРАММЫ	110
4.1	Оперативные метеорологические спутники	110
4.1.1	Спутниковая группировка на геостационарной или сильно вытянутой эллиптической орбите	111
4.1.2	Спутниковая группировка на солнечно-синхронной орбите	112
4.2	Специализированные космические аппараты для исследования атмосферы	115
4.2.1	Атмосферные осадки	115
4.2.2	Радиозатменные измерения	116
4.2.3	Атмосферная радиация	117
4.2.4	Химический состав атмосферы	118
4.2.5	Динамика атмосферы	118
4.3	Космические аппараты для исследования мирового океана и морского льда	120
4.3.1	Топография океана	122
4.3.2	Цветность океана	123
4.3.3	Приземный ветер у поверхности моря	123
4.3.4	Соленость поверхности моря	123
4.3.5	Волны	123
4.4	Космические аппараты для наблюдения за поверхностью суши	124
4.4.1	Основные оперативные и почти оперативные космические аппараты	124
4.4.2	Группировка спутников для мониторинга бедствий	126
4.4.3	Всепогодный мониторинг с высоким разрешением (с помощью PCA)	128
4.5	Космические аппараты для изучения твердой оболочки Земли	129
4.5.1	Космическая геодезия	130
4.5.2	Недра Земли	132
4.6	Космические аппараты для изучения космической погоды	133
4.6.1	Мониторинг солнечной активности	133
4.6.2	Мониторинг магнитосферы и ионосферы	135
4.6.2.1	Наблюдения за магнитосферой	135
4.6.2.2	Наблюдения за ионосферой	137
4.6.2.3	Наблюдения за условиями в космическом пространстве с оперативных метеорологических спутников	139

ГЛАВА 5. НАБЛЮДЕНИЯ ЗА ГЕОФИЗИЧЕСКИМИ ПЕРЕМЕННЫМИ ИЗ КОСМОСА . . .	142
5.1 Введение	142
5.1.1 Уровни обработки данных.	142
5.1.2 Качество продукции	142
5.1.2.1 Атмосферные объемы (относятся к наблюдениям в трехмерном (3D) измерении).	143
5.1.2.2 Горизонтальная разрешающая способность	143
5.1.2.3 Вертикальная разрешающая способность.	145
5.1.2.4 Цикл наблюдений	146
5.1.2.5 Неопределенность (СКО)	147
5.1.2.6 Своевременность	147
5.1.3 Оценка качества спутниковой продукции.	148
5.2 Основные атмосферные переменные, наблюдаемые в двух- и трехмерном измерениях (2D и 3D).	148
5.2.1 Температура атмосферного воздуха.	149
5.2.2 Удельная влажность воздуха.	149
5.2.3 Ветер (горизонтальный).	150
5.2.4 Ветер как вектор над поверхностью (горизонтальный)	151
5.2.5 Высота верхней границы планетарного пограничного слоя	151
5.2.6 Высота тропопаузы	151
5.2.7 Температура тропопаузы	152
5.3 Переменные облаков и атмосферных осадков	152
5.3.1 Температура вершины облака	152
5.3.2 Высота вершины облака.	153
5.3.3 Вид облаков.	153
5.3.4 Облачный покров	153
5.3.5 Высота нижней границы облаков.	154
5.3.6 Оптическая глубина облака.	154
5.3.7 Вода в жидкой фазе в облаке	154
5.3.8 Эффективный радиус капель воды в облаке	155
5.3.9 Лед в облаке	155
5.3.10 Эффективный радиус льда в облаке.	156
5.3.11 Высота нулевой изотермы в облаке.	157
5.3.12 Толщина слоя таяния льда в облаке	157
5.3.13 Атмосферные осадки (в жидкой или твердой фазе)	157
5.3.14 Интенсивность осадков на поверхности (в жидкой и твердой фазе)	157
5.3.15 Суммарные осадки (за 24 часа)	158
5.3.16 Обнаружение молний.	158
5.4 Аэрозоли и радиация	159
5.4.1 Оптическая плотность аэрозоля	159
5.4.2 Концентрация аэрозолей.	160
5.4.3 Эффективный радиус аэрозоля.	160
5.4.4 Тип аэрозоля	161
5.4.5 Вулканический пепел	161
5.4.6 Нисходящий поток солнечного излучения на верхней границе атмосферы.	162
5.4.7 Восходящий поток спектральной плотности излучения на верхней границе атмосферы	162
5.4.8 Восходящий поток длинноволнового излучения на верхней границе атмосферы	162
5.4.9 Восходящий поток коротковолнового излучения на верхней границе атмосферы	162
5.4.10 Отражение коротковолнового излучения от облаков.	163
5.4.11 Нисходящий поток длинноволнового излучения на поверхности Земли	163
5.4.12 Нисходящий поток коротковолнового излучения на поверхности Земли	163
5.4.13 Альbedo поверхности Земли.	163
5.4.14 Двухнаправленное отражение коротковолнового излучения от поверхности Земли.	164

