Руководство по приборам и методам наблюдений

Том IV — Космические наблюдения

Издание 2021 г.

ПОГОДА КЛИМАТ ВОДА

ВСЕМИРНАЯ
МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКАЯ
ОРГАНИЗАЦИЯ

ВМО-№ 8

Руководство по приборам и методам наблюдений

Том IV — Космические наблюдения

Издание 2021 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, 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
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 . . . . . **ix**

ГЛАВА 1. ВВЕДЕНИЕ **1**
1.1 Исторический обзор 1
1.2 Взаимодополняющий характер спутниковых и наземных измерений 2

Справочная и дополнительная литература 4

ГЛАВА 2. ПРИНЦИПЫ НАБЛЮДЕНИЯ ЗЕМЛИ ИЗ КОСМОСА **5**
2.1 Орбиты и наблюдение Земли из космоса 5
2.1.1 Поле зрения спутников и приборов 5
2.1.2 Орбитальный период, геостационарная орбита, цикл наблюдения и периодичность повторения орбиты 6
2.1.3 Орбитальная прецессия, солнечно-синхронные орбиты и дрейфующие орбиты 12
2.1.4 Эллиптические орбиты 13
2.1.5 Пусковые установки и вывод на орбиту 15
2.2 Принципы дистанционного зондирования 17
2.2.1 Электромагнитный спектр и диапазоны, используемые для дистанционного зондирования 17
2.2.2 Основные законы взаимодействия электромагнитного излучения и вещества 21
2.2.3 Наблюдения в окнах прозрачности атмосферы 24
2.2.3.1 Уходящее излучение 24
2.2.3.2 Измерения в видимом, ближнем инфракрасном и коротковолновом инфракрасном диапазонах 25
2.2.3.3 Измерения в средневолновом инфракрасном и тепловом инфракрасном диапазонах 26
2.2.3.4 Измерения в микроволновом диапазоне 29
2.2.4 Наблюдения в полосах поглощения 31
2.2.4.1 Уравнение переноса излучения 31
2.2.4.2 Восстановление профиля 32
2.2.4.3 Лимбовое зондирование 34
2.2.4.4 Молния 35
2.2.5 Активное зондирование 36
2.2.5.1 Радиозатменные наблюдения 36
2.2.5.2 Радиолокатор 37
2.2.5.3 Лидар 43
2.3 Космический и наземный сегменты 47
2.3.1 Космический сегмент 48
2.3.1.1 Обслуживающие платформы 48
2.3.1.2 Системы навигации и местоопределения 49
2.3.1.3 Ориентация и стабилизация 50
2.3.1.4 Система проверки функционирования спутника 51
2.3.1.5 Передача данных 51
2.3.1.6 Услуги по сбору данных 53
2.3.2 Наземный сегмент 54
2.3.2.1 Центральная станция управления и сбора глобальных данных 54
2.3.2.2 Центры управления полетами и операциями 54
2.3.2.3 Центры обработки и архивации данных 55
2.3.2.4 Распространение данных и продукции 56
2.3.2.5 Принимающие станции пользователей 56
2.3.2.6 Уровни обработки продукции 57

Справочная и дополнительная литература 59

Стр.

ГЛАВА 3. ПРИБОРЫ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ 60
3.1 Основные характеристики приборов 60
3.1.1 Сканирование, шаг-статичный кадр, полоса захвата, цикл наблюдения . . 60
3.1.2 Спектральный диапазон: радиометры и спектрометры 65
3.1.3 Пространственное разрешение (мгновенное поле зрения, пиксель, размер пикселя по земной поверхности, угловое расстояние между пикселями и функция передачи модуляции) 68
3.1.4 Радиометрическое разрешение 71
3.2 Классификация приборов 73
3.2.1 Формирователи оптических изображений среднего разрешения 74
3.2.2 Формирователи оптических изображений высокого разрешения 77
3.2.3 Надирные сканирующие коротковолновые радиометры 78
3.2.4 Надирные сканирующие инфракрасные радиометры 80
3.2.5 Микроволновые радиометры 81
3.2.6 Лимбовые зондировщики 84
3.2.7 Радиозатменные зондировщики Глобальной навигационной спутниковой системы 86
3.2.8 Широкополосные радиометры 88
3.2.9 Приборы для мониторинга солнечного излучения 89
3.2.10 Формирователи изображений молний 89
3.2.11 Радиолокаторы обнаружения облаков и осадков 91
3.2.12 Радиолокационные скаттерометры 92
3.2.13 Радиолокационные альтиметры 94
3.2.14 Радиолокатор с получением изображений (радиолокатор с синтезированной апертурой) 95
3.2.15 Лидарная аппаратура 97
3.2.16 Градиометры/акселерометры 99
3.2.17 Приборы для мониторинга солнечной активности 100
3.2.18 Приборы для мониторинга параметров космической среды 101
3.2.19 Магнетометры и датчики электрического поля 101

ГЛАВА 4. СПУТНИКОВЫЕ ПРОГРАММЫ. 103
4.1 Оперативные метеорологические спутники 104
4.1.1 Спутниковая группировка на геостационарной или сильно вытянутой эллиптической орбите 104
4.1.2 Спутниковая группировка на солнечно-синхронной орбите 105
4.2 Специализированные космические аппараты для исследования атмосферы 107
4.2.1 Атмосферные осадки 107
4.2.2 Радиозатменные измерения 109
4.2.3 Атмосферная радиация 109
4.2.4 Химический состав атмосферы 110
4.2.5 Динамика атмосферы 111
4.3 Космические аппараты для исследования мирового океана и морского льда 113
4.3.1 Топография океана 116
4.3.2 Цветность океана 116
4.3.3 Приво́дный ветер 116
4.3.4 Соленость поверхности моря 117
4.3.5 Волны 117
4.4 Космические аппараты для наблюдения за поверхностью суши 117
4.4.1 Основные оперативные и почти оперативные космические аппараты 118
4.4.2 Группировка спутников для мониторинга бедствий 119
4.4.3 Всепогодный мониторинг с высоким разрешением (с помощью РСА) 122
4.5 Космические аппараты для изучения твердой оболочки Земли 123
4.5.1 Космическая геодезия 124
4.5.2 Недра Земли 125
4.6 Космические аппараты для изучения космической погоды 126
4.6.1 Мониторинг солнечной активности 127
4.6.2 Мониторинг магнитосферы и ионосферы 128

Стр.

4.6.2.1 Наблюдения за магнитосферой 129
4.6.2.2 Наблюдения за ионосферой 132
4.6.2.3 Наблюдения за условиями в космическом пространстве с оперативных метеорологических спутников 133

ГЛАВА 5. НАБЛЮДЕНИЯ ЗА ГЕОФИЗИЧЕСКИМИ ПЕРЕМЕННЫМИ ИЗ КОСМОСА . . . 135
5.1 Введение 135
5.1.1 Уровни обработки данных 135
5.1.2 Качество продукции 135
5.1.2.1 Атмосферные объемы (относятся к наблюдениям в трехмерном (3D) измерении) 136
5.1.2.2 Горизонтальная разрешающая способность 136
5.1.2.3 Вертикальная разрешающая способность 138
5.1.2.4 Цикл наблюдений 139
5.1.2.5 Точность (неопределенность) 140
5.1.2.6 Своевременность 141
5.1.3 Оценка качества спутниковой продукции 141
5.2 Основные атмосферные переменные, наблюдаемые в двух- и трехмерном измерениях (2D и 3D) 142
5.2.1 Температура атмосферного воздуха 142
5.2.2 Удельная влажность воздуха 142
5.2.3 Профиль ветра (горизонтальные компоненты вектора ветра — U и V) . . . 143
5.2.4 Ветер как вектор над поверхностью (горизонтальный) 144
5.2.5 Высота верхней границы планетарного пограничного слоя 145
5.2.6 Высота тропопаузы 145
5.2.7 Температура тропопаузы 145
5.3 Переменные облаков и атмосферных осадков 145
5.3.1 Температура вершины облака 146
5.3.2 Высота вершины облака 146
5.3.3 Вертикальная протяженность облака 147
5.3.4 Вид облаков 147
5.3.5 Облачный покров 148
5.3.6 Высота нижней границы облаков 148
5.3.7 Оптическая глубина облака 148
5.3.8 Вода в жидкой фазе в облаке 149
5.3.9 Эффективный радиус капель воды в облаке 149
5.3.10 Лед в облаке 150
5.3.11 Эффективный радиус льда в облаке 150
5.3.12 Высота нулевой изотермы в облаке 151
5.3.13 Толщина слоя таяния льда в облаке 151
5.3.14 Атмосферные осадки (в жидкой или твердой фазе) 152
5.3.15 Интенсивность осадков на поверхности (в жидкой и твердой фазе) 152
5.3.16 Суммарные осадки (за 24 часа или с другой периодичностью менее суток) 153
5.3.17 Обнаружение молний 153
5.4 Аэрозоли и радиация 153
5.4.1 Оптическая плотность аэрозоля 154
5.4.2 Концентрация аэрозолей 154
5.4.3 Эффективный радиус аэрозоля 155
5.4.4 Тип аэрозоля 155
5.4.5 Вулканический пепел 156
5.4.6 Нисходящий поток солнечного излучения на верхней границе атмосферы 156
5.4.7 Восходящий поток спектральной плотности излучения на верхней границе атмосферы 157
5.4.8 Восходящий поток длинноволнового излучения на верхней границе атмосферы 157

Стр.

5.4.9 Восходящий поток коротковолнового излучения на верхней границе атмосферы . . . 157
5.4.10 Отражение коротковолнового излучения от облаков . . . 157
5.4.11 Нисходящий поток длинноволнового излучения на поверхности Земли . . . 158
5.4.12 Нисходящий поток коротковолнового излучения на поверхности Земли . . . 158
5.4.13 Альбедо поверхности Земли . . . 158
5.4.14 Двунаправленное отражение коротковолнового излучения от поверхности Земли . . . 158
5.4.15 Восходящий поток длинноволнового излучения на поверхности Земли . . . 159
5.4.16 Длинноволновое излучение поверхности Земли . . . 159
5.4.17 Активная радиация фотосинтеза . . . 159
5.4.18 Доля поглощаемой активной радиации фотосинтеза . . . 159
5.5 Океан и морской лед . . . 160
5.5.1 Концентрация хлорофилла в океане . . . 160
5.5.2 Цветность растворенных органических веществ (ЦРОВ) . . . 160
5.5.3 Концентрация взвешенных наносов в океане . . . 161
5.5.4 Коэффициент диффузионного ослабления в океане . . . 161
5.5.5 Площадь нефтяных разливов . . . 161
5.5.6 Температура поверхности моря . . . 161
5.5.7 Соленость поверхности моря . . . 162
5.5.8 Динамическая карта поверхности океана . . . 162
5.5.9 Уровень моря в прибрежных районах (приливы и отливы) . . . 163
5.5.10 Высота значительных волн . . . 163
5.5.11 Преимущественное направление волн . . . 163
5.5.12 Преимущественный период волн . . . 163
5.5.13 Частотный спектр направленной энергии волн . . . 164
5.5.14 Покров/сплоченность морского льда . . . 164
5.5.15 Толщина морского льда . . . 164
5.5.16 Вид морского льда . . . 165
5.5.17 Температура поверхности льда . . . 165
5.5.18 Движение/дрейф льда . . . 166
5.6 Поверхность суши (включая снег) . . . 166
5.6.1 Температура поверхности суши . . . 166
5.6.2 Влажность почвы на поверхности . . . 167
5.6.3 Влажность почвы (в корнеобитаемом слое почвы) . . . 167
5.6.4 Доля поверхности суши, покрытая растительностью . . . 168
5.6.5 Тип растительности . . . 168
5.6.6 Индекс листовой поверхности . . . 168
5.6.7 Приведенный разностный индекс растительности . . . 169
5.6.8 Долевая часть покрова, охваченная пожаром . . . 169
5.6.9 Температура пожара . . . 169
5.6.10 Энергия излучения от пожара . . . 170
5.6.11 Состояние снега (влажный/сухой) . . . 170
5.6.12 Снежный покров . . . 170
5.6.13 Водный эквивалент снега . . . 171
5.6.14 Тип почвы . . . 171
5.6.15 Почвенно-растительный покров . . . 171
5.6.16 Топография поверхности суши . . . 172
5.6.17 Ледниковый покров . . . 172
5.6.18 Топография ледников . . . 172
5.7 Твердая оболочка земли . . . 173
5.7.1 Геоид . . . 173
5.7.2 Определение местоположения плит земной коры . . . 173
5.7.3 Движение земной коры (горизонтальное и вертикальное) . . . 174
5.7.4 Гравитационное поле . . . 174
5.7.5 Гравитационные градиенты . . . 174

Стр.

5.8 Химический состав атмосферы 175
5.9 Космическая погода 175
5.9.1 Общее содержание электронов в ионосфере 177
5.9.2 Плотность электронов 178
5.9.3 Магнитное поле 178
5.9.4 Электрическое поле 178

Приложение. Потребности пользователей в космических наблюдениях 179

ГЛАВА 6. КАЛИБРОВКА И ВАЛИДАЦИЯ 191
6.1 Калибровка прибора 191
6.1.1 Введение и обзор 191
6.1.2 Факторы, влияющие на калибровку 193
6.1.3 Предпусковая калибровка 193
6.1.4 Бортовая калибровка 194
6.1.5 Косвенная калибровка 195
6.1.6 Взаимная калибровка путем проведения одновременных наблюдений . . 196
6.1.7 Корректировка систематической погрешности измерений в многолетних рядах наблюдений 196
6.1.8 Использование калибровочной информации 197
6.1.9 Сопоставимость результатов измерений из космоса 198
6.2 Валидация 198
6.2.1 Факторы, которые необходимо учитывать при проверке качества продукции 198
6.2.1 Стратегии валидации 199
6.2.2 Валидация данных уровня 1 200
6.2.3 Валидация геофизической продукции (уровень 2) 200
6.2.4 Валидация с помощью ЧПП 200

Справочная и дополнительная литература 202

ГЛАВА 7. МЕЖДИСЦИПЛИНАРНЫЕ ВОПРОСЫ 204
7.1 Вопросы защиты радиочастот 204
7.1.1 Общее регулирование использования радиочастот 204
7.1.2 Пассивная микроволновая радиометрия 205
7.1.3 Активное микроволновое зондирование 205
7.1.4 Эксплуатация спутников и частоты радиосвязи 206
7.2 Международная координация 206
7.2.1 Координационная группа по метеорологическим спутникам 206
7.2.2 Комитет по спутниковым наблюдениям за Землей 208
7.3 Планирование спутниковых программ наблюдений 210
7.3.1 Срок эксплуатации спутниковой программы 210
7.3.2 Планирование с целью обеспечения непрерывности наблюдений и на случай непредвиденных ситуаций 211
7.3.3 Долгосрочная эволюция 213

Справочная и дополнительная литература 215

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 IV, подготовленное в 2021 году, было утверждено на семьдесят третьей сессии (ИС-73) Исполнительного совета ВМО. По сравнению с изданием тома IV 2018 года, это издание включает обширные обновления глав 1 и 5, а также частичные обновления всех остальных глав.

В процессе обновления этого тома ВМО извлекла пользу из превосходного взаимодействия, осуществлявшегося между экспертами сообщества в области спутникового наблюдения за Землей 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. ВВЕДЕНИЕ

1.1 ИСТОРИЧЕСКИЙ ОБЗОР

Эра спутниковой метеорологии началась с запуска в конце 1950-х гг. серии спутников Спутник, которые обеспечили первые космические измерения взаимодействующей системы атмосфера-Земля (Menzel, 2001). Соединенные Штаты Америки начали свою метеорологическую космическую программу с запуска 1 апреля 1960 г. спутника для наблюдений в видимом и инфракрасном диапазонах спектра — 1 (ТАЙРОС-1). До появления ТАЙРОС-1 в рамках эксперимента на спутнике Эксплорер VII проводились измерения радиационного баланса, то есть баланса между поступающей солнечной радиацией и радиацией, выходящей из атмосферы в результате отражения солнечной радиации и тепловой эмиссии (Smith, 1985).

Первый геостационарный метеорологический спутник, Спутник прикладного назначения — 1 (АТС-1), был запущен 6 декабря 1966 г. и обеспечивал возможности наблюдения только в дневное время. 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 особенно очевиден после получения снимков с геостационарного спутника. Появился термин «наукастинг», что стало первым результатом применения метеорологических спутников.

Первоначальное использование спутниковых данных сводилось почти исключительно к прогнозированию текущей погоды, главным образом в форме изображений. Другой важной областью применений было выведение параметров движения атмосферного воздуха (Fujita, 1968). Благодаря своей способности обеспечивать непрерывные измерения геостационарные спутники также стали незаменимы для мониторинга тропических циклонов и систем низкого давления средних широт (Purdom and Menzel, 1996).

Также постепенно сформировалось сообщество пользователей в области численного прогноза погоды (ЧПП). Излучения, измеряемые приборами серии ТАЙРОС для оперативного вертикального зондирования (ТОВС) на спутниках Национального управления по исследованию океанов и атмосферы (НУОА), использовались для получения информации о температуре и влажности для зондирования (вертикальных профилей). На протяжении многих лет предпринимались попытки использовать эти данные зондирования температуры и влажности в ЧПП, подобно тому как использовалась информация с радиозондов. Зависимость ЧПП от радиозондов предполагала, что спутниковые данные должны были быть отформатированы по аналогии с характеристиками радиозондирования, в то время как спутниковые измерения излучения представляли собой совокупность данных по широкому пересечению слоев атмосферы и не сводятся к одноуровневым измерениям. Наконец, устойчивые преимущества спутниковых наблюдений излучения были реализованы благодаря сдвигу парадигмы, когда данные измерения излучения стали использоваться непосредственно в системе вариационной ассимиляции ЧПП вместо полученных данных зондирования (Eyre, 1997).

Таким образом, метеорологические спутники позволили совершенно по-новому взглянуть на метеорологическую и взаимодействующую систему атмосфера-Земля и на сегодняшний день предоставляют множество данных, которые являются непременным условием современного прогнозирования погоды во всех масштабах. Ярким примером является ЧПП: внедрение космических измерений существенно улучшило прогнозы ЧПП, и в настоящее время метеорологические спутниковые измерения лежат в основе ЧПП (WMO, 2012). Тот факт, что измерения посредством методов дистанционного зондирования являются жизненно важным компонентом системы наблюдений для целей глобального мониторинга и прогнозирования, отражается в растущем

числе международных партнерств, создаваемых для осуществления комплексных и скоординированных спутниковых программ, как описано в одной из последующих глав настоящего Руководства.

Высокая экономическая ценность исследований земных ресурсов и мониторинга вегетационного цикла продиктовала появление спутниковых программ, ставящих целью наблюдения за поверхностью суши. Эти спутники обладают высоким пространственным разрешением, но имеют низкую периодичность прохождения над тем или иным районом Земли. 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 начало эры всепогодного микроволнового зондирования, как активного, так и пассивного. Примерно в это же время, 24 октября 1978 г., состоялся запуск Nimbus-7, который использовал пассивное микроволновое зондирование, 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 — 1 (ERS-1). Мониторинг уровня моря также стал одним из видов оперативной деятельности, например, благодаря серии спутников Jason. Краткая история вопроса была подготовлена Wilson et al. (2006).

Были продемонстрированы социально-экономические преимущества спутниковых данных, и в подробных оценках даже приводится анализ затрат и выгод, доказывающий огромную экономическую ценность спутниковых метеорологических наблюдений для общества и человечества. Примером может служить отчет Европейской организации по эксплуатации метеорологических спутников (EBMETCAT) об анализе затрат и выгод европейских полярно-орбитальных метеорологических спутников следующего поколения (серия Metop) (EUMETSAT, 2014).

1.2 ВЗАИМОДОПОЛНЯЮЩИЙ ХАРАКТЕР СПУТНИКОВЫХ И НАЗЕМНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ

Концепция Глобальной системы наблюдений с приходом спутников была полностью пересмотрена с учетом возможностей, возникающих вследствие взаимодополняющего характера наземных и космических наблюдений. Космические системы могут использоваться для наблюдений за взаимодействующей системой атмосфера-Земля во всей ее полноте. Полярно-орбитальные метеорологические спутники (на высоте около 800 км) обеспечивают глобальные наблюдения, однако частота наблюдений каждого района обычно не превышает двух раз в сутки. Низкоорбитальные высоты обеспечивают лучшее пространственное разрешение и позволяют использовать активные приборы (радиолокатор, лидар). Для более частотных наблюдений требуется плеяда полярно-орбитальных спутников. Геостационарный космический компонент (на высоте 36 000 км) предоставляет уникальную возможность непрерывного охвата, а также обеспечивает повторяющийся цикл наблюдений.

Впечатляющим преимуществом спутников является их способность выполнять плотные пространственные наблюдения над океанами, что позволяет устранить серьезное ограничение, присущее наблюдениям и не позволяющее использовать их для целей глобального ЧПП. Аналогичная аргументация применима и в отношении континентальных районов, где системы наблюдений в большей степени смещены в сторону населенных территорий, в то время как огромные участки суши имеют недостаточную плотность наблюдений.

Одно важное различие между измерениями дистанционного зондирования из космоса и наземными измерениями in situ связано с разной степенью интегрирования по пространству и времени. Космические измерения обеспечивают интегрирование входящего сигнала по мгновенному полю зрения. Наземные измерения *in situ* обычно привязаны к точке, несмотря на то что в зависимости от наблюдаемого параметра такие измерения могут быть репрезентативными для территории. Во временном отношении ситуация обратная. Космические измерения имеют почти мгновенный характер, тогда как наземные измерения in situ могут занимать определенное время (например, измерения с автоматической метеорологической станции) или или могут интегрироваться по определенному временному интервалу, например, радиозонд проходит через атмосферу в течение продолжительного периода и обеспечивает единый профиль. Эти различия следует учитывать при сопоставлении спутниковых и наземных измерений.

Следует признать, что спутники не способны проводить все требуемые наблюдения, обеспечивая необходимое 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 космические измерения носят непрямой характер (когда основной наблюдаемой количественной величиной является радиация), наземные измерения зачастую играют крайне важную роль в проверке спутниковой продукции. Краткая информация о текущих возможностях и роли наземных и космических систем приводится Saunders et al. (2015).

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 вносят вклад в понимание геофизических переменных, даже когда геофизическая переменная не может быть получена напрямую со спутника; необходимым условием для этого является наличие физической зависимости между геофизической переменной и излучением, наблюдаемым со спутника. Совместное взаимовыгодное использование наземных и спутниковых наблюдений является основополагающим принципом Интегрированной глобальной системы наблюдений ВМО. В ЧПП это было достигнуто благодаря процессу ассимиляции данных.

СПРАВОЧНАЯ И ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ЛИТЕРАТУРА

EUMETSAT. *The case for EPS/METOP Second-Generation: Cost Benefit Analysis*; 2014. https://www-cdn.eumetsat.int/files/2020-04/pdf_report_eps-sg_cost-benefit.pdf.

Eyre, J. R. Variational Assimilation of Remotely-Sensed Observations of the Atmosphere. *Journal of the Meteorological Society of Japan* **1997**, *75* (1B), 331–338. https://doi.org/10.2151/jmsj1965.75.1B_331.

Fujita, T. T. Present Status of Cloud Velocity Computations from the ATS I and ATS III Satellites. In *Proceedings of Space Research IX: 11th COSPAR Plenary Meeting*, Tokyo, Japan, 9–21 May 1968; North-Holland Publishing Company: Amsterdam, 1969, pp 557–570.

Menzel, W. P. *Applications with Meteorological Satellites* (SAT-No. 28; WMO/TD-No. 1078). World Meteorological Organization: Geneva, 2001.

Menzel, W. P.; Phillips, J. M. Satellite Meteorology: How It All Started, 50 Years Ago. *Bulletin of the American Meteorological Society* **2009**, *90* (10),1435–1436. https://doi.org/10.1175/2009BAMS2963.1.

Purdom, J. F. W.; Menzel, W. P. Evolution of Satellite Observations in the United States and Their Use in Meteorology. In *Historical Essays on Meteorology 1919–1995: The Diamond Anniversary History Volume of the American Meteorological Society*: Fleming, J. R., Ed.; American Meteorological Society: Boston, 1996; 99–155. https://doi.org/10.1007/978-1-940033-84-6_5.

Smith, W. L. Satellites. In *Handbook of Applied Meteorology*; Houghton, D. D., Ed.; John Wiley and Sons: New York, 1985.

Saunders, R.; Crewell, S.; Gelaro, R. et al. Observations for Global to Convective Scale Models. In *Seamless Prediction of the Earth System: From Minutes to Months* (WMO-No. 1156); WMO: Geneva, 2015.

Wilson, W.S.; Fellous, J.-L.; Kawamura, H. et al. A History of Oceanography from Space. In *Remote Sensing of the Marine Environment*; Gower, J. F. R, Ed.; American Society for Photogrammetry and Remote Sensing: Bethesda, 2006.

World Meteorological Organization (WMO). *Final Report of the Fifth WMO Workshop on the Impact of Various Observing Systems on Numerical Weather Prediction* (Окончательный отчет пятого семинара по влиянию различных систем наблюдений на численное прогнозирование погоды) (WIGOS Techical Report 2012-1). Geneva, 2012.

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: https://www.wmo-sat.info/oscar/spacecapabilities.

ГЛАВА 2. ПРИНЦИПЫ НАБЛЮДЕНИЯ ЗЕМЛИ ИЗ КОСМОСА

Настоящая глава дает общее представление о наблюдении Земли из космоса, включая его потенциальные выгоды и ограничения. В ней изложены основные понятия, относящиеся к орбитам, и характерные особенности наблюдения Земли из космоса. В ней также приводятся принципы дистанционного зондирования.

2.1 ОРБИТЫ И НАБЛЮДЕНИЕ ЗЕМЛИ ИЗ КОСМОСА

За Землей можно наблюдать из космоса с различных орбит при различных условиях обзора. В настоящем разделе рассматриваются следующие вопросы:

a) поле зрения спутниковых приборов;

b) орбитальный период, геостационарная орбита, цикл наблюдения и периодичность повторения орбиты;

c) орбитальная прецессия, солнечно-синхронные орбиты и дрейфующие орбиты;

d) эллиптические орбиты;

e) пусковые установки и вывод на орбиту.

2.1.1 Поле зрения спутников и приборов

Самым большим преимуществом наблюдений со спутниковой платформы по сравнению с наземными наблюдениями или при помощи шаров-зондов является широкое потенциальное поле зрения или зона обслуживания (FOV). Спутниковые платформы наблюдений обычно работают на орбитах минимальной высотой 400 км. Во многих случаях их орбиты еще и выше, вплоть до геостационарной орбиты (35 786 км). FOV зависит от высоты орбиты, конфигурации измерительной аппаратуры и целевого применения. Эти факторы могут ограничивать полезный диапазон зенитных углов (ζ), под которыми можно вести наблюдение Земли. Если FOV спутника характеризуется как максимальное расстояние на поверхности Земли, которое потенциально можно видеть с высоты спутника при данном зенитном угле, то отношение, представленное на рисунке 2.1, может быть записано как:

$$\mathrm{FOV} = 2\,R\,\delta\,\pi/180 \qquad \sin(\zeta - \delta) = \frac{R}{H+R}\sin\zeta \tag{2.1}$$

где R = 6 371 км (радиус Земли), H = высота орбиты в км, и δ = геоцентрический угол в градусах.

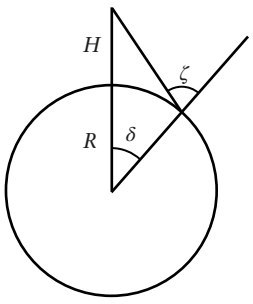


Рисунок 2.1. Поле зрения в зависимости от зенитного угла ζ

Таблица 2.1. Потенциальное поле зрения спутника и соответствующий геоцентрический угол в зависимости от высоты орбиты спутника и зенитного угла, под которым ведется наблюдение участка Земли

Зенитный угол для различных применений	*H = 400 км*		*H = 600 км*		*H = 800 км*		*H = 35 786 км*	
	FOV	δ	*FOV*	δ	*FOV*	δ	*FOV*	δ
$\zeta = 90°$ (горизонт-горизонт)	4 401 км	19,79°	5 326 км	23,95°	6 076 км	27,32°	18 082 км	81,31°
$\zeta = 85°$ (телесвязь)	3 423 км	15,39°	4 322 км	19,43°	5 057 км	22,74°	16 978 км	76,34°
$\zeta = 70°$ (качественное использование)	1 746 км	7,85°	2 405 км	10,82°	2 980 км	13,40°	13 752 км	61,84°
$\zeta = 60°$ (количественное использование)	1 207 км	5,43°	1 707 км	7,68°	2 157 км	9,70°	11 671 км	52,48°

В таблице 2.1 представлены значения FOV спутника (в км) в зависимости от высоты орбиты для типичных значений зенитного угла ζ. Также приводится соответствующий геоцентрический угол δ.

Потенциальное FOV спутника может не полностью покрываться одним измерительным прибором. Как принцип зондирования, так и технические характеристики прибора могут задавать верхний предел для FOV прибора. Например, радиолокационные альтиметры могут функционировать только в надирной геометрии (в направлении, указывающем непосредственно вниз). Они поэтому не имеют в собственном смысле FOV, за исключением расширения луча вследствие дифракции. Формирователи изображения очень высокого разрешения обычно имеют FOV в диапазоне нескольких десятков километров, как например в некоторых режимах луча радиолокатора с синтезированной апертурой (РСА).

Движение спутника позволяет измерительной аппаратуре обеспечивать последовательное покрытие FOV вдоль орбиты. При сканировании прибором траектории движения спутника они представляют собой полосу поверхности Земли, которую называют полосой захвата. Полоса захвата может быть центрирована вдоль подспутниковой трассы или может быть параллельна ей в приборах бокового обзора (например, РСА). Для некоторых задач (управление ориентацией при чрезвычайных ситуациях, стереоскопия в связи с последовательными орбитами и т. п.) определённые приборы с ограниченной полосой захвата могут менять наклон таким образом, что полоса захвата будет в стороне от трассы, внутри так называемого эффективного поля зрения. Ширина полосы захвата является поперечной составляющей фактического FOV прибора. Понятие полосы захвата не применяется в отношении приборов на геостационарной орбите.

2.1.2 Орбитальный период, геостационарная орбита, цикл наблюдения и периодичность повторения орбиты

Высота орбиты H определяет орбитальный период T. Это отношение записывается как:

$$T = a\,(1 + \frac{H}{R})^{\frac{3}{2}} \tag{2.2}$$

где a = 84,47 мин (T выражается в минутах).

Высота, которая соответствует одним звездным суткам (23 ч 56 мин 04 с), составляет 35 786 км. Спутник с орбитой на этой высоте называется геосинхронным. Орбита

называется геостационарной, если орбита лежит в экваториальной плоскости и направлена на восток: спутник кажется неподвижным по отношению к поверхности Земли в надире экваториальной подспутниковой точки.

Для орбиты, наклоненной по отношению к экваториальной плоскости, спутник пересекает экватор на определенной долготе. Спустя T минут произойдет еще одно экваториальное пересечение на долготе со смещением на запад на величину в градусах, соответствующую вращению Земли в течение орбитального периода. Разница по долготе (или космическое расстояние) между двумя последовательными пересечениями экватора в одну и ту же фазу (спуска или подъема) называется смещением. Вместе с полосой захвата прибора смещение определяет время необходимое для полной съемки поверхности Земли (покрытие наблюдениями) (рисунок 2.2).

Если полоса захвата прибора имеет размер, по крайней мере, не меньше смещения, покрытие, обеспечиваемое двумя соприкасающимися орбитами, является непрерывным. Поэтому время, необходимое для глобального покрытия (цикл наблюдения), зависит от отношения между полосой захвата прибора и смещением.

В таблице 2.2 указываются период и соответствующее смещение для высот орбит, приведенных в качестве примеров в таблице 2.1. Помимо этого, указываются циклы наблюдения, соответствующие нескольким полосам захвата приборов. Эти полосы захвата связаны с количественным и качественным использованием, а именно для зенитных углов 70° и 60° соответственно. Когда приборы могут использоваться для наблюдений в дневное и ночное время, время наблюдения следует делить на два. Смещение и цикл наблюдения не приводятся для H = 35 786 км (геостационарная высота).

Для геостационарного спутника, который непрерывно видит одну и ту же область поверхности Земли, цикл наблюдения определяется только характеристиками прибора и его завершение может занять несколько минут или даже меньше, в зависимости от области сканирования. В пределах зоны покрытия спутника наблюдение с геостационарной орбиты прекрасно подходит для непрерывного мониторинга. Например, такой мониторинг необходим для обнаружения мгновенных событий, таких как удары молнии или для высокочастотной временной выборки при быстро развивающихся ситуациях, таких как активная конвекция. При этом, однако, из охвата исключаются очень высокие широты или любые точки, находящиеся слишком далеко от подспутниковой точки. Из таблицы 2.1 видно, что δ = 81,31° является максимальным геоцентрическим углом.

Для негеостационарного спутника считается, что орбита характеризуется периодичностью повторения, если он проходит точно над той же трассой после определённого числа витков. В течение периода повторения орбиты трасса спутника день ото дня может

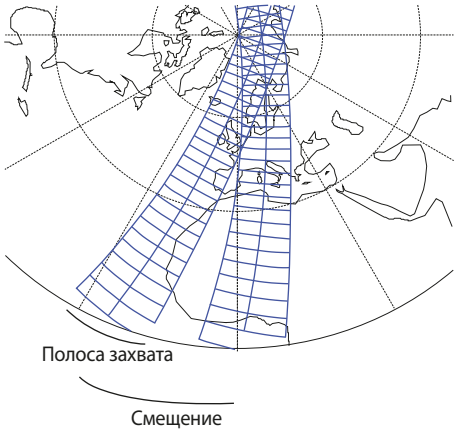


Рисунок 2.2. Смещение между двумя последовательными орбитами и полосой захвата прибора

Таблица 2.2. Период, смещение (сдвиг) и цикл наблюдения для орбит, представленных в таблице 2.1

Орбитальный параметр	*H = 400 км*	*H = 600 км*	*H = 800 км*	*H = 35 786 км*
Период T	92,6 мин	96,7 мин	100,9 мин	23 ч 56 мин 4 с
Смещение (сдвиг)	2 570 км	2 690 км	2 800 км	0 км
Цикл наблюдения для $\zeta = 70°$ (только днем)	35 ч	27 ч	23 ч	с прибора
Цикл наблюдения для $\zeta = 60°$ (только днем)	51 ч	38 ч	31 ч	с прибора
Цикл наблюдения для $\zeta = 70°$ (днем и ночью)	18 ч	13 ч	11 ч	с прибора
Цикл наблюдения для $\zeta = 60°$ (днем и ночью)	26 ч	19 ч	16 ч	с прибора

смещаться по заданной схеме, которая может иметь определенную повторяемость, и это называется подциклами. Некоторые подциклы могут представлять интерес потому, что спутник заходит в разные, но достаточно близкие друг к другу области в течение коротких промежутков времени, другие же подциклы могут представлять интерес, поскольку покрываемые области являются смежными по пространству.

Если орбита является солнечно-синхронной (см. раздел 2.1.3), то наличие периодичности повторения означает, что целое число витков может быть совершено за целое число дней. Орбитальный период определяет N — количество орбит, которые спутник проходит за 24 ч. Оно обычно не является целым числом. Для того чтобы получить периодичность повторения орбиты за m дней, орбитальный период подбирается таким образом, чтобы N, умноженное на m, было целым числом. Тогда N можно записать в таком виде, при котором n и ℓ, соответственно, есть частное и остаток деления «$N \cdot m$» на m:

$$N = n + \ell/m \tag{2.3}$$

где n, ℓ и m являются целыми числами ($\ell < m$).

Уравнение 2.3 также применимо к орбитам, не являющимся солнечно-синхронными. Однако, в таких случаях периодичность повторения m уже не может быть выражена в астрономических сутках, равных 24 ч, и должна быть немного скорректирована в связи с дрейфом орбиты. Таблица 2.3 содержит примеры периодичности повторения орбиты и основных подциклов для ряда орбит.

Орбита с периодичностью повторения является необходимым элементом, если наблюдение определенной территории требуется проводить с фиксированными интервалами при совершенно одинаковых условиях. Это относится к альтиметрическим измерениям для геодезических применений, либо к формирователям изображений высокого разрешения, которые используются в наблюдениях за сушей для обнаружения локальных изменений.

Периодичность повторения орбит может быть полезной, когда полоса захвата прибора существенно уже, чем сдвиг (смещение) между двумя последовательными орбитами, и глобального охвата невозможно достичь за один день. В таком случае согласно определенной логике может быть выстроена последовательность, обеспечивающая охват день за днем, если в этом есть необходимость. Подобная логика может потребоваться для обеспечения регулярной прогрессии или во избежание систематических смещений в результате ненадлежащей выборки.

На рисунке 2.3 графически представлена эволюция орбитальных траекторий для орбиты с однодневным подциклом (такой как ранняя версия Landsat). Как показывает рисунок 2.3, при однодневном подцикле каждый день полоса покрытия примыкает к полосе, которую

Таблица 2.3. Периодичность повторения и основные подциклы для ряда орбит

	Солнечно-синхронные орбиты					*Несолнечно-синхронные орбиты*
Высота орбиты	*909 км (например, Landsat 1—3)*	*705 км (например, Landsat 4—8)*	*832 км (например, SPOT)*	*791 км (например, Envisat)*	*820 км (например, Metop)*	*1 336 км (например, Jason)*[a]
Период	103,2 мин	98,9 мин	101,5 мин	100,6 мин	101,3 мин	112,4 мин
Количество орбит/день	13 + 17/18	14 + 9/16	14 + 5/26	14 + 11/35	14 + 6/29	12 + 7/10[a]
Периодичность	18 дней	16 дней	26 дней	35 дней	29 дней	10 дней[a]
Витки/цикл	251	233	369	501	413	127
Основной(ые) подцикл(ы)	1 день	7 дней, 2 дня	5 дней	16 дней, 3 дня	5 дней	3 дня[a]

Примечание:

[a] Что касается Совместной сети спутников для альтиметрии в интересах океанографии (JASON), спутники которой не являются солнечно-синхронными, значения приводятся для продолжительности дня, равной 23 ч 48 мин, т. е. 0,99156 от продолжительности астрономических суток.

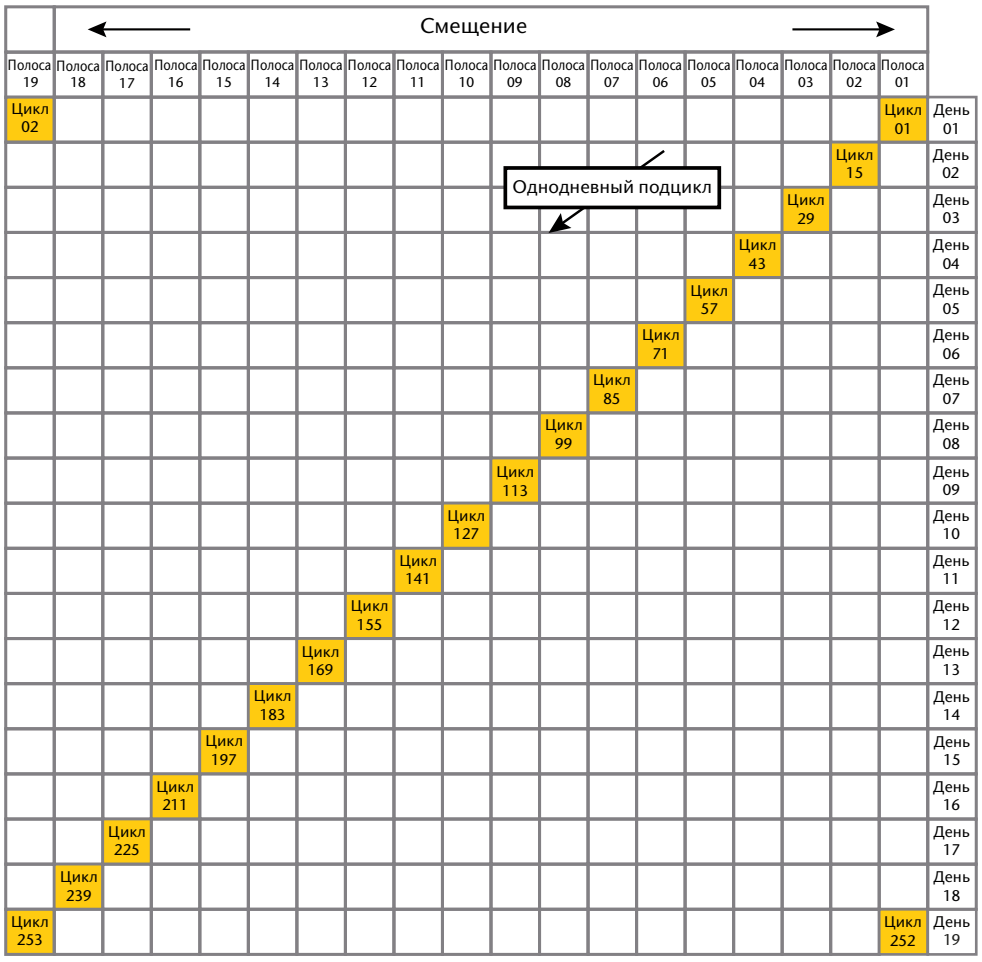


Рисунок 2.3. Схематическое представление эволюции орбитальной трассы спутника Landsat на протяжении периода повторения орбиты (N = 13 + 17/18, периодичность повторения: 18 дней, 251 витков/цикл)

наблюдают в предыдущий день. Ширина полосы покрытия может быть подобрана таким образом, чтобы соответствовать полосе захвата прибора для того, чтобы избежать каких-либо пропусков. Недостатком является то, что после первых нескольких ежедневных заходов в область над целевой территорией или близко к ней, следующая серия заходов состоится только после завершения периода повторения орбиты.

В текущей модификации спутника Landsat временная эволюция орбитальных трасс в течение периода повторения орбиты (16 дней) приводит к двум основным подциклам, показанным на рисунке 2.4. Двухдневный подцикл обеспечивает более короткий временной разрыв, а семидневный цикл обеспечивает более близкое географическое совпадение.