5.4.15	Восходящий поток длинноволнового излучения на поверхности Земли	164
5.4.16	Длинноволновое излучение поверхности Земли	164
5.4.17	Активная радиация фотосинтеза	164
5.4.18	Доля поглощаемой активной радиации фотосинтеза	165
5.5	Океан и морской лед	165
5.5.1	Концентрация хлорофилла в океане	165
5.5.2	Цветность растворенных органических веществ (ЦРОВ)	166
5.5.3	Концентрация взвешенных наносов в океане	166
5.5.4	Коэффициент диффузионного ослабления в океане	166
5.5.5	Площадь нефтяных разливов	166
5.5.6	Температура поверхности моря	167
5.5.7	Соленость поверхности моря	167
5.5.8	Динамическая карта поверхности океана	167
5.5.9	Уровень моря в прибрежных районах (приливы и отливы)	168
5.5.10	Высота значительных волн	168
5.5.11	Преимущественное направление волн	168
5.5.12	Преимущественный период волн	168
5.5.13	Частотный спектр направленной энергии волн	169
5.5.14	Морской ледовый покров	169
5.5.15	Толщина морского льда	169
5.5.16	Вид морского льда	170
5.6	Поверхность суши (включая снег)	170
5.6.1	Температура поверхности суши	171
5.6.2	Влажность почвы на поверхности	171
5.6.3	Влажность почвы (в корнеобитаемом слое почвы)	172
5.6.4	Доля поверхности суши, покрытая растительностью	172
5.6.5	Тип растительности	172
5.6.6	Индекс листовой поверхности	172
5.6.7	Приведенный разностный индекс растительности	173
5.6.8	Долевая часть покрова, охваченная пожаром	173
5.6.9	Температура пожара	173
5.6.10	Энергия излучения от пожара	174
5.6.11	Состояние снега (влажный/сухой)	174
5.6.12	Снежный покров	174
5.6.13	Водный эквивалент снега	175
5.6.14	Тип почвы	175
5.6.15	Почвенно-растительный покров	175
5.6.16	Топография поверхности суши	176
5.6.17	Ледниковый покров	176
5.6.18	Топография ледников	176
5.7	Твердая оболочка земли	177
5.7.1	Геоид	177
5.7.2	Определение местоположения плит земной коры	177
5.7.3	Движение земной коры (горизонтальное и вертикальное)	178
5.7.4	Гравитационное поле	178
5.7.5	Гравитационные градиенты	178
5.8	Химический состав атмосферы	179
5.8.1	Озон (O_3)	179
5.8.2	Моноксид брома (BrO)	179
5.8.3	Ацетилен (C_2H_2)	180
5.8.4	Этан (C_2H_6)	180
5.8.5	Трихлорфторметан (CFC-11 = Фреон-11)	180
5.8.6	Дихлорфторметан (CFC-12 = Фреон-12)	181
5.8.7	Формальдегид ($CH_2O = HCHO$)	181
5.8.8	Метан (CH_4)	181
5.8.9	Оксись хлора (ClO = Гипохлорит)	182
5.8.10	Нитрат хлора ($ClONO_2$)	182
5.8.11	Оксись углерода (CO)	182

Стр.