Несмотря на то, что концепция периодичности повторения орбит и подциклов вытекает из требований, предъявляемых к использованию приборов с узкой полосой захвата, включая те, которые ведут наблюдения только в надире, орбиты с подциклами могут быть также полезны для приборов с относительно широкой полосой захвата. Например, приборы зондирования могут иметь полосу захвата шириной до нескольких тысяч километров. (К примеру, усовершенствованный микроволновый прибор зондирования (AMSU) или интерферометр зондирования атмосферы в инфракрасном диапазоне (IASI) имеют полосы захвата более 2 200 км). Однако качество получаемой продукции выше, когда прибор ближе к надирной подтрассе. Поэтому существует интерес к обеспечению

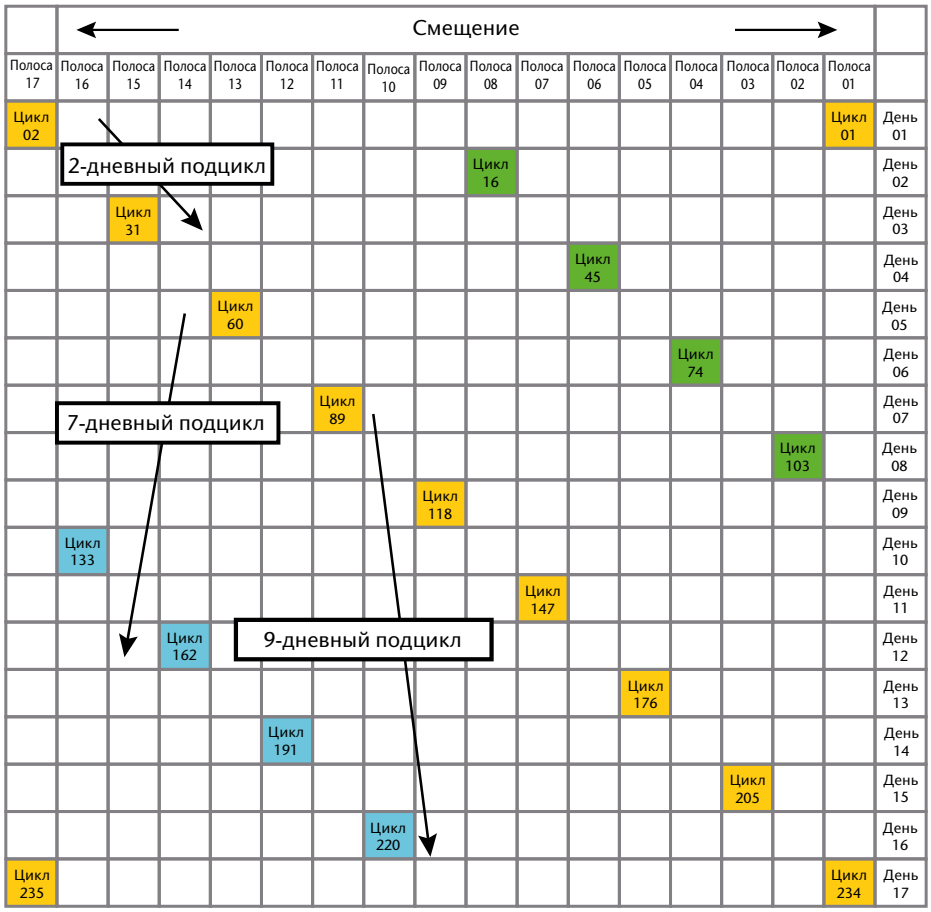


Рисунок 2.4. Схематическое представление эволюции орбитальной трассы находящегося в полете спутника Landsat на протяжении периода повторения орбиты (N = 14 + 9/16, периодичность повторения: 16 дней, 233 витков/цикл). Показаны три подцикла: 7 дней (на запад) — главный подцикл, обеспечивающий самые близкие наблюдения по пространству; 2 дня (на восток), обеспечивающий самые близкие наблюдения по времени; 9 дней (на восток), представляющий ограниченный интерес, получаемый сложением первых двух.

того, чтобы покрытие позволяло получать достаточно хорошее сочетание данных более высокого и более низкого качества. Орбиты спутников НУОА и метеорологических оперативных спутников (Metop) имеют пятидневный подцикл, как показано на рисунке 2.5 на примере Metop.

Периодичность повторения орбит и подциклы удобны по ряду причин, однако необходимо также отметить и несколько связанных с ними недостатков:

a) если полоса захвата прибора слишком узкая по отношению к смещению (сдвигу) и количеству витков по орбите в течение периода повторения цикла, некоторые области никогда не будут видны. Крайним примером является прибор, проводящий наблюдения только в надире, например альтиметр;

b) каждодневная последовательность наблюдений с орбиты с периодичностью повторения может вносить систематические ошибки в выборку во время наблюдений (ложная длина волны, соответствующая периодичности повторения цикла или подциклам);

c) обеспечение периодичности повторения цикла/подциклов требует затратных систем контроля спутниковых орбит.

Поэтому, если вся бортовая аппаратура имеет достаточно широкую полосу захвата, к периодичности повторения/подциклу обычно не прибегают.

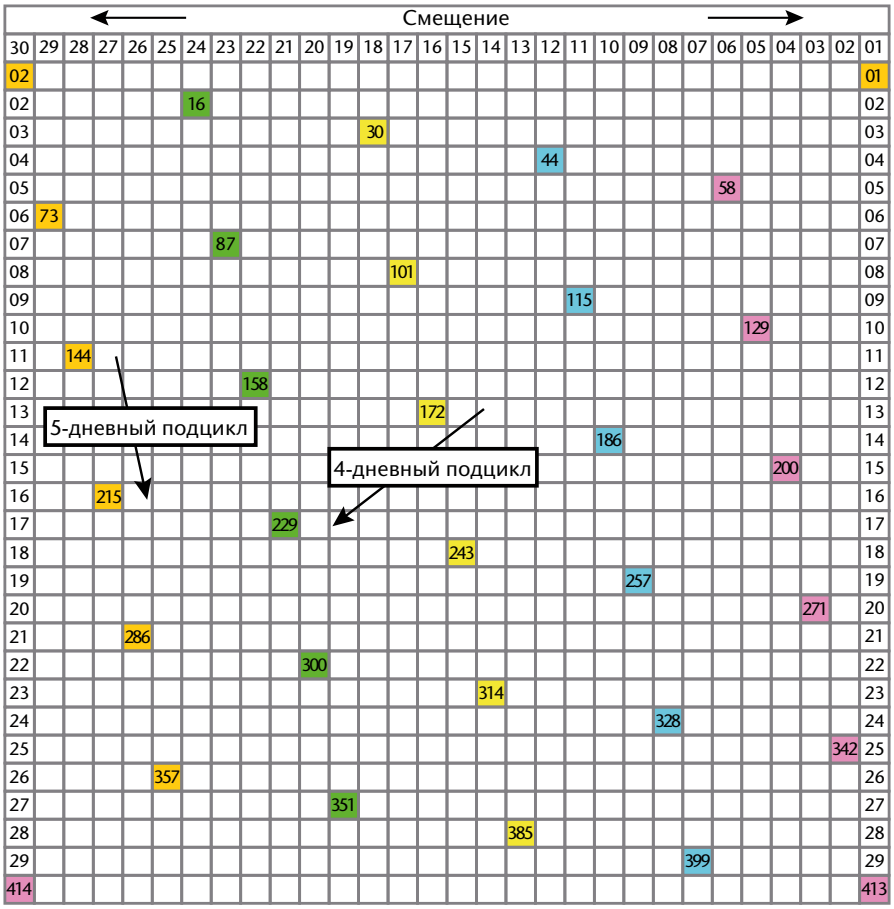


Рисунок 2.5. Схематическое представление эволюции орбитальной трассы спутника Metop (N = 14 + 9/16, периодичность повторения: 29 дней, 412 витков/цикл). Показаны два подцикла: 5 дней (на восток) — главный подцикл, обеспечивающий самые близкие наблюдения по пространству; 4 дня (на запад) для несколько более близких наблюдений по времени.

2.1.3 Орбитальная прецессия, солнечно-синхронные орбиты и дрейфующие орбиты

Орбитальная плоскость может лежать в экваториальной плоскости Земли или быть наклонена на ε градусов (см. рисунок 2.6).

При $\varepsilon = 90°$ спутник следует по меридианной линии, и орбита является полярной. Это удобно для наблюдения за поверхностью Земли от полюса к полюсу.

Гравитационное поле, действующее на спутник, перпендикулярно геопотенциальной поверхности на высоте спутника, которая является несколько эллипсоидной аналогично геоиду. При $\varepsilon \neq 90°$, действие этих сил является прецессией орбитальной плоскости вокруг полярной оси. Скорость прецессии α рассчитывается как:

$$\alpha = -10{,}02 \cos \varepsilon \left(1+\frac{H}{R}\right)^{-\frac{7}{2}} \quad \text{(градус/день)} \tag{2.4}$$

Для чисто полярной орбиты ($\varepsilon = 90°$) скорость прецессии равна нулю. Орбитальная плоскость имеет неизменную ориентацию по отношению к неподвижным звездам. Однако, поскольку Земля совершает вращение вокруг Солнца за один год, условия освещения поверхности, которую видит спутник, меняются каждый день на 360/365 градусов, то есть 59 мин. Область, наблюдаемая в дневное время в 12:00, в день t_0, будет наблюдаться на рассвете в день $t = t_0 + 3$ месяца (рисунок 2.7, слева). Для измерений в дневное время это будет означать различные условия наблюдения день за днем, причем условия наблюдений



Рисунок 2.6. Определение наклонной орбиты

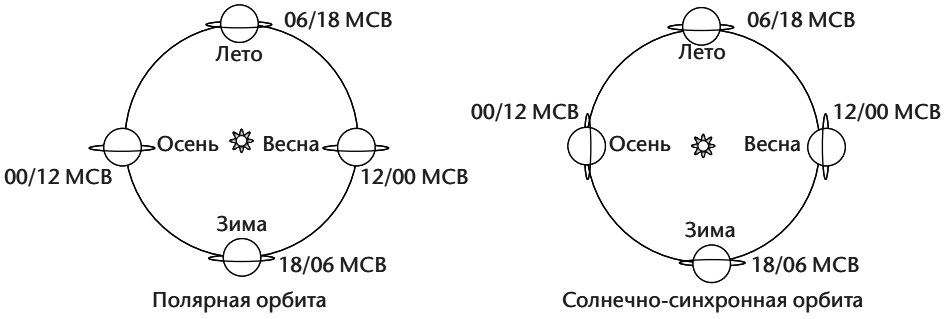


Рисунок 2.7. Слева: чисто полярная орбита с изменяющимся местным солнечным временем (МСВ) в течение года; справа: солнечно-синхронная орбита с неизменным МСВ в течение года

зависят от времени года. В частности, когда направление Земля-Солнце становится перпендикулярным орбитальной плоскости, освещенность на рассвете и в сумерки делает невозможными многие измерения.

Наклонение орбиты ε может быть задано таким образом, чтобы скорость прецессии точно соответствовала полному обороту Земли вокруг Солнца за год. Вводя величину α= 360/365 (градусов/день) в уравнение 2.4, получаем, что наклонение ε_0 должно удовлетворять условию:

$$\cos\varepsilon_0 = -0,0988\ (1+\frac{H}{R})^{\frac{7}{2}} \qquad (2.5)$$

Орбита, которая удовлетворяет этому условию, называется солнечно-синхронной. Отрицательный знак ε_0 указывает на то, что орбита движется в направлении, обратном вращению Земли. Местное солнечное время для территорий, над которыми пролетает спутник на данной широте, является постоянным на протяжении всего года (см. рисунок 2.7, справа). В таблице 2.4 перечислены значения ε_0 ряда солнечно-синхронных орбит в зависимости от высоты орбиты.

Таблица 2.4. Наклонение солнечно-синхронных орбит в зависимости от высоты орбиты

400 км	*600 км*	*800 км*	*1 000 км*	*1 200 км*	*1 400 км*
97,02°	*97,78°*	*98,60°*	*99,47°*	100,41°	101,42°

Необходимо отметить, что отклонение от полярной оси увеличивается с высотой орбиты. Это является причиной существующего недостатка высоких солнечно-синхронных орбит: полюса могут быть не видны, если у прибора недостаточно широкая полоса захвата. Вместе с тем, при относительно малых высотах орбит орбитальная плоскость является околополярной.

Важнейшая особенность солнечно-синхронной орбиты — это неизменное местное солнечное время, что возможно является неблагоприятным фактором для проведения некоторых видов измерений. Явления, изменяющиеся в течение суток (например, конвективные облака, осадки, радиационный баланс, уровень моря под влиянием астрономических приливов) имеют смещенную выборку при наблюдениях с солнечно-синхронного спутника, т. е. при постоянном местном солнечном времени.

В целом спутники для оперативной метеорологии, наблюдений за поверхностью суши и океанографии, за исключением альтиметрии геодезического назначения, используют солнечно-синхронную орбиту. Для научных целей, предусматривающих изучение процессов, зависящих от суточных колебаний и требующих несмещенной выборки, не солнечно-синхронные (дрейфующие) орбиты, возможно, являются более предпочтительными.

2.1.4 Эллиптические орбиты

Предыдущие разделы относятся к круговым орбитам, которые гораздо чаще используются для наблюдений за Землей, особенно солнечно-синхронные и геостационарные. Однако, как околополярные низкие околоземные орбиты (НОО), так и геостационарные орбиты (ГСО) имеют ряд ограничений.

Околополярный низкоорбитальный (НОО) спутник обеспечивает глобальный охват, но делает это нечасто. Даже если полоса захвата прибора не меньше смещения, что позволяет иметь перекрывающееся покрытие орбитами, следующими одна за другой, один спутник может обеспечить полное покрытие поверхности Земли в лучшем случае два раза в день (или даже один раз в день, если зондирование возможно проводить только в условиях дневного освещения или в ночное время). Если необходим более частый глобальный охват, то требуются дополнительные спутники в комплементарных орбитальных плоскостях (см. таблицу 2.5).

Таблица 2.5. Количество спутников на НОО, необходимое для достижения требуемого цикла наблюдений (предполагаемая высота: H = 800 км)

Полоса захвата прибора	*Возможность проведения наблюдений*	*Требуемый цикл наблюдений*						
		24 ч	*12 ч*	*8 ч*	*6 ч*	*3 ч*	*2 ч*	*1 ч*
2 800 км	Только днем	1 сп	2 сп	3 сп	4 сп	8 сп	12 сп	24 сп
	Ночью и днем	0,5 сп	1 сп	1,5 сп	2 сп	4 сп	6 сп	12 сп
1 400 км	Только днем	2 сп	4 сп	6 сп	8 сп	16 сп	24 сп	48 сп
	Ночью и днем	1 сп	2 сп	3 сп	4 сп	8 сп	12 сп	24 сп

Из таблицы 2.5 видно, что любой цикл наблюдения, составляющий приблизительно менее трех часов, будет чрезвычайно затруднительным, поскольку он потребует группировки НОО спутников на скоординированных орбитах.

Охват существенно улучшается для высоких широт (см. рисунок 2.2); так, например, он в два раза чаще на широте 60°, чем на экваторе. В полярных районах частота охвата становится близкой к орбитальному периоду T (т. е. ~100 мин) или будет менее часа при большем количестве спутников.

Более короткого периода наблюдения можно добиться, если оставить без внимания солнечную синхронность и принять более низкое наклонение, однако тогда охват уже не будет глобальным. Орбиты с низким наклонением используются для мониторинга внутритропических зон.

Орбита ГЕО позволяет проводить наблюдения со скоростью, которая ограничена только возможностями прибора. Однако потребуется группировка приблизительно из шести спутников вокруг экватора для того, чтобы покрыть все долготные сектора до широты как минимум 55°; самые высокие широты охватить не представляется возможным.

Некоторые из перечисленных ограничений могут быть сняты путем принятия эллиптической орбиты. При эллиптической орбите скорость спутника меняется вдоль орбиты; она является минимальной в районе апогея, что дает больше времени для выполнения измерений над пролетаемой территорией. Эллиптические орбиты обычно оптимизируются для конкретных целей, особенно для целей космической науки, таких как сбор данных измерений *in situ* до очень высоких высот при прохождении через ионосферу и плазмосферу.

Проблема эллиптических орбит заключается в том, что поскольку на аргумент перигея влияют вековые возмущения, апогей находится на широте, которая меняется со временем. Вековое возмущение может быть компенсировано, если орбитальное наклонение $\varepsilon = \sin^{-1}(4/5)^{1/2} \approx 63{,}4°$. В этом случае район апогея, где спутник проводит большую часть времени, является неизменным. В этом положении измерения могут проводиться более часто в квазигеостационарном режиме.

Высокоэллиптическая орбита (ВЭО), эллиптическая орбита с высоким эксцентриситетом, использовалась для телекоммуникационных спутников, и рассматривается возможность ее использования для наблюдений за Землей: спутники Молния (рисунок 2.8), который имеет период 12 ч и апогей на 39 800 км, и Тундра, который имеет период 24 ч и апогей на высоте 48 300 км. На орбите спутник Молния является почти геостационарным в течение почти 8 ч из 12-часового периода, а на орбите спутник Тундра — около 16 ч из 24-часового периода.

Орбиты спутников Молния и Тундра обслуживают только одну полусферу в квазигеостационарном режиме. Кроме того, зона 8-часового или 12-часового квазистационарного наблюдения центрирована на конкретное местное солнечное время. Если требуется охват всех широт выше 60° в течение 24 ч в сутки, то необходимо иметь три спутника Молния или два спутника Тундра. Интересным вариантом орбиты является

орбита с тремя апогеями и 16-часовым периодом и апогеем на 43 500 км. В таблице 2.6 представлены основные характеристики орбит спутников Молния и Тундра. В положении апогея, которое подходит для частой выборки, высота спутника превышает высоту ГЕО.

2.1.5 Пусковые установки и вывод на орбиту

Спутники выводятся на орбиту при помощи пусковой установки. Пусковая установка должна выполнять следующие функции:

a) обеспечивать содержание спутника в обтекателе, где должны быть обеспечены жизненно важные функции спутника. При нахождении в обтекателе спутник хранится в компактной геометрии для минимизации занимаемого объема и защиты от эффектов ускорения;

b) выводить спутник на орбиту. Для того чтобы минимизировать общую массу, доставляемую на большие высоты, пусковая установка обычно имеет ступенчатую структуру. Первая ступень, которая является самой тяжелой, должна обеспечить максимальную тягу для отрыва от пусковой установки и отделяется в первую очередь. Обтекатель сбрасывается на соответствующей высоте. Другие ступени (одна или две) воспламеняются и последовательно отделяются;

Таблица 2.6. Основные характеристики орбит спутников Молния и Тундра (высоты апогея и перигея могут быть слегка скорректированы по мере необходимости)

Тип орбиты	*Наклонение*	*Период*	*Апогей*	*Перигей*	*Покрытие (от одного спутника)*	*Спутники полусферного охвата*
Молния	63,4°	12 ч	~39 800 км	~1 000 км	Виден над 2 точками в течение ~8 ч	3
Тундра	63,4°	24 ч	~48 300 км	~24 000 км	Виден над 1 точкой в течение ~16 ч	2



Рисунок 2.8. Орбита спутника Молния

c) отпускать спутник. Для спутников на круговых орбитах НОО пусковая установка выпускает спутник непосредственно на окончательную орбиту. Для эллиптических орбит пусковая установка отпускает спутник в перигее и придает ему последнее ускорение для получения энергии, соответствующей целевой орбите.

После выхода на орбиту спутник разворачивает солнечные батареи и начинает работу в автономном режиме. Одним из этапов полета является достижение окончательной орбиты путем запуска силовой установки. При нахождении на геостационарной орбите спутник в перигее на высоте 35 786 км переходит на эллиптическую орбиту, благодаря наличию двигателя, включаемого в апогее. Двигатель использует твердое, гибридное или чаще всего жидкое топливо (жидкостный двигатель апогея), которое сжигается во время нахождения в апогее для придания ускорения, необходимого для формирования круговой орбиты (см. рисунок 2.9).

Запуск спутника — это сложное и затратное дело. Для того чтобы оптимизировать экономическую эффективность, во многих случаях производят запуск сразу нескольких спутников. Тогда задача последней стадии заключается в том, чтобы выпустить разные спутники в различное время для разделения орбит друг от друга. Соответствующие силовые установки платформы в дальнейшем обеспечивают переход на окончательные орбиты.

Запуск малых спутников и приборов по программе CubeSats, образующих структуры группировок, представляют собой хороший образец группового запуска. Одним из примеров эффективной стратегии запуска спутников является так называемая группировка Walker Delta Pattern. Наклонение орбиты ε всех спутников должно быть одинаковым. Пусковая установка выпускает спутники на различных высотах, либо силовые установки спутников разносят их на разные высоты. Тогда каждая орбита будет иметь различную скорость прецессии согласно уравнению 2.4 и орбитальные фазы будут отличаться друг от друга со временем. Когда орбиты всех спутников будут должным образом разнесены, силовые установки платформы обеспечат доставку каждого из них на требуемую высоту H. Из уравнения 2.4 видно, что на практике стратегия хорошо работает для малых наклонений и относительно низких высот, в других же случаях время, необходимое для развертывания группировки, становится слишком большим. Например, для того, чтобы развернуть группировку спутников системы наблюдений в области метеорологии, исследований ионосферы и климата (COSMIC) (6 спутников, H = 800 км, ε = 71°), потребовался один год.



Рисунок 2.9. Достижение ГЕО

2.2 ПРИНЦИПЫ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ

Наблюдения за Землей из космоса в основном проводятся с использованием электромагнитного излучения. Исключение составляют измерения *in situ* на уровне платформы (гравитационного поля, магнитного поля, электрического поля и плотности заряженных частиц в солнечном ветре). В настоящем разделе обсуждается дистанционное зондирование Земли и уделяется особое внимание следующим вопросам:

a) электромагнитный спектр и диапазоны, используемые для дистанционного зондирования;

b) основные закономерности взаимодействия электромагнитного излучения и вещества;

c) наблюдения в окнах прозрачности атмосферы;

d) наблюдения в полосах поглощения;

e) лимбовое зондирование и радиозатменные измерения;

f) активное зондирование.

2.2.1 Электромагнитный спектр и диапазоны, используемые для дистанционного зондирования

Спектр электромагнитного излучения, наблюдаемый из космоса (спутниковые наблюдения в надире), представлен на рисунке 2.10. Представленный здесь диапазон от 0,2 мкм до 3 см (или 10 ГГц) включает все длины волн, которые используются для дистанционного зондирования из космоса. Изменения с длиной волны объясняются влиянием атмосферы с пропускной способностью от 1 (атмосферное окно прозрачности) до 0 (полная непрозрачность вследствие атмосферного поглощения).

В таблице 2.7 представлены области спектра, которые общеприняты, хотя и не стандартизированы. Помимо широко используемого параметра длины волны λ и частоты ν, приводится также волновое число ν^*, которое, главным образом, используется в спектроскопии.

В таблице 2.8 приводится дальнейшая подразбивка микроволнового диапазона и соседнего ДИК-диапазона, используемых в радиолокации и пассивной радиометрии.

Полный спектр, представленный на рисунке 2.10, состоит из различных областей с достаточно различными характеристиками.

В УФ-области спектра атмосферное поглощение будет сильным, главным образом, благодаря основным компонентам воздуха (азоту (N_2) и кислороду (O_2)) и малым газовым

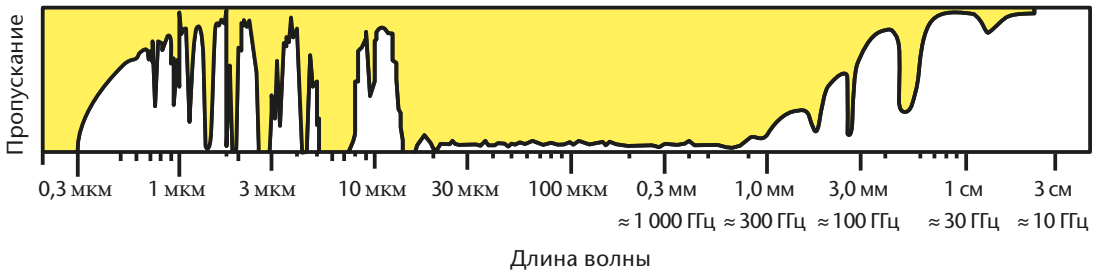


Рисунок 2.10. Спектр (коэффициент пропускания) электромагнитного излучения, наблюдаемый из космоса в надире; диапазон: от 0,2 мкм до 3 см

Таблица 2.7. Полосы электромагнитного спектра, используемые для дистанционного зондирования

	Разбивка спектра	*Длина волны* λ	*Волновое число* $\nu^* = 1/\lambda$	*Частота* $\nu = c/\lambda$
УФ	Ультрафиолетовый диапазон	0,01–0,38 мкм	26 320–1 000 000 $см^{-1}$	
B	Голубой	0,436 мкм	22 935 $см^{-1}$	
G	Зеленый	0,546 мкм	18 315 $см^{-1}$	
R	Красный	0,700 мкм	14 285 $см^{-1}$	
ВИД	Видимый	0,38–0,78 мкм	12 820–26 320 $см^{-1}$	
БИК	Ближний инфракрасный	0,78–1,30 мкм	7 690–12 820 $см^{-1}$	
ВБИК	Видимый и ближний инфракрасный (ВИД + БИК)	0,38–1,3 мкм	7 690–26 320 $см^{-1}$	
КВИК	Коротковолновый инфракрасный	1,3–3,0 мкм	3 330–7 690 $см^{-1}$	
КВ	Коротковолновый	0,2–4,0 мкм	2 500–50 000 $см^{-1}$	
ДВ	Длинноволновый	4–100 мкм	100–2 500 $см^{-1}$	
СВИК	Средневолновый инфракрасный	3,0–6,0 мкм	1 665–3 330 $см^{-1}$	
ТИК	Тепловой инфракрасный	6,0–15,0 мкм	665–1 665 $см^{-1}$	
ИК	Инфракрасный (СВИК + ТИК)	3–15 мкм	665–3 330 $см^{-1}$	
ДИК	Дальний инфракрасный	15 мкм –1 мм	10–665 $см^{-1}$	300–20 000 ГГц
Суб-мм	Субмиллиметровые волны (часть ДИК)	0,1–1 мм	10–100 $см^{-1}$	300–3 000 ГГц
мм	Миллиметровые волны (часть МКВ)	1–10 мм	1–10 $см^{-1}$	30–300 ГГц
МКВ	Микроволновый	0,1–30 см	0,033–10 $см^{-1}$	1–300 ГГц

Таблица 2.8. Полосы, используемые в радиолокации (согласно Американскому обществу фотограмметрии и дистанционного зондирования)

Полоса	*Диапазон частот*	*Диапазон длин волн*
P	220–390 МГц	77–136 см
UHF	300–1 000 МГц	30–100 см
L	1–2 ГГц	15–30 см
S	2–4 ГГц	7,5–15 см
C	4–8 ГГц	3,75–7,5 см
X	8–12,5 ГГц	2,4–3,75 см
K_u	12,5–18 ГГц	1,67–2,4 см
K	18–26,5 ГГц	1,1–1,67 см
K_a	26,5–40 ГГц	0,75–1,18 см
V	40–75 ГГц	4,0–7,5 мм
W	75–110 ГГц	2,75–4,0 мм

составляющим (из которых наиболее важным является озон (O_3)). В этой спектральной области поверхность Земли наблюдать невозможно. Источником излучения для дистанционного зондирования является отраженная солнечная радиация.

В ВИД-, БИК- и КВИК-областях спектра от 0,4 до 3 мкм, в некоторых случаях до 4 мкм, зондирование может осуществляться по отраженной солнечной радиации. В этих областях спектра существует несколько прозрачных областей (окон прозрачности) и большое количество полос поглощения (см. рисунок 2.11).

В СВИК и ТИК-областях спектра от 4 до 15 мкм источником излучения является тепловая эмиссия с поверхности Земли и из атмосферы, что главным образом обусловлено поглощением/эмиссией водяного пара и двуокиси углерода, которые вносят существенный вклад в парниковый эффект. В сочетании с основным окном прозрачности атмосферы это позволяет сохранять тепловое равновесие планеты на приемлемом уровне (см. рисунок 2.12).

Следующая спектральная область, дальний ИК-диапазон от 15 мкм до 1 мм (или 300 ГГц), является полностью непрозрачной из-за континуума водяного пара. В этой области, которую трудно исследовать из-за отсутствия эффективных методов обнаружения, имеются линии поглощения нескольких важных компонентов атмосферы, таких как гидроксил радикал (OH), известный как «очиститель» атмосферы, и хлористый водород (HCl) — буферный компонент, из которого высвобождается хлор, разрушающий озон. Гидроксил радикал и хлористый водород можно наблюдать только в ДИК-диапазоне (например, около 120 мкм ≈ 2 500 ГГц и 480 мкм ≈ 625 ГГц соответственно).

В микроволновом диапазоне от 1 до 300 ГГц источником излучения является тепловое излучение с поверхности Земли и атмосферы. На рисунке 2.13 представлен атмосферный спектр, начиная с 2 ГГц до субмиллиметровых частот 1 000 ГГц.

В той части микроволнового диапазона, в которой атмосфера является более прозрачной, т.е. на частотах ниже 100 ГГц, длины волн превышают 3 мм и, следовательно, они гораздо больше размера облачных капель, за исключением облаков, дающих осадки. Поэтому микроволновый диапазон используется для наблюдения за поверхностью Земли или определения свойств атмосферы почти во всех погодных условиях.

Активное зондирование зависит от используемой технологии, а в случае микроволнового диапазона от регламента, регулирующего использование радиочастотного спектра.

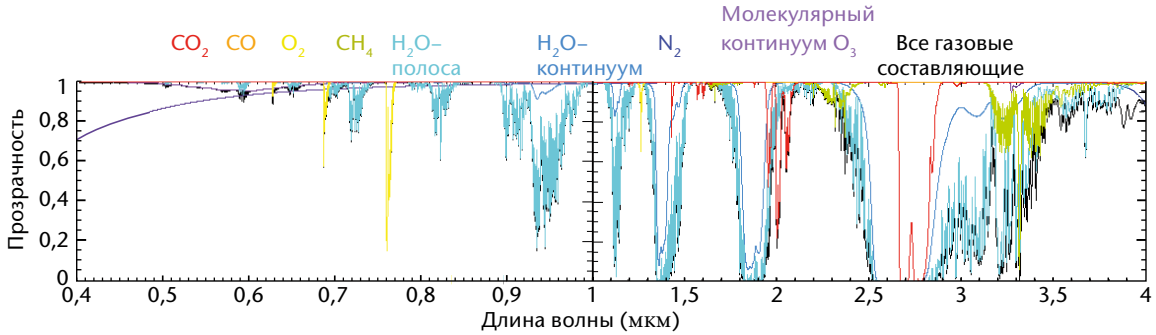


Рисунок 2.11. Атмосферный спектр в диапазоне от 0,4 до 4,0 мкм. В нем имеется несколько окон, а также полос поглощения окиси углерода (CO, около 2,3 мкм), двуокиси углерода (CO_2, около 1,6, 2,1 и 2,8 мкм), метана (CH_4, около 2,3 и 3,4 мкм), несколько полос кислорода (главным образом около 0,77 мкм), несколько полос азота (N_2) и озона (O_3) и много значимых полос водяного пара (главным образом 0,94; 1,13; 1,37; 1,8 и 2,7 мкм) Здесь также представлен молекулярный континуум, который препятствует использованию УФ для дистанционного зондирования поверхности земли и нижней атмосферы из космоса.

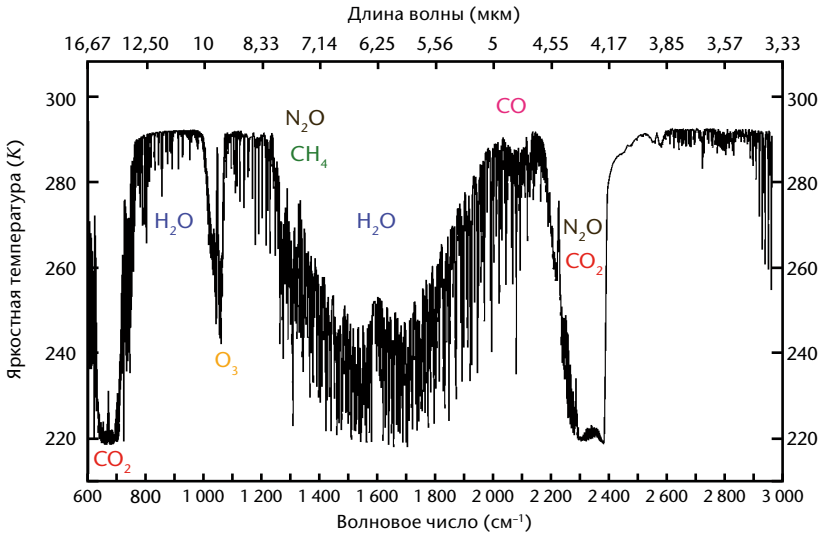


Рисунок 2.12. Атмосферный спектр в диапазоне от 3,33 до 16,67 мкм. Основные окна прозрачности атмосферы находятся в диапазонах от 3,7 до 4,0 и от 10 до 12 мкм. Имеются большие полосы поглощения водяного пара (H_2O) и двуокиси углерода (CO_2). Другие компоненты атмосферы: озон (O_3, около 9,7 мкм), метан (CH_4, около 7,7 мкм), моноксид углерода (CO, около 4,6 мкм) и закись азота (N_2O, около 4,5 и 7,7 мкм).

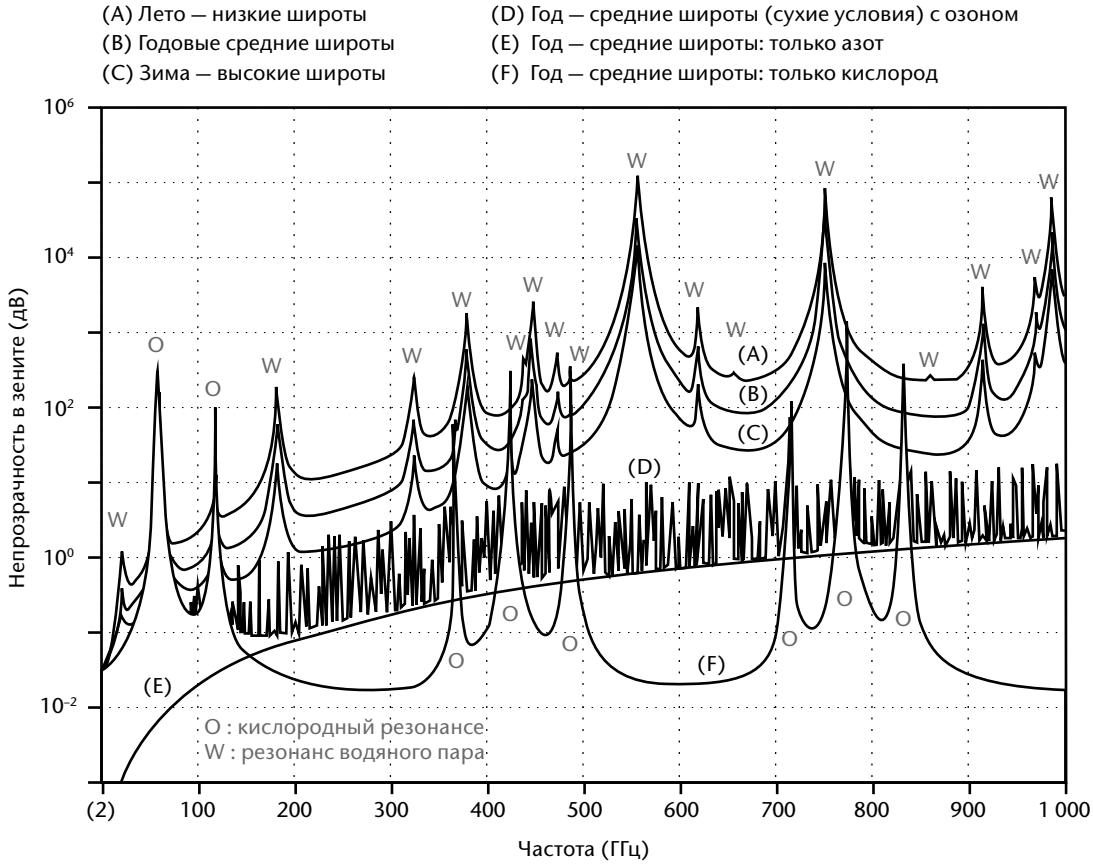


Рисунок 2.13. Атмосферный спектр в диапазоне от 2 до 1 000 ГГц. Здесь преобладает континуум водяного пара, который становится все более непрозрачным с увеличением частоты в ДИК-диапазоне. Это не позволяет вести наблюдения поверхности Земли на больших частотах из космоса. Вторгающиеся линии озона также превалируют в спектре. Наиболее полезными являются полосы кислорода (около 57, 118, 388, 424, 487 ГГц и выше), которые используются для определения температуры атмосферы, и полосы водяного пара (около 22, 183, 325, 380, 448 ГГц и выше).

Источник: Klein and Gasiewski (2000).

Радиолокатор использует микроволновый диапазон, в то время как лидар — оптические длины волн, где имеются соответствующие источники (кристаллы). В таблице 2.9 перечислены некоторые из широко используемых частот и длины волн лидаров. В порядке сравнения в таблице также приводятся частоты, используемые Глобальной навигационной спутниковой системой (ГНСС), и соответствующие средства радиозатменного зондирования атмосферы (см. 3.2.7, глава 3 настоящего тома).

2.2.2 Основные законы взаимодействия электромагнитного излучения и вещества

Макроскопические свойства плотного тела, на которые не влияют химические или ядерные реакции, в отношении электромагнитного излучения при термодинамическом равновесии, выражаются тремя коэффициентами, связанными следующим уравнением:

$$\rho(\lambda,T,\zeta,\varphi)+\tau(\lambda,T,\zeta,\varphi)+\varepsilon(\lambda,T,\zeta,\varphi)=1 \qquad (2.6)$$

В этом уравнении $\rho(\lambda,T,\zeta,\varphi)$ — отражательная способность, т. е. отношение рассеянного обратного излучения $I(\lambda,T,\zeta,\varphi)$ к падающему излучению $I(\lambda)$; $\tau(\lambda,T,\zeta,\varphi)$ — пропускная способность, т. е. доля $I(\lambda)$, которая проходит через тело; $\varepsilon(\lambda,T,\zeta,\varphi)$ — доля $I(\lambda)$, которая поглощается телом, называется излучательной способностью в силу причин, которые будут объяснены ниже. Эти три коэффициента зависят от длины волны излучения λ, температуры тела T и геометрии наблюдения ζ, φ (зенитного и азимутального углов соответственно).

Таблица 2.9. Использование спектра в активных приборах (радиолокаторы и лидары) и для радиозатменного зондирования

	Наблюдения	*Аппаратура*	*Частота или длина волны*
Радиолокатор	Приво́дный ветер	Скаттерометр	C-диапазон (~5,3 ГГц) или K_u-диапазон (~13,4 ГГц)
	Топография океана	Альтиметр	C-диапазон (~5,3 ГГц) + K_u-диапазон (~13,6 ГГц)
	Облака и осадки	Радиолокатор осадков, радиолокатор обнаружения облачности	K_u-диапазон (~13,6 ГГц) и/или K_a-диапазон (~35,5 ГГц) или W-диапазон (~94 ГГц)
	Изображения	Радиолокатор с синтезированной апертурой	L-диапазон (~1,3 ГГц) или C-диапазон (~5,4 ГГц) или X-диапазон (~9,6 ГГц)
Лидар	Ветер в безоблачной атмосфере	Доплеровский лидар	УФ-лидар (355 нм)
	Аэрозоль, верхняя граница облаков	Лидар обратного рассеяния	УФ-лидар (355 нм), ВБИК-лидар (532 + 1 064 нм)
	Топография ледяного щита	Альтиметр	ВБИК-лидар (532 + 1 064 нм)
Радиозатменное зондирование	Атмосферная рефракция	ГНСС + приемник на НОО	L-диапазон: ~1 580 + ~1 250 + ~1 180 ГГц (Глобальная система определения местоположения (ГСОМ), Глобальная навигационная спутниковая система (ГЛОНАСС) и Galileo)

Тело, которое не отражает и является полностью непрозрачным для излучения на любой длине волны (где $\rho = \tau = 0$, и следовательно $\varepsilon = 1$), называется черным телом. Оно излучает при любой температуре T и во всем диапазоне λ или ν согласно закону Планка:

$$B(\lambda,T) = \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5}\frac{1}{e^{\frac{hc}{\lambda kT}}-1} \quad \text{или} \quad B(\nu,T) = \frac{2\pi\nu^3}{c^2}\frac{h}{e^{\frac{h\nu}{kT}}-1} \tag{2.7}$$

где:
$h = 6{,}6256 \cdot 10^{-34}$ Дж·с (постоянная Планка);
$c = 2{,}99793 \cdot 10^{8}$ м·с$^{-1}$ (скорость света в вакууме);
$k = 1{,}38044 \cdot 10^{-23}$ Дж·К$^{-1}$ (постоянная Больцмана).

$B(\lambda,T)$ (или $B(\nu,T)$) — энергия излучения с единичной поверхности по полусфере на единицу длины волны (или частота). Мощность излучения на единицу телесного угла составляет B/π. Функция Планка для температур 6 000 К и 273,16 К, которые являются характерными для поверхностей Солнца и Земли соответственно, представлена на рисунке 2.14.

Энергия, излучаемая в полном спектре, записывается как:

$$W(T) = \int_0^\infty B(\lambda,T)\cdot d\lambda = \sigma \cdot T^4 \quad \text{Закон Стефана-Больцмана} \tag{2.8}$$

где $\sigma = 5{,}6681 \cdot 10^{-8}$ Вт·м$^{-2}$·К$^{-4}$.

Две кривые на рисунке 2.14 показывают, что поверхности Солнца и Земли имеют очень разную энергию излучения. Однако после корректировки кривой Солнца на квадрат расстояния между Солнцем и Землей две интегральные площади становятся сопоставимыми, что отражает радиационный баланс Земли. Если масштабировать верхнюю кривую на рисунке, то можно легко увидеть, что энергия (плотность радиационного потока) солнечной радиации на Земле очень мала для $\lambda > 4$ мкм.

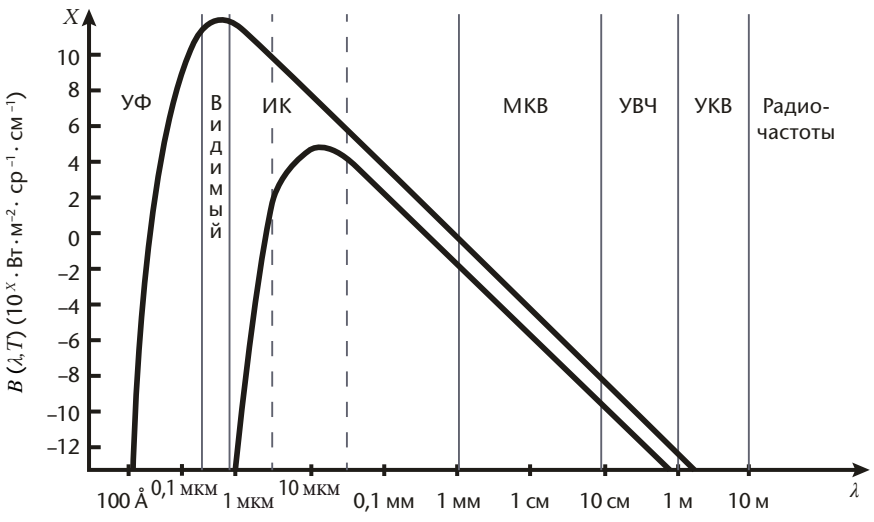


Рисунок 2.14. Функция Планка для T = 6 000 К (Солнце) и T = 273,16 К (Земля) представлена в верхней кривой и нижней кривой соответственно. X — значения по оси ординат являются степенью 10.