5.8.12	Двуокись углерода (CO_2)	183
5.8.13	Сероксид углерода (COS)	183
5.8.14	Водяной пар (H_2O)	184
5.8.15	Хлороводород (HCl)	184
5.8.16	HDO (полутяжелая вода)	185
5.8.17	Азотная кислота (HNO_3)	185
5.8.18	Закись азота (N_2O)	185
5.8.19	Азотный ангидрид (N_2O_5)	186
5.8.20	Окись азота (NO)	186
5.8.21	Двуокись азота (NO_2)	186
5.8.22	Гидроксильный радикал (OH)	187
5.8.23	Пероксиацетилнитрат	187
5.8.24	Явление полярного стратосферного облака	187
5.8.25	Гексафторид серы (SF_6)	188
5.8.26	Двуокись серы (SO_2)	188
5.9	Космическая погода	189
5.9.1	Общее содержание электронов в ионосфере	190
5.9.2	Плотность электронов	191
5.9.3	Магнитное поле	191
5.9.4	Электрическое поле	191
	Приложение. Достижимое качество спутниковой продукции	193
ГЛАВА 6. КАЛИБРОВКА И ВАЛИДАЦИЯ		248
6.1	Калибровка прибора	248
6.1.1	Введение	248
6.1.2	Факторы, влияющие на калибровку	249
6.1.3	Предпусковая калибровка	249
6.1.4	Бортовая калибровка	249
6.1.5	Косвенная калибровка	251
6.1.6	Взаимная калибровка путем проведения одновременных наблюдений	251
6.1.7	Корректировка систематической погрешности измерений в многолетних рядах наблюдений	252
6.1.8	Использование калибровочной информации	252
6.1.9	Сопоставимость результатов измерений из космоса	253
6.2	Проверка качества продукции	254
6.2.1	Факторы, которые необходимо учитывать при проверке качества продукции	254
6.2.2	Основные принципы проверки качества продукции	255
6.2.3	Изучение воздействий	255
ГЛАВА 7. ВОПРОСЫ ОБЩЕГО ХАРАКТЕРА		257
7.1	Вопросы защиты радиочастот	257
7.1.1	Общее регулирование использования радиочастот	257
7.1.2	Пассивная микроволновая радиометрия	258
7.1.3	Активное микроволновое зондирование	258
7.1.4	Эксплуатация спутников и частоты радиосвязи	258
7.2	Международная координация	260
7.2.1	Координационная группа по метеорологическим спутникам	260
7.2.2	Комитет по спутниковым наблюдениям за Землей	260
7.3	Планирование спутниковых программ наблюдений	261
7.3.1	Срок эксплуатации спутниковой программы	261
7.3.2	Планирование с целью обеспечения непрерывности наблюдений и на случай непредвиденных ситуаций	262
7.3.3	Долгосрочная эволюция	264
СПРАВОЧНАЯ И ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ЛИТЕРАТУРА		265

ГЛАВА 1. ВВЕДЕНИЕ

1.1 ИСТОРИЧЕСКИЙ ОБЗОР

1 апреля 1960 г. запуск спутника для наблюдений в видимом и инфракрасном диапазонах спектра (TIROS-1) положил начало новой эре в метеорологии. Метеорологические системы, которые до этого времени отображались только при помощи синоптических карт и самолётных наблюдений, теперь могли быть представлены визуально в одно мгновение. Их быстро эволюционирующий характер стал еще более очевидным после получения снимков со спутника прикладного назначения (ATS-1), запущенного на геостационарную орбиту 6 декабря 1966 г. Появился термин «наукастинг», что стало первым результатом применения метеорологических спутников.

Первоначальное использование спутниковых данных сводилось почти исключительно к прогнозированию текущей погоды. Начиная со спутника Nimbus-3 (13 апреля 1969 г.), они начали применяться в области численного прогноза погоды (ЧПП) благодаря тому, что данные экспериментальной аппаратуры использовались для получения вертикальных профилей температуры и влажности атмосферы и определения ветра по движению облаков на основании последовательности изображений, получаемых с геостационарных спутников.

Первому глобальному эксперименту (ПГЭП, 1979—1980 гг.) в рамках Программы исследования глобальных атмосферных процессов (ПИГАП) удалось впервые объединить в комплексную систему четыре геостационарных спутника и два спутника с околополярной орбитой, что обеспечило глобальный охват зондирования и получение изображений четыре раза в сутки, а на низких и средних широтах получение изображений каждые 30 минут. Следует отметить, что с самого начала, помимо обеспечения поддержки оперативным применениям, метеорологические спутники позволили продвинуться вперед в понимании динамики атмосферы и климата.

Высокая экономическая ценность исследований земных ресурсов и мониторинга вегетационного цикла продиктовала появление новых спутниковых программ, ставящих целью наблюдения за поверхностью суши. Landsat-1, запущенный 23 июля 1972 г., был первым из серии спутников, проводящих наблюдения за поверхностью суши с высоким разрешением, а 22 февраля 1986 г. с запуском спутника SPOT-1, обеспечивающего получение изображений с пространственным разрешением от 10 до 20 метров, начала функционирование серия спутников для наблюдений за Землей (SPOT).