Основное различие между двумя кривыми, представленными на рисунке 2.14, после масштабирования заключается в длине волны λ_{max}, где наблюдается максимум излучения. Ее можно представить в виде формулы:

$$\lambda_{\max} = \frac{b}{T} \quad \text{при} \quad b = 0{,}0028981 < \text{K} \quad \text{Закон Вина} \tag{2.9}$$

Из-за логарифмического масштаба по обеим осям из рисунка 2.14 трудно оценить, насколько крутой является функция Планка в окрестностях λ_{max}. В случае солнечной радиации (T = 6 000 K) максимум излучения находится в районе λ_{max} = 0,5 мкм, и большая часть энергии лежит в диапазоне 0,2–3,0 мкм. В случае земной радиации (T = 273,16 K, т.е. T = 0°C) максимум находится в районе λ_{max} = 10 мкм и большая часть энергии лежит в диапазоне 3—50 мкм.

Другой интересной особенностью функции Планка является то, что, перемещаясь от λ_{max} к более коротким длинам волн, энергия излучения резко уменьшается, в то время как в сторону более длинных волн уменьшение происходит более постепенно (примерно 2/3 энергии приходится на длины волн больше λ_{max}). Для очень длинных длин волн или коротких частот, например, в микроволновом диапазоне, где экспоненциальный аргумент в функции Планка $h\nu/kT << 1$, условием является $e^{h\nu/kT} \approx 1 + h\nu/kT$, и таким образом функция Планка сводится к виду:

$$B(\nu, T) = \frac{2\pi\ k\ \nu^2}{c^2}\ T \quad \text{Закон Рэлея-Джинса} \tag{2.10}$$

В силу этого соотношения измерения излучения в МКВ-диапазоне можно считать измерениями температуры и записывать через яркостную температуру (T_B) в единицах температуры. Если общая энергия излучения изменяется с температурой пропорционально T^4 по закону Стефана-Больцмана (уравнение 2.8), то в микроволновой части спектра она меняется линейно. Напротив, в сторону более коротких длин волн наблюдается растущая зависимость функции Планка от температуры. Приземная радиация изменяется приблизительно как T^5 в главном окне прозрачности ТИК-диапазона около 11 мкм и как T^{12} в окне около 3,7 мкм. Это интересная особенность для дистанционного зондирования, поскольку она означает, что чувствительность к высоким температурам выше на 3,7 мкм. С другой стороны, такие короткие длины волн менее чувствительны к низким температурам.

Например:

a) для тела при 220 K (например, верхняя граница облаков в верхней тропосфере) излучение на 11 мкм в ~1200 раз больше, чем на 3,7 мкм, однако при 300 K (на поверхности) оно больше примерно всего лишь в 130 раз;

b) чувствительность к температуре изменяется, (т. е. $(\partial B/\partial T)/B$) в три раза выше на 3,7 мкм, чем на 11 мкм.

Следовательно, длина волны 3,7 мкм хорошо подходит для наблюдений подстилающей поверхности, оптимальна для обнаружения пожара и менее пригодна для высоких облаков.

Зависимости, представленные уравнениями 2.7–2.10, справедливы только для черного тела (ε = 1). Для обычного тела зависимость можно установить на основе следующего концептуального эксперимента. Рассматривая ряд тел в изолированной системе и только обмен излучением между ними, можно допустить, что после переходного периода каждое из них достигнет термодинамического равновесия, при котором излучение, которое оно поглощает в соответствии с коэффициентом поглощения $\varepsilon(\lambda,T)$, равно энергии, которую оно излучает $P(\lambda,T)$. Отсюда $P(\lambda,T)/\varepsilon(\lambda,T)$ = константа. В предположении, что одно из тел является абсолютно черным телом, получаем:

$$P(\lambda, T) = \varepsilon(\lambda, T) \cdot B(\lambda, T) \quad \text{Закон Кирхгофа} \tag{2.11}$$

Это уравнение говорит о том, что коэффициент поглощения, введенный в уравнение (2.6), также определяет свойства излучения, и поэтому называется излучательной способностью. Из уравнения 2.11 вытекают два важных следствия:

a) на любой длине волны и при любой температуре, тело не может излучать энергии больше, чем черное тело на данной длине волны и при данной температуре;

b) тело может излучать энергию только на тех длинах волн, на которых оно может поглощать.

Излучательная способность ε зависит от длины волны и в меньшей степени от температуры. Для некоторых тел ε может быть постоянной для многих частей спектра. Если она постоянна по всему спектру, то тело называют серым. Форма кривой энергии излучения $P(\lambda,T)$ тогда будет точно такой же как $B(\lambda,T)$, только ослабленной за счет коэффициента ε. В таком случае закон Вина (уравнение 2.9) остается неизменным. А закон Стефана-Больцмана принимает вид $W(T) = \varepsilon \cdot \sigma \cdot T^4$.

Закон Кирхгофа применим и к газообразным средам. Поэтому спектральные линии атмосферных газов обычно (но не всегда) относятся как к поглощению, так и к излучению.

2.2.3 Наблюдения в окнах прозрачности атмосферы

2.2.3.1 *Уходящее излучение*

Атмосферные окна прозрачности — это спектральные области, в которых атмосфера практически прозрачна. Не существует такой области, в которой атмосфера полностью прозрачна. Во всех спектральных областях имеется некоторое остаточное возмущение, вызванное компонентами, имеющими континуум; чаще всего это водяной пар в ИК-, МКВ- и в некоторой степени в КВ-диапазонах. Другим фактором, в частности, в коротковолновом диапазоне, является рассеяние на молекулах сухого воздуха (в основном N_2 и O_2) и аэрозолях. Прежде всего, наиболее прозрачными окнами являются:

a) в КВ-диапазоне (рисунок 2.11): 0,5—0,9 мкм, 1,6—1,7 мкм и 2,0—2,3 мкм;

b) в ИК-диапазоне (рисунок 2.12): 3,5—4,0 мкм и 10—12 мкм;

c) в МКВ-диапазоне (рисунок 2.13): 80—100 ГГц, 25—50 ГГц и ниже 20 ГГц.

Из уравнения 2.6 следует, что коэффициенты ρ (отражательная способность), τ (пропускная способность) и ε (излучательная способность) зависят не только от длины волны излучения λ и температуры тела T, но также и от условий геометрии (зенитный угол ζ и азимутальный угол φ) спутниковой платформы относительно рассматриваемого тела.

Для упрощения рассмотрения предполагаются следующие условия: вертикальный сектор обзора со спутника (рисунок 2.15), плоские поверхности и излучение в направлении зенита (свечение).

Один член $\tau(\lambda,T) \cdot I_\tau(\lambda)$ представляет собой излучение, прошедшее через тело. Оно может быть обнаружено в случаях, когда тело не является полностью непрозрачным и источник излучения ниже тела находится в противоположной полусфере по отношению к спутнику.

Член $\varepsilon(\lambda,T) \cdot B(\lambda,T)$ — испускаемое излучение, выраженное через закон Кирхгофа (уравнение 2.11). Оно всегда присутствует, если тело не находится при абсолютном тепловом нуле. Его не будет в спектральных областях, где тело не поглощает.

Член $\rho(\lambda,T) \cdot I_\rho(\lambda,\theta)$ является отраженным излучением. Оно обнаруживается, когда источник излучения находится в той же полусфере, что и спутник. На рисунке 2.15 показано Солнце. Однако в микроволновом диапазоне, где солнечная радиация практически равна нулю, весь небесный свод полусферы испускает излучение как

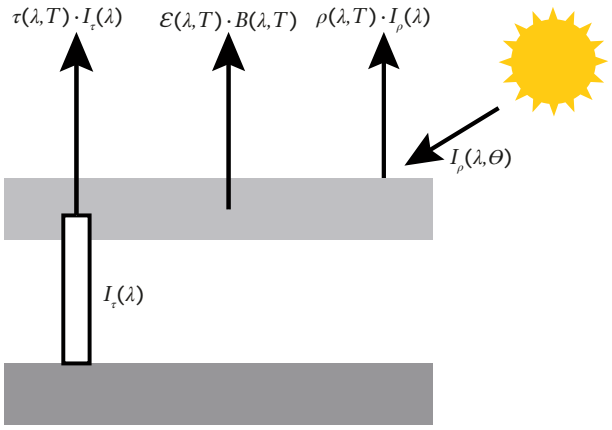


Рисунок 2.15. Три компонента излучения в космос

черное тело при температуре T = 2,725 K, где максимальная энергия наблюдается на λ_{max} = 1,9 мм (160 ГГц). Обозначение $I_\rho(\lambda,\theta)$ указывает на то, что энергия приходящей радиации зависит от угла падения θ. Обычно для Солнца $I_\rho(\lambda,\theta) = S(\lambda) \cdot \cos\zeta$, где $S(\lambda)$ служит обозначением приходящей энергии, когда Солнце в зените.

С учетом всех компонентов радиация, достигающая бортовой аппаратуры спутника, может быть выражена в виде:

$$I(\lambda,T) = \tau(\lambda,T)\cdot I_\tau(\lambda) + \varepsilon(\lambda,T)\cdot B(\lambda,T) + \rho(\lambda,T)\cdot I_\rho(\lambda,\theta) \qquad (2.12)$$

Эта величина сильно колеблется по спектру, так что значимость измерений является разумно устойчивой только в узких полосах пропускания в окрестностях определённых длин волн (каналов). Однако некоторая более общая информация заключена и в более широком диапазоне длин волн (ВИД + БИК + КВИК; СВИК + ТИК; МКВ).

2.2.3.2 *Измерения в видимом, ближнем инфракрасном и коротковолновом инфракрасном диапазонах*

В этом диапазоне не существует теплового излучения Земли (B = 0). Фокусируясь сначала на поверхности Земли (суше и океане), прошедшее излучение будет равно нулю, поскольку ниже уровня поверхности Земли источника не существует. Учитывая также, что отражательная способность почти не зависит от температуры тела, уравнение 2.12 может быть записано в виде:

$$I_{sw}(\lambda) = \rho(\lambda)\cdot S(\lambda)\cdot\cos\zeta \qquad (2.13)$$

Поскольку солнечный спектр и геометрия наблюдения известны, информация, полученная в результате измерения в КВ-канале, однозначно связана с отражательной способностью поверхности. Многие геофизические переменные (параметры растительного покрова, цветность океана, текстура суши и т. д.) могут быть оценены путем измерения отражательной способности на нескольких длинах волн. Однако, облака являются наиболее очевидными объектами, наблюдаемыми в КВ-диапазоне. Уравнение 2.13 в строгом смысле слова не является корректным для поверхности облачности, поскольку излучение с подстилающей поверхности может проходить сквозь облака. Однако этот эффект имеет ограниченное воздействие, если имеется:

a) общая пропускная способность (нисходящая и восходящая) через атмосферу;

b) низкая облачность;

c) исходный источник излучения (Солнце) сильнее, чем любая поверхность ниже облачности;

d) отражательная способность подстилающей поверхности является низкой (за исключением песчаной пустыни, снега и льда);

e) отражательная способность облаков ρ обычно выше, чем у любой другой земной поверхности.

Отсюда вытекает, что уравнение 2.13 является хорошим приближением, которое применимо к большинству облаков. Существуют некоторые исключения, такие как оптически тонкие облака (в частности, тонкие перистые).

Использование отраженного излучения КВ-диапазона для количественных оценок является непростой задачей, поскольку отражательная способность в общем является анизотропичной. Самый простой случай — когда тело, каким бы ни было направление приходящей радиации, перераспределяет отраженную радиацию согласно закону косинусов от зенита равномерно для любого азимута. Это называется ламбертовым отражением. Однако, во многих случаях, тело обладает свойствами изотропного отражения, которые необходимо измерять априори путем наблюдений при различных направлениях визирования и приходящей радиации. Окончательные вычисления излучения в направлении космоса требуют интегрирования по полусфере.

Использование КВ-диапазона для наблюдений за Землей в атмосферных окнах требует спектральной дискретизации на нескольких длинах волн (каналах), поскольку на любой одной длине волны сигнатуру могут иметь сразу несколько тел, а одно тело может иметь сигнатуру на нескольких длинах волн. Поэтому необходимы многоканальные устройства для распознавания и одновременного определения свойств различных тел. Например, облака и снег имеют одинаковую отражательную способность в видимом диапазоне на 0,65 мкм, но очень разную отражательную способность на 1,6 мкм. Кроме того, ширина полос пропускания канала должна соответствовать поставленной задаче. Наиболее строгой ширина полос пропускания будет для цветности океана ($\Delta\lambda \approx 10$ нм), затем для растительности ($\Delta\lambda \approx 20$ нм), в то время как для других элементов поверхности и для облаков ширина полос пропускания в несколько десятков нанометров

может быть достаточной. Получение данных о малых газовых составляющих на длинах волн солнечного излучения требует гораздо большего спектрального разрешения. Другим явлением, которое влияет на использование ВИД + БИК + КВИК-диапазонов для количественных оценок является поляризация: зеркальное отражение стремится к приоритету при ослаблении вертикального компонента электрического поля. Вектор Стокса, который в коротковолновом диапазоне состоит из трех членов (поляризация в трех направлениях со смещением по фазе на 120°), полностью описывает электрическое поле и предоставляет основную информацию о свойствах тела. Мультиполяризация имеет важное значение для наблюдения за теми телами, которые не имеют сильных многоспектральных сигнатур. Типичными примерами в этом отношении являются аэрозоли и перистые облака (продолговатые ледяные кристаллы).

2.2.3.3 *Измерения в средневолновом инфракрасном и тепловом инфракрасном диапазонах*

В диапазоне 4–15 мкм солнечная радиация практически равна нулю. На поверхности Земли (суше и океане) прошедшая радиация также равна нулю. Более того, принимая во внимание, что излучательная способность почти не зависит от температуры тела, уравнение 2.12 сводится к следующему виду:

$$I_{\mathrm{IR}}\left(\lambda,T\right)=\varepsilon\left(\lambda\right)\cdot B\left(\lambda,T\right) \tag{2.14}$$

Уравнение 2.14 также приблизительно справедливо и для облаков, поскольку пропускная способность облаков в ИК-диапазоне достаточно низкая (за исключением тонких перистых облаков).

Большинство поверхностей суши, и определенно океана, имеют коэффициент излучения, близкий к единице с небольшими вариациями. Поэтому информация, получаемая путем измерения в ИК-канале, тесно связана с функцией Планка (уравнение 2.7) или, для данной длины волны, с температурой тела.

При заданной длине волны λ или для узкого канала $\Delta\lambda$ около λ, функцию Планка, уравнение 2.7, можно легко преобразовать для нахождения температуры T:

$$T(\lambda) = \frac{hc}{\lambda k \ln\left[1+\frac{2\pi hc^2}{\lambda^5 B(\lambda)}\right]} \quad (2.15)$$

Однако T не будет истинной температурой тела, за исключением тех случаев, когда $\varepsilon = 1$. Если излучательная способность тела известна и ширина полосы пропускания канала $\Delta\lambda$ является достаточно узкой, чтобы считать ε константой, то к измеренной величине может быть применена поправка на излучательную способность (путем преобразования $B(\lambda,T) = I_{\mathrm{IR}}(\lambda,T)/\varepsilon(\lambda)$) и на измеренную температуру тела. Либо, преобразуя измеренную величину $B(\lambda,T) = I_{\mathrm{IR}}(\lambda,T)$, получается температура T_{BB}, (эквивалент температуре черного тела), которая ниже истинной температуры тела.

Для целого ряда различных тел, имеющих ε близкую к 1, наблюдение за излучением в ТИК-атмосферном окне позволяет проводить достаточно точное измерение температуры. Оно будет особенно точным для поверхности океана, которая имеет излучательную способность близкую к 0,98. Однако, излучательная способность является не единственным фактором, который необходимо корректировать. Как говорилось ранее, атмосферные окна не являются абсолютно прозрачными. Например, основное окно в ТИК-диапазоне 10—12 мкм, загрязняется континуумом водяного пара, особенно в длинноволновой области спектра. Для уменьшения такого возмущения окно разделяют на два канала, обычно 10,3—11,3 и 11,5—12,5 мкм. Дифференциальная абсорбция затем используется для оценки поправки (общее содержание водяного пара в столбе может быть также определено как побочный результат).

Как результат описанных эффектов, уравнение 2.15 указывает на зависимость температуры от длины волны (хотя, поскольку существует всего одна температура тела, такой зависимости не должно существовать). Разброс значений с длиной волны подразумевает, каким образом определённая информация может быть объяснена. Например, сравнивая T_{BB}, измеренную на длине волны 3,7 мкм и 11 мкм, наблюдаемую разницу можно объяснить различной величиной излучательной способности или через призму отдельных искажений измерений от облаков.

Необходимо иметь в виду, что окно прозрачности 3,7 мкм ведет себя очень по-разному в дневное и ночное время суток. В дневное время оно подвержено сильным помехам со стороны отраженной солнечной радиации, которую необходимо вычитать до использования канала для количественных оценок теплового излучения. Как упоминалось ранее, окно 3,7 мкм является более чувствительным к высоким температурам, чем окно 11 мкм. В то же время окно 3,7 мкм мало пригодно для низких температур, таких как температуры верхней границы облаков в верхней тропосфере. Различная реакция на температуры в окнах 3,7 и 11 мкм может также использоваться для обнаружения тумана в ночных условиях.

Что касается облаков, то уравнение 2.14 до сих пор практически справедливо. Однако, за исключением оптически плотных облаков (обычно кучевые, слоисто-дождевые), излучательная способность составляет меньше единицы. Эквивалентная температура черного тела является существенно ниже истинной температуры, и необходимо применять поправку для учета низкой излучательной способности. Обычный метод заключается в объединении канала окна с каналом, который имеет высокую чувствительность к водяному пару. Разница между двумя значениями T_{BB} соответствует излучательной способности облака: чем больше разница, тем ниже излучательная способность.

Степень проникновения инфракрасного излучения в облака является очень низкой. Измеренная температура относится к поверхности верхней границы облаков,

а информация о внутреннем строении облаков недостаточна, особенно для плотных облаков. Тем не менее, температура верхней границы облаков, которая находится в равновесии с температурой воздуха на том же уровне, является важным параметром, поскольку она определяет высоту облака в тропосфере, а, следовательно, и тип облака.

Информация о верхней границе облака, полученная по температуре черного тела, часто бывает неточной. При тонкой облачности, такой как тонкие перистые облака, фоновая температура поверхности гораздо выше температуры воздуха на уровне облака. Как следствие, излучение поверхности, проходящее сквозь облака, повышает величину излучения облака, температура облака оказывается выше, и, таким образом, заданный уровень оказывается заниженным. И наоборот, мощные перистые облака с высокой излучательной способностью воспринимаются в наблюдениях как очень холодные и могут быть перепутаны с кучево-дождевыми облаками.

Во избежание неоднозначности желательно представить яркость в видимой области спектра и температуру в ИК-области в виде двумерных гистограмм (рисунок 2.16). При использовании только одной полосы пропускания (проекция двумерного изображения на одну ось) некоторые кластеры могут оказаться неразрешенными. В то же время данный пример показывает, что можно идентифицировать 10 различных объектов при многополосном анализе. Этот пример является простым примером использования ранее эксплуатируемого инструмента (радиометра с очень высоким разрешением (VHRR)) и всего лишь двух каналов в ВИД- и ИК-областях спектра. Применяемые сегодня методы многополосного анализа позволяют работать с гораздо большим числом каналов.

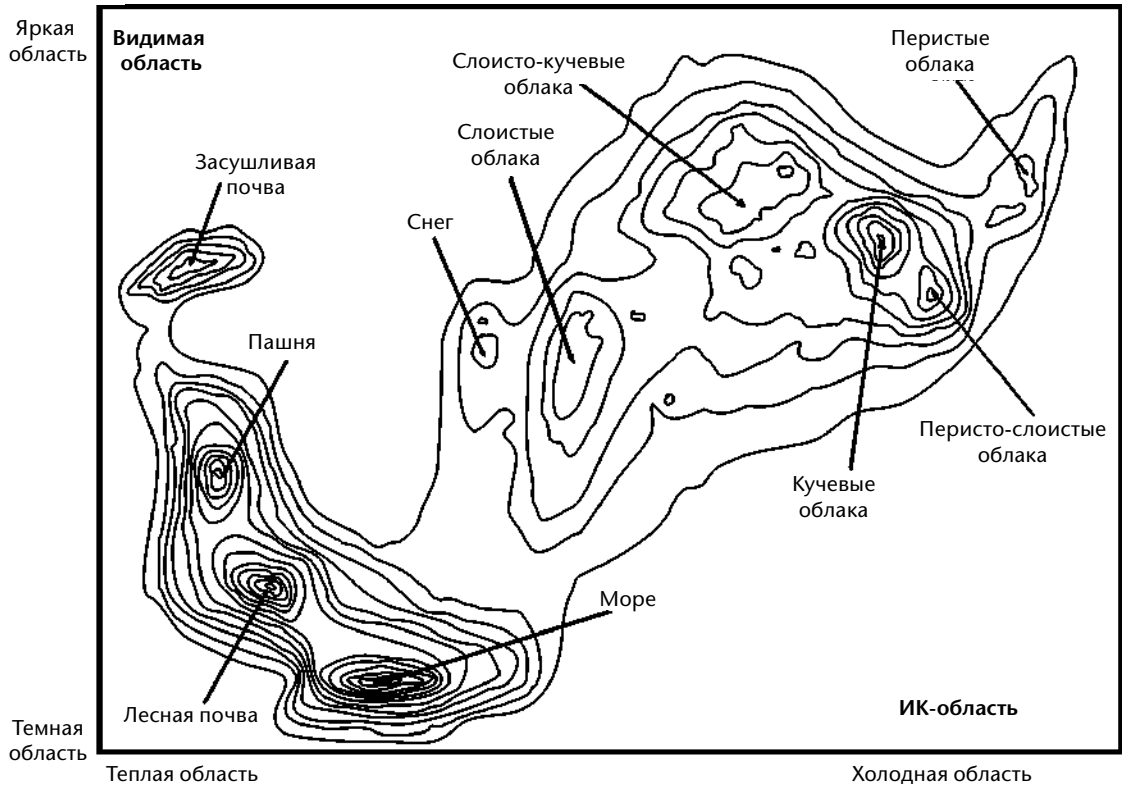


Рисунок 2.16. Диаграмма рассеяния в видимой области (0,65 мкм) по сравнению с ИК-областью (11,5 мкм), позволяющая классифицировать 10 тел. При проекции на одну из двух осей некоторые кластеры будут неразрешенными.