Исследования Мирового океана при помощи спутников начались с запуска спутника SeaSat 27 июня 1978 г., что ознаменовало наступление эры всепогодного микроволнового зондирования, как активного, так и пассивного. Почти в то же самое время, 24 октября 1978 г., Nimbus-7 приступил к пассивному микроволновому зондированию, сделав возможным проведение мониторинга цветности океана. После завершения спутниковых программ SeaSat с использованием альтиметрии, скаттерометрии и изображений РЛС с синтезированной апертурой приборы активного зондирования не эксплуатировались вплоть до запуска 17 июля 1991 г. европейского спутника дистанционного зондирования Земли (ERS-1). Получение информации об атмосферной радиации и химии атмосферы в начальной стадии было исследовано в ходе нескольких полетов спутников Nimbus. Еще одним важным этапом в изучении радиации Земли явился полет спутника для исследования радиационного баланса Земли (ERBS), запущенного 5 октября 1984 г. Для химии атмосферы важной вехой был полет спутника для исследований верхней атмосферы (UARS), запуск которого состоялся 12 сентября 1991 г.

1.2 ПРОСТРАНСТВЕННЫЕ И ВРЕМЕННЫЕ МАСШТАБЫ

Концепция Глобальной системы наблюдений (ГСН) с приходом спутников была полностью пересмотрена с учетом возможностей, возникающих вследствие взаимодополняющего характера наземных и космических наблюдений. Космический компонент предоставляет уникальную возможность непрерывного глобального охвата, а также обеспечивает повторяющийся цикл наблюдений. Его впечатляющим преимуществом является возможность вертикального зондирования атмосферы над океанами, которое позволяет устранить серьезное ограничение, присущее наблюдениям и не позволяющее использовать их для целей глобального численного прогнозирования погоды. На континентальных пространствах системы наблюдений в большей степени смещены в сторону населенных территорий, в то же время подавляющая часть суши является достаточно малонаселенной, а значит имеет недостаточную плотность наблюдений; кроме того, некоторые локальные наблюдения, проводимые с поверхности земли (например, типа облачности), с трудом поддаются интегрированию по пространству.

Одно важное различие между спутниковыми и наземными измерениями заключается в интегрировании по пространству и времени. Спутниковые измерения обеспечивают интегрирование входящего сигнала по мгновенному полю зрения вследствие необходимости получения достаточного количества энергии излучения для достижения требуемого отношения сигнал-шум. Наземные измерения обычно привязаны к точке, несмотря на то, что в зависимости от наблюдаемого параметра такие измерения могут быть репрезентативными для большей или меньшей территории. Во временном отношении ситуация обратная: спутниковые измерения имеют почти мгновенный характер вследствие движения спутника или времени, имеющегося для получения элемента изображения (пикселя) в процессе сканирования изображения; а наземные измерения обычно обеспечивают интегрирование по определенному временному интервалу для того, чтобы усреднить мгновенные флуктуации. Эти различия обуславливают сложность сравнения или совместного использования спутниковых и наземных измерений.

1.3 ВЗАИМОДОПОЛНЯЮЩИЙ ХАРАКТЕР СПУТНИКОВЫХ И НАЗЕМНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ

Следует признать, что спутники не способны проводить все необходимые наблюдения, обеспечивая требуемое качество измерений. Для некоторых геофизических переменных методов дистанционного зондирования не существует. Для других требуемое качество измерений может быть обеспечено только при наличии дополнительной информации от высокоточных наземных систем наблюдений. Помимо этого, поскольку спутниковые измерения зачастую носят не прямой характер (когда основной наблюдаемой количественной величиной является радиация), наземные измерения играют крайне важную роль в проверке спутниковой продукции.

До сих пор существуют области, в которых только наземные системы способны осуществлять измерения приемлемого качества. Но и в этих случаях спутники могут быть полезны для пространственной экстраполяции локальных и немногочисленных наземных измерений. В частности, практика усвоения данных позволяет переносить информацию по всему набору геофизических переменных, измеренных при помощи различных методов: это означает, что спутниковые наблюдения могут вносить вклад в понимание геофизических переменных, даже когда их невозможно получить прямыми наблюдениями со спутника при условии, что между этими переменными существует сильная физическая зависимость. Совместное взаимовыгодное использование наземных и спутниковых наблюдений является основополагающим принципом Интегрированной глобальной системы наблюдений ВМО.

Примечание: подробное описание спутниковых программ и приборов можно найти в режиме онлайн в базе данных ВМО о возможностях для наблюдений из космоса, которая доступна по адресу: <http://www.wmo.int/oscar>.