Источник: Bizzarri and Tomassini (1976).

2.2.3.4 *Измерения в микроволновом диапазоне*

В микроволновом диапазоне солнечная радиация практически равна нулю, однако существует источник приходящей рассеянной радиации: небесная сфера. Если говорить о поверхности Земли, включая сушу и море, то величина проходящего излучения равна нулю. Существует только два компонента: тепловое излучение и отраженное излучение. Они определяются коэффициентами излучательной и отражательной способностей, которые в силу $\tau = 0$ связаны условием $\varepsilon + \rho = 1$ (т. е. $\rho = 1 - \varepsilon$). Представляя энергию излучения через единицы температуры согласно уравнению Рэлея-Джинса (2.10), наблюдаемая яркостная температур T_B может быть получена:

$$T_B(\nu) = \varepsilon(\nu) \cdot T + \left[1 - \varepsilon(\nu)\right] \cdot T_{\text{sky}}(\nu) \qquad (2.16)$$

$T_{\text{sky}}(\nu)$, яркостная температура неба, состоит из фонового компонента космического излучения и излучения от облаков, дающих осадки; эта величина меняется с частотой. В главном окне и при наличии облаков, не дающих осадки, где $\nu \sim 40$ ГГц, $T_{\text{sky}}(\nu)$ может быть равной ~140 K. В условиях интенсивных осадков T_{sky} может достигать таких высоких значений как ~250 K.

Влияние $T_{\text{sky}}(\nu)$ сильно зависит от значения излучательной способности ε. Для моря и суши значения величины ε существенно отличаются.

Излучательная способность моря в микроволновой области является очень низкой: $\varepsilon \approx 0{,}5$. Как следствие, два члена в уравнении 2.16 имеют одинаковый вес. В отсутствие облаков, дающих осадки, величина T_{sky} является низкой и известна: измерения поэтому можно связать с температурой поверхности моря. Оптимальная частота для температуры поверхности моря составляет около 5 ГГц (см. рисунок 2.17), когда T_{sky} гораздо ниже, чем при 40 ГГц. Такое измерение является достаточно точным и применимо во всех погодных условиях, поскольку длина волны ($\lambda = 6$ см) гораздо больше, чем у любой дождевой капли. Интенсивность излучения поверхности моря на частоте 5 ГГц является репрезентативной для температуры водного слоя толщиной несколько миллиметров (подповерхностного слоя) по сравнению с десятками микрометров в случае ИК-излучения (температура поверхностного слоя). При более высоких частотах T_{sky} существенно увеличивается, особенно при наличии сильных осадков. Высокая отражательная способность ($1 - \varepsilon$) такова, что наблюдениями можно получить, главным образом, представление об осадках.

Над поверхностью суши излучательная способность близка к единице. Второй член в уравнении 2.16 в этой связи не имеет силы, и обнаружение осадков затруднительно. При более высоких частотах (~90 ГГц ($\lambda = 3$ мм)) уходящее излучение с поверхности рассеивается большими каплями и еще в большей степени ледяными кристаллами в облаках. Таким образом, излучение, достигающее спутника, уменьшается.

Поляризация тоже может быть использована для измерения осадков. Излучение, отраженное от поверхности моря, сильно поляризовано: при прохождении облаков, дающих осадки, оно подвергается деполяризации, которую можно измерить и таким образом определить осадки. Дифференцированная поляризация может использоваться и над поверхностью суши, поскольку исходящее излучение, рассеянное от капель и ледяных кристаллов, поляризуется.

Наблюдения при нескольких различных поляризациях могут быть полезными независимо от цели измерения осадков. Дифференцированная поляризация чувствительна к шероховатости поверхности — эффекту, который необходимо учитывать в измерениях температуры поверхности моря. Этот эффект можно также использовать для определения скорости ветра над океаном, как показано на рисунке 2.17.

На рисунке 2.17 также показано, что излучение в микроволновом диапазоне чувствительно к солености океана, но только на очень малых частотах, обычно около 1,4 ГГц (L-диапазон). Из рисунка также видно, что для измерения солености океана необходимо оценить температуру поверхности океана и скорость ветра (или шероховатость). Аналогично солености, существует полоса поглощения водяного пара, которая вносит погрешность в результаты наблюдений за температурой, ветром и жидкокапельными облаками

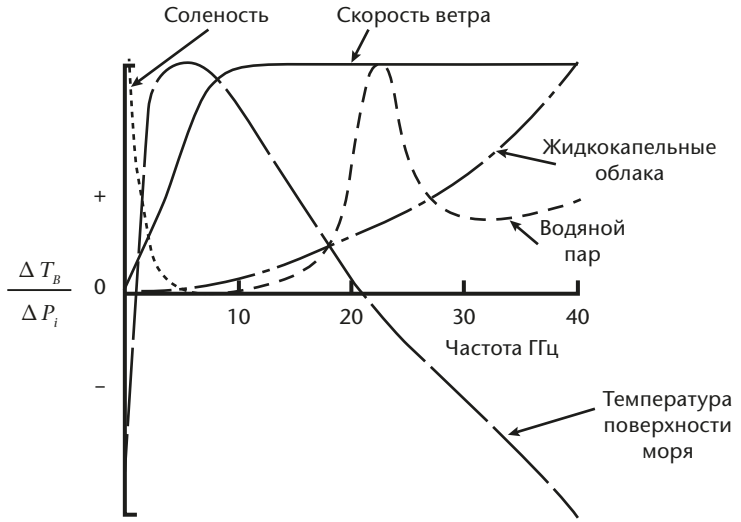


Рисунок 2.17. Чувствительность (определяемая как $\Delta T_B/\Delta P_i$) МКВ-частот к некоторым геофизическим переменным (P)

(осадками). Эта полоса может быть также использована для определения общего содержания водяного пара в столбе (водяного пара, который может выпасть в виде осадков) над океаном. Другими словами, в микроволновом диапазоне, как и в оптическом поле, различные переменные могут иметь различные сигнатуры в различных каналах и вследствие этого необходим многоканальный анализ.

Из-за совершенно различных значений излучательной способности поверхностей океана и суши, наиболее очевидным элементом на изображениях микроволнового диапазона является граница суши/моря. Поскольку излучательная способность льда близка к единице, морской лед также является очевидным объектом, поддающимся наблюдению во всех погодных условиях. Изображения микроволнового диапазона особенно полезны для географических районов с частой сплошной облачностью. Над сушей, в условиях с излучательной способностью близкой к единице, уменьшение излучательной способности указывает на присутствие воды на поверхности. Это связано с тем, что излучательная способность тела контролируется его диэлектрической постоянной: вода на суше является соляным раствором, что увеличивает проводимость и соответственно уменьшает излучательную способность. Этот эффект может быть использован для измерения влажности почвы и свойств снежного покрова.

Измерения влажности почвы могут быть достаточно точными на обнаженной почве, однако с увеличением растительного покрова степень их точности может понижаться. Для того, чтобы пройти через растительность и измерить влажность почвы на корневом уровне, необходимо использовать очень низкие частоты, в L-диапазоне или даже ниже — в P-диапазоне. На более высоких частотах (выше 10 ГГц) чувствительность к влажности почвы будет значительной только в том случае, если учитываются искажения, вносимые растительным покровом.

К двум характерным свойствам снега, которые поддаются обнаружению в микроволновом диапазоне, относятся условия поверхностного таяния, а при неглубоком снежном покрове — водяной эквивалент. В последнем случае предпочтительнее использовать относительно высокие частоты, поскольку снег обычно прозрачен на низких частотах, а на очень высоких частотах сигнал насыщается в верхних слоях снежного покрова. Поэтому необходимы несколько частот с разной глубиной проникновения.

2.2.4 Наблюдения в полосах поглощения

2.2.4.1 *Уравнение переноса излучения*

В полосе атмосферного поглощения каждый слой толщиной dz поглощает излучение, поступающее снизу, и переизлучает его. В предположении нулевой отражающей способности атмосферы в ИК-диапазоне, атмосферное пропускание с высоты z до высоты спутника H можно записать в виде:

$$\tau(\lambda,z) = e^{-\int_z^H \varepsilon(\lambda,z)\cdot N(z)\cdot dz} \tag{2.17}$$

где $N(z)$ — концентрация поглощающего газа.

Вклад излучения атмосферного слоя толщиной dz на высоте z, связанный с изменением пропускания $d\tau$ (I,z), составляет $dI(\lambda,z) = B[\lambda,T(z)] \cdot d\tau(\lambda,z)$.

Излучение от всего атмосферного столба по направлению к спутнику можно представить в виде:

$$I(\lambda) = \int_{\tau(\lambda,z_s)}^{1} B[\lambda,T(z)]\cdot d\tau(\lambda,z) \tag{2.18}$$

где z_s — высота поверхности Земли.

Необходимо добавить вклад излучения от земной поверхности, ослабляемого при общем прохождении излучения через атмосферу. Кроме того, может быть также определена весовая функция:

$$K(\lambda,z) = \frac{d\tau(\lambda,z)}{dz} \tag{2.19}$$

Комбинированное излучение, достигающее спутника, записывается уравнением переноса излучения:

$$I(\lambda) = B(\lambda,T_s)\cdot\tau(\lambda,z_s) + \int_{z_s}^{H} B[\lambda,T(z)]\cdot K(\lambda,z)\cdot dz \tag{2.20}$$

Из рисунка 2.18 видно, что пропускание (уравнение 2.17) стремится к единице с увеличением высоты z (т. е. с уменьшением толщины атмосферного слоя с высоты z

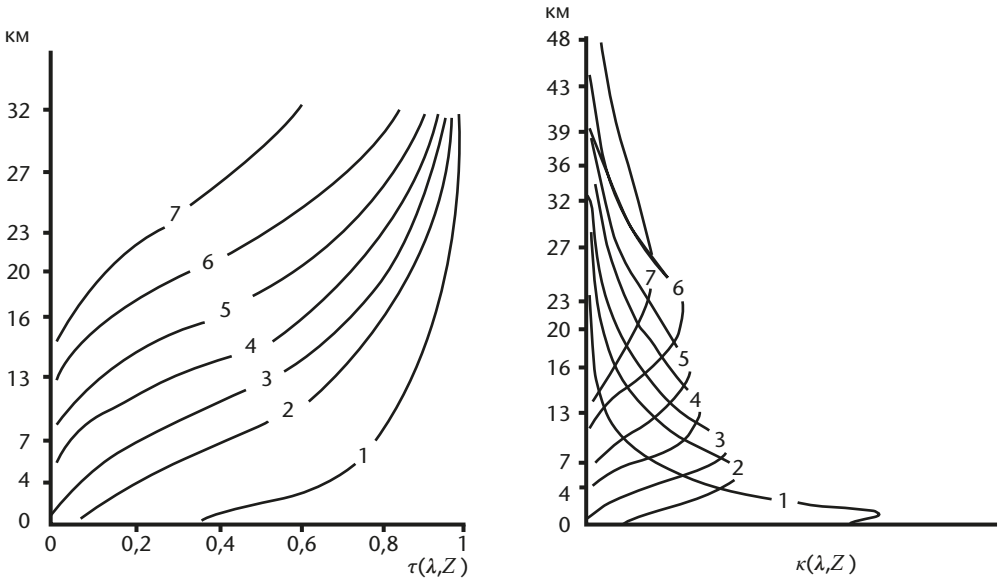


Рисунок 2.18. Коэффициент пропускания (слева) и соответствующие весовые функции (справа) для семи каналов в полосе CO_2 14 мкм

до высоты спутника H). Это сопровождается уменьшением излучательной способности ε и уменьшением концентрации N поглощающего газа. Весовые функции имеют максимальные пиковые значения, соответствующие точке перегиба функции коэффициента пропускания. Простой смысл уравнения 2.20 заключается в том, что каждый атмосферный слой толщиной dz вносит вклад в излучение, достигающее спутника, в соответствии с его температурой (по функции Планка) и также его способностью вносить такой вклад, что количественно оценивается весовой функцией. Весовая функция зависит от концентрации поглощающего газа и величины силы поглощения/излучения (ε). Она имеет такую форму, что нижние слои атмосферы находятся в невыгодном положении из-за поглощения верхними слоями, а верхние слои находятся в невыгодном положении из-за низкой концентрации поглощающего газа. Атмосферный слой, который демонстрирует самые большие изменения в пропускании, обычно является слоем, который вносит наибольший вклад.

2.2.4.2 ***Восстановление профиля***

Инвертирование уравнения 2.20 является нетривиальной задачей. Это уравнение Фредгольма второго рода, для которого существование или единственность решения не гарантируются математически. В нашем случае существование решения гарантируется самой природой. Для обеспечения единственности решения необходимо добавить ограничения для решения, поскольку задача является плохо обусловленной. За всю историю зондирования профиля излучения из космоса были разработаны различные методы, некоторые из них статистические и линейные, другие физические и нелинейные, а третьи — сочетание тех и других подходов.

Основная задача — инвертировать уравнение 2.20 с целью получения температурного профиля атмосферы. Это возможно только, если функция пропускания известна заранее, что предполагает измерения в полосах поглощения газа с известным и устойчивым профилем концентрации. В ИК-диапазоне CO_2 имеет такой профиль в полосах около 4,3 и 15 мкм (см. рисунок 2.12). Как было отмечено ранее, полоса 4,3 мкм более чувствительна к высокой температуре, являясь репрезентативной для нижней тропосферы. Однако в этой полосе может происходить искажение излучением от других компонентов атмосферы, а в дневное время нельзя не учитывать хвост кривой солнечного черного тела (> 4 мкм). Полоса 15 мкм является спектрально более чистой, но в то же время в некоторой степени она загрязняется континуумом водяного пара. Коэффициенты пропускания по этой причине нуждаются в корректировке, или априори путем использования внешней информации, либо апостериори путем выполнения итераций после восстановления профиля водяного пара.

Восстановление профиля водяного пара является следующим шагом. После того, как получен профиль температуры в каналах полосы поглощения CO_2, используются другие каналы в полосах поглощения H_2O. Основная полоса, центр которой располагается около длины волны 6,3 мкм, хорошо реагирует на высокую температуру, т. е. в нижней и средней тропосфере. Для мониторинга климата важно измерять водяной пар в верхней тропосфере. Однако это требует использования полосы 18 мкм, что технологически затруднительно из-за отсутствия эффективных детекторов в ДИК-диапазоне.

Получение профиля водяного пара, или в более общем случае концентрации поглощающего газа, является отнюдь не простой задачей. Весовые функции поглощающего газа имеют максимум на различных высотах в атмосфере в зависимости от концентрации и частоты дистанционного зондирования. Более того, это восстановление некорректно по своей природе, поскольку функция коэффициента пропускания, которую нужно инвертировать (уравнение 2.17), определяет содержание в тонком слое на высоте z как разницу между соответствующим содержанием двух очень толстых слоев: от H до z и от H до ($z - \Delta z$). Точнее сказать, небольшая величина выводится путем вычисления разницы между двумя большими величинами.

Дополнительные трудности возникают в случаях, когда присутствует облачность. Если мгновенное поле зрения (IFOV) полностью закрыто облаком с одинаковыми параметрами,

профиль по-прежнему можно получить тем же самым методом, хотя он будет ограничен атмосферой над облаком. Если IFOV лишь частично закрыто частью η облака с излучающей способностью облака $\varepsilon_{\text{cloud}}$, то уравнение переноса примет вид:

$$I(\lambda) = (1 - \varepsilon_{\text{cloud}} \cdot \eta)\, I_{\text{clear}}(\lambda) + \varepsilon_{\text{cloud}} \cdot \eta \cdot I_{\text{cloud}}(\lambda) \qquad (2.21)$$

где $\varepsilon_{\text{cloud}} \cdot \eta$ — эффективное покрытие.

Существует несколько способов для разрешения проблем, связанных с влиянием облаков (August et al. 2012, Susskind et al. 2014). Один из методов основан на том, что в начале процедуры восстановления используют каналы с весовыми функциями, максимальные значения которых лежат выше верхней границы облаков, и таким образом получают профиль в начальном приближении. После чего выполняя итерации, меняют величины эффективного покрытия до тех пор, пока измерения во всех других каналах не будут давать наилучшего согласия. Другой метод предусматривает сравнение нескольких близкорасположенных IFOV при допущении, что сигналы различаются только из-за различных относительных величин покрытий η, а затем проводят экстраполяцию на нулевой η.

В любом случае считается, что когда облачность в IFOV превышает примерно 20 %, то не следует предпринимать попыток получать профили в ИК-диапазоне. К счастью, в наши дни IFOV зондирующей аппаратуры сократилось от нескольких десятков километров до порядка 10 км и, следовательно, вероятность обнаружения значительного числа мгновенных полей обзора без облаков в данной области стала гораздо выше.

Проблема облаков значительно облегчается в микроволновом диапазоне, где зондирование возможно при всех погодных условиях за исключением сильного дождя. Для получения профиля температуры используются компоненты атмосферы с хорошо известной и постоянной концентрацией, такие как O_2 с полосами поглощения в диапазоне 50—70 ГГц и около 118 ГГц (пока еще не использовали со спутника). Для водяного пара успешно используется полоса 183 ГГц. Полоса 22 ГГц позволяет получить слабый сигнал, который может дать общую интегрированную по столбу величину над морем. Существуют и другие полосы поглощения для температуры и водяного пара на более высоких частотах, однако радиационное воздействие континуума водяного пара не позволяет проводить наблюдения в тропосфере с использованием этих спектральных полос.

Уравнение переноса в микроволновом диапазоне по сути является более простым вариантом уравнения ИК-диапазона (2.20): вместо функции Планка (уравнение 2.7) можно использовать аппроксимацию Рэлея-Джинса с линейной зависимостью по температуре (уравнение 2.10).

Можно задать вопрос, почему МКВ-диапазон не является исключительной полосой для зондирования температуры и влажности, коль скоро зондирование может проводится почти во всепогодных условиях. Причина состоит в том, что вертикальное разрешение требует высокой чувствительности к колебаниям температуры (с высотой). Вертикальное разрешение самое лучшее в полосе 4,3 мкм, где функция Планка изменяется примерно относительно T^{12}. В полосе 15 мкм чувствительность ниже потому, что функция Планка колеблется относительно T^5. В микроволновом диапазоне, поскольку B есть линейная функция от T (см. уравнение 2.10), чувствительность $(\partial B/\partial T)/B$ колеблется относительно T^{-1}, (она уменьшается с увеличением температуры). Примечательной особенностью различных полос является то, что если полоса 4,3 мкм хорошо подходит для нижней тропосферы, а полоса 15 мкм хорошо подходит для средней и верхней тропосферы, то микроволновая полоса на частоте 57 ГГц хорошо подходит для стратосферы.

Вертикальное разрешение имеет принципиальное значение для зондирования температуры и влажности. На рисунке 2.18 показан пример, в котором весовые функции достаточно широкие. Это подразумевает, что степени свободы (количество независимых частей информации) характеризуются ограниченностью. Весовые функции становятся более узкими, когда спектральное разрешение прибора улучшается. Рисунок 2.18 относится к радиометру, имеющему всего семь каналов и низкую разрешающую

способность ($\lambda/\Delta\lambda \approx 100$); его вертикальное разрешение составляет ~1,5—2 км в средней тропосфере. Современные приборы зондирования (спектрометры) имеют тысячи каналов и более высокую разрешающую способность ($\lambda/\Delta\lambda \approx 1\,000$); их вертикальное разрешение составляет менее 1 км в средней тропосфере. Дальнейшее увеличение разрешающей способности до $\lambda/\Delta\lambda \approx 10\,000$ не улучшит вертикальное разрешение профилей температуры и влажности, но позволит наблюдать отдельные линии малых газовых составляющих для целей атмосферной химии.

Современные приборы для микроволнового диапазона уже достигли максимальных характеристик с точки зрения вертикального разрешения: оно не может быть лучше чем ~1,5 км в средней тропосфере и будет хуже в нижней тропосфере из-за сильного влияния излучения земной поверхности.

В коротковолновом диапазоне (УФ, ВИД, БИК, КВИК) измерения в полосах поглощения в основном используются для атмосферной химии с применением спектральных методов. Уравнение переноса излучения в данном случае будет более сложным, чем уравнение 2.20. Вместо теплового излучения, описываемого законом Планка, используется более сложный процесс рассеяния. Восстановление геофизических переменных опирается на моделирование, а не на уравнения в явном виде. Помимо атмосферной химии анализ полос поглощения используется для изучения других параметров (см. спектр на рисунке 2.11), таких как:

a) Атмосферное давление на поверхности Земли: его величину получают из оценок общего содержания кислорода в полосе около 0,77 мкм в сравнении с соседними окнами. Это один из очень немногих подходов, существующих для измерения приземного давления из космоса. Точность ограничивается эффектом рассеяния аэрозолей, откуда следует, что это измерение также дает информацию об аэрозолях.

b) Высота верхней границы облаков: ее получают из дефицита, который возникает при измерении общего содержания кислорода в атмосферном столбе; сам дефицит возникает в результате маскирования облаком нижней части столба. В принципе, это более точный метод, чем вычисление высоты верхней границы из эквивалентной температуры черного тела в ИК-диапазоне с коррекцией на излучательную способность облака и преобразование температуры в высоту с использованием профиля температуры.

c) Общее содержание водяного пара: сигнал в одной или нескольких полосах водяного пара (около 0,94 или 1,37 мкм) сравнивается с сигналом в ближайших окнах. Это может быть более точным методом, чем использование ИК-диапазона или микроволновое профилирование.

2.2.4.3 ***Лимбовое зондирование***

На рисунке 2.18 показывается, как весовые функции становятся шире по мере увеличения высоты. Это указывает на то, что вертикальное разрешение профилей температуры и влажности для пассивной ИК и МКВ радиометрии ухудшается с увеличением высоты. В настоящее время при использовании спектрометров разрешение считается адекватным (~1 км) в средней тропосфере; однако оно становится предельно допустимым (~2 км) на уровне тропопаузы, где требуется гораздо более высокое разрешение. В стратосфере вертикальное разрешение продолжает ухудшаться и быстро становится неприемлемым. Существует два метода, которые могут помочь в этом отношении: зондирование лимба (включая затмение Солнца, Луны или звезд) и радиозатменное зондирование.

В режиме зондирования в надире вертикальное разрешение определяется резкостью весовых функций, которая контролируется, в свою очередь, спектральным разрешением. В лимбовом режиме вертикальное разрешение определяется механическим сканированием, т.е. IFOV прибора по всей атмосфере при визировании в поперечном направлении в области лимба Земли (рисунок 2.19). Вертикальное разрешение зависит от пошагового изменения величины, которое подбирается в соответствии с входной

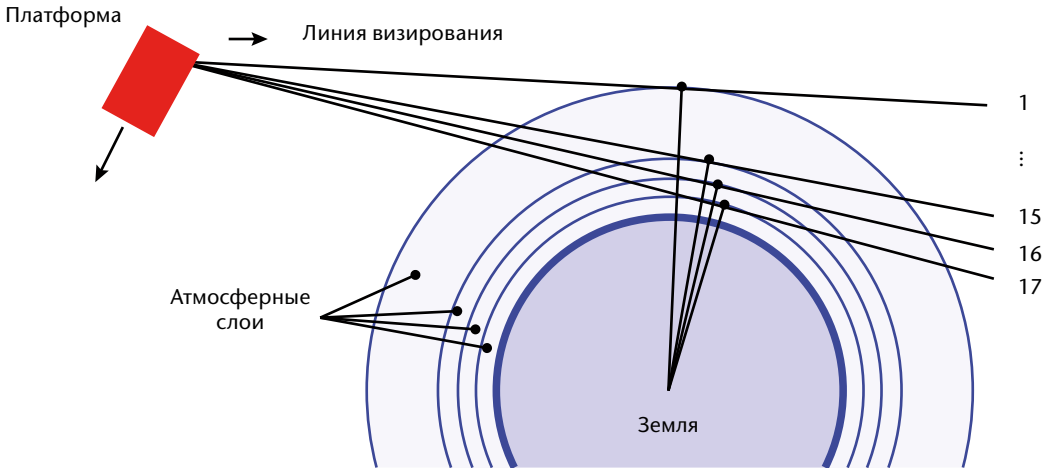


Рисунок 2.19. Геометрия лимбового сканирования

апертурой и интенсивностью имеющейся радиации. Обычно оно задается в диапазоне между 1—3 км. Горизонтальное разрешение будет грубым, поскольку измерение интегрируется по большой оптической длине пути, как показано на рисунке 2.19. Полная оптическая длина пути может составлять тысячи километров, однако эффективная оптическая длина пути, после взвешивания по атмосферной плотности, имеет протяженность примерно 300—500 км в окрестностях точки прохождения касательной линии.

Источниками излучения являются солнечное излучение, отраженное в атмосфере, или тепловое излучение атмосферы в ИК- или МКВ-диапазонах. Как правило, лимбовые наблюдения направлены не только на восстановление профилей температуры и влажности, но также и на изучение малых газовых составляющих для целей атмосферной химии.

В КВ-диапазоне (УФ, ВИД, БИК, КВИК) сканирование атмосферы можно осуществлять прямым нацеливанием на Солнце во время захода или восхода Солнца (затмение). Наблюдение выполняется путем измерения затухания спектральных линий в солнечном спектре. Метод солнечного затмения имеет огромное преимущество в том, что позволяет избежать какого-либо механического перемещения телескопа прибора и какой-либо калибровки, поскольку спектры, измеряемые во время затмения, используются в сравнении с солнечным спектром, измеряемым незадолго до (или после) затмения при тех же условиях. Один недостаток, по крайней мере, для полярно-орбитальных спутников, заключается в том, что покрытие ограничено высокими широтами, где спутник фиксирует восход (или закат), когда он заходит в ночную дугу орбиты (выходит из нее). Более широкое покрытие может быть достигнуто, если использовать затмение Луны. Дальнейшее расширение охвата на все широты возможно с использованием затмения звезд. Однако, в этих случаях излучение будет гораздо меньше.

2.2.4.4 ***Молния***

Молния: очень узкая (шириной ~1 нм) полоса длины волны в ближней инфракрасной области спектра используется для наблюдения триплета полосы излучения нейтрального атомарного кислорода около 0,774 мкм. Эта часть спектра молнии составляет около 10% от общей оптической энергии молнии. Сильное поглощение от кислорода закрывает поверхность Земли и позволяет обнаруживать вспышки в верхней части облачности даже в дневное время. Интенсивность (общая оптическая энергия), протяженность по площади и количество вспышек за определенный период и тенденция на определенной территории являются репрезентативными диагностическими признаками конвекции, включая электрическую энергию, микрофизику, кинематику облаков и осадки. При развивающихся штормах молнии имеют компактную протяженность, а при увеличении масштаба

конвективных штормов или их слиянии молнии могут распространяться на несколько сотен километров. Кроме того, молнии являются реакцией на накопление электрического заряда в грозовых облаках и естественным источником NO_x в атмосфере.

2.2.5 Активное зондирование

Описанные выше методы зондирования основаны на том, что источниками для дистанционного зондирования являются отраженное солнечное излучение и тепловое излучение, испускаемое Землей (к которым прибавляются некоторые другие менее значительные источники, такие как фоновое излучение неба в МКВ-диапазоне, Луна и звёзды в затменных наблюдениях). Эти природные источники делают возможным пассивное зондирование, для которого длины волн, используемые для наблюдений, определяются, главным образом, природными объектами. При активном зондировании источник будет искусственным и длина волны зондирования не полностью определяется физическими свойствами объекта, а может быть выбрана с учетом ограничений, существующих для формирования и распространения сигналов. Далее будут рассмотрены следующие принципы активного зондирования:

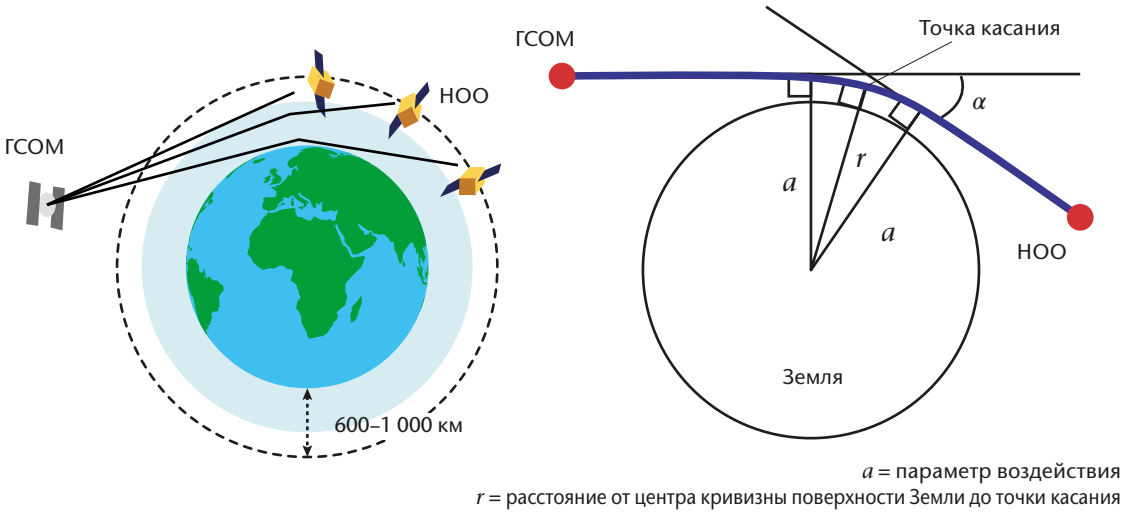
a) радиозатменные измерения (для получения профилей температуры и влажности высокого вертикального разрешения);

b) радиолокатор (для целей альтиметрии, скаттерометрии, оценки параметров облаков и осадков и получения изображений);

c) лидар (для обнаружения облаков и аэрозолей, перемещения воздушных масс, альтиметрии и атмосферной химии).

2.2.5.1 *Радиозатменные наблюдения*

Радиозатменные наблюдения — это один из методов лимбового зондирования, который использует совершенно другой подход, отличный от пассивного радиометрического измерения. Искусственный источник (в данном случае сигнал от навигационного спутника (ГСОМ, ГЛОНАСС, Galileo или Compass)) отслеживается приемником на борту низкоорбитального спутника (рисунок 2.20).



a = параметр воздействия
r = расстояние от центра кривизны поверхности Земли до точки касания

Рисунок 2.20. Принцип радиозатменного зондирования. Во время захода или восхода спутника ГСОМ над горизонтом спутника на НОО преломление, вызванное изменением свойств атмосферы вдоль луча, изменяет направление распространения волн под углом α.

Изменение направления распространения сигнала в результате атмосферной рефракции (угол преломления α) преобразуется в фазовый сдвиг. Этот сдвиг измеряется с хорошей точностью и затем преобразуется в профиль рефракции со временем в процессе затмения, которое продолжается около 90 с. Величина рефракции зависит от температуры и концентрации водяного пара в атмосфере.

Рефракция связана с атмосферными переменными следующим образом:

$$N = (n-1)\cdot 10^6 = 77{,}6\cdot p/T + 3{,}75\cdot 10^5 \cdot p_w/T^2 \qquad (2.22)$$

где N — рефракция, n — коэффициент преломления, p — давление сухого воздуха, p_w — парциальное давление водяного пара, T — температура. Коэффициенты для p и p_w записываются в гПа, а T — в градусах Кельвина.

Фазовый сдвиг, по существу, является измерением времени, одним из самых точных измерений в физике. Другой основной параметр представляет собой расстояние между спутниками. Поскольку время и расстояние являются фундаментальными метрическими величинами, радиозатменные измерения представляют собой абсолютные измерения (не требующие калибровки): это весьма перспективная характерная особенность данного метода в плане мониторинга климата, когда величина рефракции зависит только от температуры и концентрации водяного пара в атмосфере. Фактически, долгосрочные радиозатменные наблюдения считаются эталоном среди методов обнаружения изменения климата.

Данные радиозатменных измерений достаточно трудно обрабатывать по двум обстоятельствам: во-первых, потому что положение точки касания (см. рисунок 2.20, справа) перемещается во время измерений профиля; и во-вторых, давление, температура и влажность не могут измеряться независимо. По этой причине требуется четырехмерное усвоение в модели численного прогноза погоды. В меньшей степени это представляет проблему для получения температуры в верхней тропосфере и стратосфере, поскольку в этих слоях содержание водяного пара очень низкое, а также в нижней тропосфере, где водяной пар отвечает за большую часть изменчивости.

С вертикальным разрешением радиозатменных профилей в верхней тропосфере и стратосфере (около 0,5—1,0 км) не могут соперничать надирные наблюдения в ИК-диапазоне или измерения в МКВ-диапазоне (1,5—2 км). Более того, используемые частоты (L-полоса: см. таблицу 2.9) не зависят от облаков, даже дающих осадки. В результате этого измерения, хотя и проводятся, главным образом, в лимбовом режиме, могут иметь более протяженный охват вплоть до поверхности Земли, например, при наблюдении атмосферных неоднородностей, таких как высота верхней границы планетарного пограничного слоя. Кроме того, радиозатменные измерения являются одним из немногих методов определения приземного давления: это выполняется путем корреляции между высотой тропопаузы и давлением воздуха на уровне земной поверхности.

Для того чтобы учесть поворот сигнала в ионосфере, при передачах с навигационных спутников используются, по крайней мере, две близкорасположенные частоты. В ходе процесса коррекции в качестве побочных продуктов получают информацию, относящуюся к космической погоде, такие как общее содержание электронов и профиль плотности электронов.

2.2.5.2 ***Радиолокатор***

Радиолокатор (радиообнаружение и дальнометрия) передает импульсные сигналы наблюдаемому объекту и улавливает сигнал обратного рассеяния. По сути, он измеряет расстояние (или дальность) и мощность обратного рассеяния благодаря радиолокационной отражательной способности или радиолокационному сечению тела.

Уравнение радиолокации можно записать в различном виде. Самый простой для понимания вид следующий:

$$P_s = \frac{P_t \cdot G}{4\pi \cdot r^2} \cdot \sigma \cdot \frac{1}{4\pi \cdot r^2} \cdot A_{\text{eff}} \tag{2.23}$$

где P_s — энергия обратного рассеяния, поступающая на антенну; P_t — энергия, переданная антенной; G — усиление антенны; A_{eff} — эффективная площадь приемной антенны радиолокатора; r — расстояние и σ — радиолокационное сечение. Следовательно:

$P_tG/4\pi r^2$ — энергия, достигающая цели на расстоянии r;
$P_tG/4\pi r^2 \cdot \sigma$ — энергия, отраженная от объекта;
$P_tG/4\pi r^2 \cdot \sigma/4\pi r^2$ — часть (изотропически) отраженной энергии, которая возвращается на антенну.

Усиление антенны можно представить в виде $G = 4\pi \cdot A_{\text{eff}}/\lambda^2$ (отношение, непосредственно следующее из закона дифракции). Представляя эффективную зону принимающей антенны радиолокатора, A_{eff} из его альтернативного выражения и при подстановке в уравнение 2.23 принимает следующий вид:

$$P_s = \frac{P_t \cdot G^2 \cdot \lambda^2}{64\pi^3 \cdot r^4} \cdot \sigma \tag{2.24}$$

Различные типы радиолокаторов ориентированы либо на точность измерения дальности (альтиметры), либо на отражаемость/сечение (скаттерометры). Радиолокаторы для обнаружения облаков и осадков основаны на измерении и дальности (для вертикального профилирования), и отражательной способности. Другим важным параметром является разрешение изображения, которое достигается радиолокатором с синтезированной апертурой.

Радиолокационная альтиметрия

Основная цель альтиметрии заключается в измерении уровня моря и его картировании с целью определения динамической топографии океана. Характеристики радиолокатора оптимизируются для измерения дальности, насколько это возможно. Уровень моря измеряется по времени, которое потребовалось импульсу радиолокатора для того, чтобы достичь поверхности моря и возвратиться на спутник. Поскольку уровень моря вычисляется как расстояние от спутника, его местоположение должно быть определено с максимальной точностью. Высокоточная оценка параметров орбиты осуществляется при помощи одной или нескольких систем:

a) лазерного слежения за спутником с помощью наземной станции и лазерных отражающих зеркал на спутнике;

b) радиоместоопределения на основе сетей наземных станций передачи и приема и приёмопередатчика на борту спутника;

c) приемника ГСОМ на борту спутника.

Недостатком радиолокационной альтиметрии является необходимость ограничиваться визированием только в надире; иначе эхо-сигналы от окружающих областей будут помехами во временном анализе. По этой причине цикл наблюдения является очень продолжительным. Требуется выполнение коррекций сигнала для учета: ионосферного вращения (для этого используются две частоты ~13,6 ГГц (основная) и ~5,3 ГГц (вспомогательная)) и водяного пара (используется сонастроенный МКВ-радиометр на канале ~23 ГГц (основной) и на каналах ~35 и/или ~19 ГГц (вспомогательные)).

Помимо измерения дальности альтиметр также регистрирует и анализирует ее флуктуации и измеряет интенсивность эхо-сигнала. Такие наблюдения позволяют получить:

a) значимую высоту волны: рассчитывается на основе анализа разброса во времени улавливаемых эхо-сигналов;

b) уровень моря: рассчитывается после фильтрации флуктуаций, вызванных волнением, и с учетом мгновенной высоты спутника относительно геоида;

c) скорость ветра: выводится из анализа флуктуаций интенсивности эхо-сигналов;

d) более глубокие знания о геоиде: на основе многолетних статистических данных о наблюдаемых уровнях моря;

e) общее содержание электронов: выводится как побочный продукт коррекции ионосферного вращения.

Радиолокационная скаттерометрия

Основным применением космической скаттерометрии являются измерения ветра у поверхности океана. В отличие от радиолокационной альтиметрии, которая, главным образом, преследует целью измерение дальности, радиолокационная скаттерометрия оптимизирует точность измеренного радиолокационного сечения σ (см. уравнение 2.24), которое часто бывает нормированным и называется σ^0 (сигма-ноль). Подсистема для определения дальности может даже отсутствовать в приборе, однако калибровка должна быть предельно точной.

Радиолокационное сечение есть функция диэлектрических свойств объекта, геометрии визирования и падающего излучения (длина волны, поляризация). У скаттерометров основное применение связано с определением приво́дного ветра. Мишенью являются капиллярные волны, тесно связанные с ветровым напряжением. Величина σ^0 изменяется со скоростью ветра, с относительным направлением ветра и линией визирования. Путем измерения σ^0 при некоторых азимутальных углах можно определить как скорость, так и направление.

Взаимосвязь между σ^0 и ветром носит сложный характер: практические решения могут быть эмпирическими или полуэмпирическими. Более того, не существует единственной взаимосвязи с точки зрения направления: при двух углах визирования сохраняется ряд неоднозначностей (при трех углах — их меньше). Когда значения σ^0 напрямую усваиваются в модели численного прогнозирования погоды, которая описывает взаимодействие между волнами и атмосферой, решение неоднозначностей заключается в модели.

Различия между измерениями ветра при помощи скаттерометров и пассивных МКВ-радиометров можно суммировать следующим образом: (i) пассивное зондирование в микроволновом диапазоне обычно дает информацию только о скорости ветра; информация о направлении может быть получена только в том случае, если несколько радиометрических каналов оборудованы возможностями полной поляризации; (ii) информация от скаттерометров является в общем более лучшего качества, особенно для низких скоростей ветра; для высоких скоростей (более ~20 м/с) хороший потенциал имеет пассивное зондирование в микроволновом диапазоне.

Предназначенные, главным образом, для определения параметров приво́дного ветра, скаттерометры позволяют проводить несколько видов наблюдений:

a) приво́дный ветер во всех погодных условиях (в C-диапазоне) или почти во всех погодных условиях (в K_u-диапазоне);

b) давление воздуха над поверхностью моря (путем применения геострофических отношений к ветровым картам);

c) влажность почвы в районах со скудной растительностью (в C-диапазоне, и лишь ограниченно в K_u-диапазоне);

d) индекс листовой поверхности или общая биомасса для густой растительности (лес);

e) тип льда (возраст, шероховатость) на полярных шапках;

f) водный эквивалент снега (для которого K_u-диапазон предпочтителен).

Радиолокаторы для обнаружения облаков и осадков

Если радиолокационные альтиметры предназначены, в первую очередь, для определения дальности, а радиолокационные скаттерометры — радиолокационного сечения, то радиолокаторы обнаружения облаков и осадков выполняют и то, и другое. Определение дальности необходимо для того, чтобы измерить вертикальный профиль частиц облаков, в то время как σ требуется для получения концентрации и размера отражающих частиц. Однако при получении профиля осадков требование к точности определения дальности составляет порядка 100 м, а не 1 см как для альтиметрии.

Для дождевых капель, при условии, что их диаметр D меньше $\lambda/10$ (т. е. в условиях рэлеевского рассеяния), радиолокационное сечение можно представить в виде:

$$\sigma = \frac{\pi^5}{\lambda^4} \cdot K^2 \cdot D^6 \quad , \quad \text{где} \quad K \quad \text{— диэлектрическая постоянная} \tag{2.25}$$

Полное обратное рассеянное излучение, зарегистрированное радиолокатором, представляет собой сумму всех отражателей всех диаметров в IFOV. Предполагая распределение Маршалла-Пальмера ($N_0 \cdot e^{-\Lambda D}$) для диаметров частиц, полная отражаемость может быть выражена:

$$Z = \frac{\pi^5}{\lambda^4} \cdot \int_0^{D_{\max}} K^2 \cdot N_0 \cdot e^{-\Lambda D} \cdot D^6 \cdot dD \quad \text{(справедливо для} \quad D \ll \lambda \quad \text{)} \tag{2.26}$$

Уравнения 2.25 и 2.26 в общем относятся к наземным метеорологическим радиолокаторам, которые используют S-полосу (~10 см) или C-полосу (~5 см). Эти полосы сравнивают с D-полосой ~ 0,5 см, которая является характерной для облаков, дающих осадки. Эти частоты не используются для наблюдений из космоса, поскольку соответствующее IFOV на земле с антенной разумного размера является слишком грубым. В соответствии с регламентными документами, регулирующими частоты, к частотам, которые могут использоваться радиолокаторами из космоса, относятся: ~14 ГГц (~2 см), ~35 ГГц (~0,9 см) и ~94 ГГц (~0,3 см). Поэтому уравнения 2.25 и 2.26 не могут быть применены целиком в данном случае и должны корректироваться достаточно сложным образом для учета условий рассеяния Ми.

Если отражаемость Z получена измерениями, то существует несколько способов для перевода Z в интенсивность осадков R. Во-первых, необходимо вычислить интенсивность осадков на поверхности. Она не может быть измерена из космоса напрямую, но вместо этого должна быть получена из измеренных свойств в вертикальном столбе, связанных с профилем осадков.

Радиолокатор обнаружения облаков и осадков — это единственный метод, который может обеспечить измерения нижней границы облачности, важного параметра для авиационной метеорологии и изучения климата. Точность и надежность измерений зависит от частоты радиолокатора; радиолокатор должен проникнуть через всю толщу облака. С оперативной точки зрения радиолокатор обнаружения облаков и осадков имеет несколько недостатков, в частности, ограниченную полосу обзора, что не позволяет иметь частые циклы наблюдения. Следовательно, хотя получение изображений пассивным зондированием в микроволновом диапазоне по-прежнему остается основным методом регулярных наблюдений за осадками, точность данных об осадках, полученных пассивной МКВ-радиометрией, до сих пор требует улучшения. Для «калибровки» системы пассивных МКВ-радиометров необходимо, чтобы в космическом пространстве постоянно находился, по крайней мере, один радиолокатор, в соответствии с основными требованиями программы измерения глобальных осадков.

Радиолокатор с синтезированной апертурой антенны

В МКВ-диапазоне пространственное разрешение ограничивается дифракцией. Для угла радиолокатора бокового обзора $\theta°$ не в надире на орбитальной высоте H, с диаметром антенны L, и в предположении плоской поверхности, IFOV записывается как:

$$\text{IFOV} = 1,24 \cdot \frac{H \cdot c}{\cos\ \theta \cdot L \cdot \nu} \tag{2.27}$$

В таблице 2.10 представлена зависимость IFOV и L для радиолокатора в нескольких диапазонах в предположении, что $\theta = 23°$ и $H = 700$ км (параметры РСА на борту спутника SeaSat, рисунок 2.21). Из рисунка видно, что потребности в IFOV = 1 км будет очень трудно обеспечить, а потребности в IFOV = 100 м или ниже будет невозможно обеспечить в рамках концепции антенны с реальной апертурой.

Согласно концепции РСА (рисунок 2.21), антенна вытянута вдоль направления движения спутника. Ее узкие размеры определяют полосу обзора, параллельную подспутниковой трассе. Более длинная сторона определяет область, где анализируются сигналы. Несмотря на то, что контур диаграммы направленности антенны радиолокатора соответствует контуру диаграммы направленности антенны с реальной апертурой, ситуация меняется для элементов разрешения в условиях эксплуатации (пиксели). Пиксели поперек полосы захвата находятся на разном расстоянии от спутника. Спутник может делать их привязку к местности благодаря своей способности различать небольшие изменения в расстоянии. Эхо-сигналы от пикселей, расположенных перед поперечной подспутниковой линией, испытывают воздействие положительного доплеровского сдвига (частота выше, чем переданная частота); эхо-сигналы от пикселей сзади этой линии испытывают отрицательный доплеровский сдвиг. Путем фиксации момента инверсии сдвига обеспечивается возможность для привязки пикселей к местности вдоль направления движения спутника.

РСА может использоваться в различных рабочих режимах в зависимости от выбранного сочетания разрешения и полосы обзора, а также комбинации переданной и полученной поляризаций. Один рабочий режим предназначен для волновых спектров. Небольшая

Таблица 2.10. Примеры соответствующих разрешений и размеров антенны для типичных частот, используемых в РСА

	L-диапазон (~1,3 ГГц)	*C-диапазон (~5,4 ГГц)*	*X-диапазон (~9,6 ГГц)*
IFOV для $L = 1$ м	220 км	60 км	30 км
Требуемый L для IFOV = 1 км	220 м	52 м	30 м
Требуемый L для IFOV = 100 м	2 200 м	520 м	300 м
Требуемый L для IFOV = 10 м	22 000 м	5 200 м	3 000 м

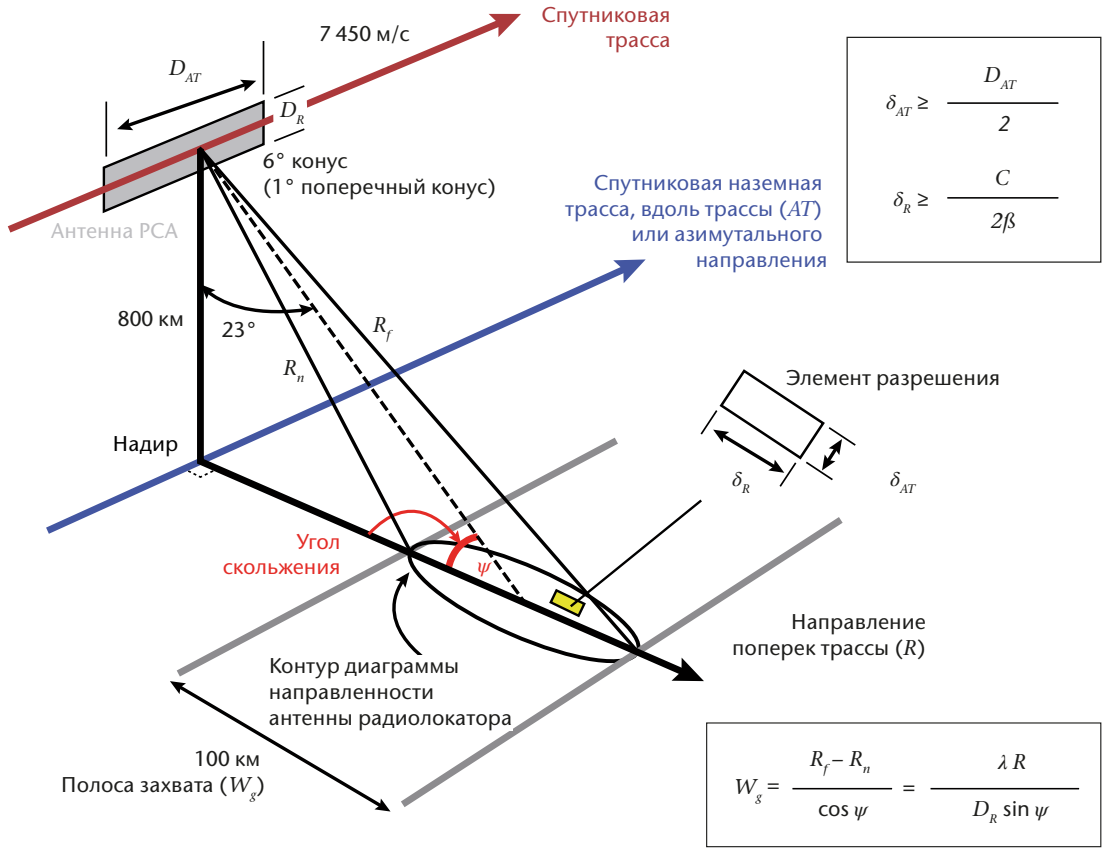


Рисунок 2.21. Принцип действия РСА

часть изображения (виньетка) выбирается через определенные интервалы (для спутника Envisat, к примеру, виньетка составляет 5 км x 5 км с наилучшим пространственным разрешением 30 м каждые 100 км вдоль трассы). Эхо-сигналы в виньетке анализируются с целью построения энергетических спектров, из которых можно определить преобладающее направление распространения волны, преобладающую длину волны/период волны и энергию, связанную со значимой высотой волны.

Перечень применений РСА велик, хотя не все диапазоны подходят для всех применений:

a) особенности циркуляции океана (вихри) и волны (преимущественно L-диапазон);

b) загрязнение океана и разливы нефти (преимущественно C-диапазон);

c) морской ледовый покров и тип льда (возраст) (любой диапазон);

d) материковый ледовый покров (ледники) (любой диапазон);

e) условия таяния снега и водный эквивалент снега (преимущественно X-диапазон);

f) влажность в поверхностном слое почвы (преимущественно L-диапазон, особенно для зоны корней);

g) тип растительности (преимущественно C-диапазон) и общая биомасса (преимущественно P-диапазон);

h) землепользование и урбанизация (преимущественно C-диапазон);

i) обнаружение геологических структур (преимущественно X-диапазон);

j) мониторинг стихийных бедствий и инвентаризация ущерба (преимущественно X-диапазон);

k) контроль за движением судов и военное наблюдение (преимущественно X-диапазон).

Другие важные применения могут быть реализованы при использовании интерферометрии благодаря тому, что контроль фазы сигнала РСА является очень точным. Сигналы с разных орбит одного и того же спутника или различных спутников могут быть зарегистрированы одновременно с высокой точностью, что позволяет реализовать интерферометрию. Этот метод дает возможность, например, получать топографию поверхности суши для усовершенствованных цифровых моделей рельефа и измерять высоту айсбергов.

Используя интерферометрию между проходами одного и того же спутника с периодичностью повторения орбиты, можно измерять такие изменения как дрейф айсбергов, колебания ледникового покрова и площади озер, изменения в вулканической поверхностной топографии и брадисейсмы, береговую эрозию и урбанизацию.

2.2.5.3 ***Лидар***

Лидар (световое обнаружение и измерение дальности) обеспечивает возможность проведения точных измерений высокого разрешения в отношении целого ряда явлений. Благодаря достижениям в области лазеров, оптики и геодезии, технология лидара быстро развивается. За последнее время Европейское космическое агентство (ЕКА) и Национальное управление по аэронавтике и исследованию космического пространства (НАСА) произвели запуск спутников для изучения атмосферы, экосистем и криосферных наук. Хотя в принципе лидар можно было бы применять для сканирования местности с целью получения изображений, до сих пор лидарные системы в космосе использовались только в надирной ориентации, или, по крайней мере, были мононаправленными. Принцип действия лидара похож на принцип действия радиолокатора, за исключением того, что электромагнитный диапазон другой: для радиолокатора используется МКВ-диапазон, для лидара — коротковолновый. Большинство лидаров используют длины волн в УФ- (например, 355 нм), ВИД- (например, 532 нм), ДИК- (например, 1 064 нм) или КВИК- (например, 1 550 нм) диапазонах; но могут использовать и более длинные длины волн (например, 10,6 мкм). Источником является лазер (усиление света в результате вынужденного излучения). Он является сильно направленным, однако большое расстояние от спутника до Земли означает, что большой объем электрической энергии был бы проблемой, а прием сигнала обратного рассеяния требовал бы использования более мощного телескопа. Существуют технические проблемы, такие как ухудшение состояния оптической системы из-за освещения лазером. Таким образом, использование лидара в космосе требует значительно больших ресурсов по сравнению с пассивными системами. Следующие существующие применения в космосе основаны на использовании лидара:

a) лидар обратного рассеяния для получения профиля аэрозолей и облаков;

b) доплеровский лидар для получения профиля ветра в безоблачной атмосфере;

c) лидарный альтиметр, предназначенный специально для определения высоты морского льда, материкового льда и высоты растительности;

d) лидар дифференциального поглощения (ЛДП) для задач атмосферной химии;

e) доплеровский лидар для измерения ветра.

Лидар для аэрозолей и облаков

Лидар обратного рассеяния, главным образом, предназначен для наблюдения за аэрозолями и облаками. Это означает использование длин волн, сопоставимых

с размером небольших аэрозолей (~1 мкм). Для того, чтобы определить больше свойств аэрозолей/облаков (размер, фаза, коэффициент экстинкции /рассеяния и сам тип), были разработаны различные концепции. Адаптивный лидар обратного рассеяния имеет самую простую конструкцию. Он измеряет профиль затухающего обратного рассеяния, которое на любой высоте является продуктом обратного рассеяния (как рэлеевского, так и рассеяния Ми), умноженного на затухание вышележащей атмосферы (например, из-за рассеяния и поглощения вышележащих облачных/аэрозольных слоев). Для получения обратного рассеяния аэрозолей/облаков и, что важно, экстинкции аэрозолей/облаков, которая часто является интересующим геофизическим параметром, необходимо применять отдельное ограничение/предположение. Некоторые адаптивные лидары обратного рассеяния используют две длины волны (532 и 1064 нм) для различения аэрозолей и облаков. Кроме того, для различения сферических и несферических рассеивателей могут быть разработаны приборы с поляризационной чувствительностью, что позволяет определить фазу развития облаков (лед или вода) и предоставить информацию о типе аэрозоля (например, отличить пыль от сферических аэрозолей). Как отмечается ниже в разделе по альтиметрии, альтиметры также могут предоставлять информацию о профиле аэрозолей и облаков, аналогичную по своей природе информации, предоставляемой адаптивным лидаром обратного рассеяния.

Более рабочим вариантом лидара обратного рассеяния является лидар с высоким спектральным разрешением (ЛВСР), в котором используется одночастотный лазерный передатчик и разграничение по длине волны в приемнике для разделения компонентов рассеяния Ми и рэлеевского рассеяния. Метод ЛВСР позволяет выполнить однозначные и независимые измерения обратного рассеяния и экстинкции аэрозоля без внешних ограничений или предположений, которые могут привести к неточностям в стандартных результатах лидара обратного рассеяния. ЛВСР также предоставляют больше информации (коэффициент экстинкции/обратного рассеяния частиц) для ограничения факторов, влияющих на заключение о типе аэрозоля. Доплеровские лидары для измерения параметров ветра, имеющие надлежащую конфигурацию и основанные на методе некогерентного обнаружения, могут также обеспечивать измерения ЛВСР в дополнение к измерениям ветра.

Лидары обратного рассеяния, как правило, представляют собой приборы среднего и большого размера (например, с диаметром телескопа от 0,6 до 1 м). может иметь апертуру ~1 м). Контуры одиночных диаграмм направленности лазерного излучения составляют несколько десятков метров в диаметре, а выборка по вертикальному разрешению варьировалось в диапазоне от 30 м до нескольких сотен метров. Для некоторых приложений (например, для изучения сильно рассеивающих облаков) используются одиночные измерения полного разрешения. Для слабых характеристик или выборки данных, требующих более высокого отношения сигнал-шум, используется усреднение данных по вертикали и по множественным лазерным снимкам (то есть по горизонтали).

Предназначенный главным образом для определения аэрозолей (что является очень трудной задачей), лидар обратного рассеяния позволяет выполнять наблюдения различных параметров, включая:

a) вертикальный профиль обратного рассеяния, экстинкции и деполяризации аэрозоля, по которому можно определить высоту слоя аэрозоля (включая высоту ППС, определяемую по градиентам обратного рассеяния аэрозоля), оптическую плотность аэрозоля и, в зависимости от возможностей системы, тип аэрозоля и соотношение экстинкции к обратному рассеянию (только ЛВСР);

b) высоту верхней границы облаков с гораздо большей точностью, чем пассивные методы зондирования в БИК- и ИК-диапазонах;

c) оптическую толщину тонких облаков (перистых) и нижнюю границу облаков в полупрозрачных облаках;

d) фазу развития облаков (при чувствительности к поляризации) и, для плотных водяных облаков, ограничения в отношении эффективного радиуса облачных капель и их количественной концентрации;

e) аналогичные свойства полярных стратосферных облаков.

Данные лидара обратного рассеяния также использовались для оценки свойств океана, включая шероховатость морской поверхности, скорость приво́дного ветра и обратное рассеяние частиц у поверхности, а также взвешенный органический углерод и биомассу фитопланктона.

Доплеровский лидар

Доплеровский лидар предназначен, главным образом, для наблюдения профилей ветра — основной переменной для метеорологического прогноза. Доплеровский лидарный прибор развернут в рамках Миссии по изучению динамики атмосферы —Эол (МДА-Эол).

Современные оперативные методы, доступные для наблюдений за профилем ветра, заключаются в отслеживании движения облака или неоднородностей водяного пара на последовательных изображениях с геостационарных спутников, или с полярно-орбитальных спутников в полярных районах, над которыми часто проходит спутник. Это ограничивает возможности проведения измерений только на тех высотах, на которых находятся трассеры (обычно один, иногда два слоя). С появлением гиперспектрального ИК-зондирования на геостационарной орбите (ГСО) стало возможным получать частые профили водяного пара, а динамику водяного пара можно отслеживать на нескольких высотах. Однако при этом вертикальное разрешение и точность, как полагают, будут ограничены.

Слежение за свойствами атмосферы (например, облаков и водяного пара) является проверенным методом оценки ветров. Доплеровский лидар позволяет позволяет производить измерения ветров в безоблачной атмосфере, при этом слежение ведется за аэрозолями и молекулами Очевидно, что доплеровский лидар обеспечивает более прямую оценку поля ветра

Ветровой лидар был реализован в рамках миссии МДА-Эол ЕКА (Källén 2008). Основным недостатком лидаров, определяющих параметры ветра, является охват. Поскольку в настоящее время один прибор покрывает только линию, параллельную подспутниковой трассе, потребуется группировка спутников для обеспечения более широкого пространственного и временного покрытия.

Другой трудностью для лидара, определяющего параметры ветра, является то, что измерение может вестись только по линии визирования (одномерное). Это означает, что для восстановления требуемой двумерной горизонтальной составляющей требуется усвоение в модели численного прогноза погоды.

Доплеровский лидар предназначен, главным образом, для определения параметров ветра, что является очень трудной задачей. Он позволяет проводить несколько видов измерения, включая профиль ветра в безоблачной атмосфере или в присутствии тонких перистых облаков, профиль аэрозоля (по интенсивности эхо-сигнала) и высоту верхней границы облаков.

Лидарный альтиметр

Радиолокационные альтиметры могут обеспечивать измерения с точностью до нескольких сантиметров. Однако, на высотах выше 20 км, их горизонтальное разрешение является достаточно низким. Реализация технологии РСА с обработкой сигнала вдоль трассы позволяет довести разрешение до ~300 м, что все-таки еще недостаточно для точного определения границ. Другим недостатком лидарных альтиметров является их

непригодность для наблюдения за поверхностями с высокой излучательной способностью (и, следовательно, низкой отражательной способностью) в МКВ-диапазоне, таких как наблюдения за сушей и льдом.

У лидаров таких проблем не существует. Горизонтальное разрешение может составлять несколько десятков метров, а вертикальное разрешение менее 10 см. Такое высокое разрешение дает возможность определять границу между морской водой и полярным льдом и (после последовательных проходов спутника) выполнять высотное профилирование вдоль трассы для составления карт толщины льда.

Для того, чтобы обеспечить функционирование над морем, даже несмотря на низкую отражательную способность в ВБИК-диапазоне, лидарный альтиметр должен иметь большой телескоп (апертура ~1 м). Для повышения рентабельности обычно добавляют датчик, использующий вторую длину волны для наблюдения за атмосферой (например, 1 064 нм для поверхности и 532 нм для атмосферы). В этом случае лидарный альтиметр функционирует как обычный лидар обратного рассеяния.

Как и любой другой альтиметр, лидарный альтиметр требует исключительно точного определения орбиты, поскольку базовое измерение дальности позволяет получить расстояние до объекта от спутника на орбите. Высокоточное определение орбиты достигается благодаря приемнику ГСОМ и лазерному определению дальности от сети наземных станций с системой ретрорефлектометров до спутника.

Области применения лидарного альтиметра включают:

a) толщину морского льда и топографию полярной шапки;

b) уровень моря и динамическую топографию океана;

c) вклад в углубление знаний о геоиде;

d) топографию поверхности суши, включая ледники и озера;

e) свойства поверхности;

f) профиль аэрозоля и свойства аэрозоля;

g) высоту верхней границы облаков, оптическую толщу тонких облаков и нижнюю границу полупрозрачных облаков;

h) полярные стратосферные облака;

i) атмосферные неоднородности, такие как планетарный пограничный слой с облаками по верхней границе;

j) экосистема — высота и структура леса.

Лидар дифференциального поглощения

Метод ЛДП использует сигналы обратного рассеяния Рэлея и Ми в атмосфере от адаптивного одночастотного импульсного лазера для прямого измерения продольных профилей микроконцентраций газов в атмосфере. Два или более спектрально близких лазерных импульса передаются в атмосферу почти одновременно (с интервалом в 0,2—1 мс) с одним импульсом, настроенным на центр или крыло линии поглощения газа, и другим, настроенным на менее поглощающий участок спектра. Интервал между двумя или более передаваемыми длинами волн обычно составляет <1 нм для минимизации смещений, возникающих из-за разниц коэффициентов обратного рассеяния в атмосфере. Получение профилей концентрации газа обеспечивается методом ЛДП, который использует дифференциальное затухание сигналов обратного

рассеяния между поглощающими и непоглощающими длинами волн в сочетании с априорным знанием дифференциального спектра поглощения с элементом разрешения по дальности ΔR. Учитывая малый размер временного и спектрального интервала между парой(-ами) импульсов включения и выключения (≤1 мс и <1 нм, соответственно), можно предположить, что константы прибора и объемные коэффициенты рассеяния в атмосфере в промежутке между отраженными атмосферными сигналами в режиме онлайн и офлайн постоянны. В результате, воздушные и космические ЛДП способны обеспечить высокоточные измерения малых газовых примесей по всей тропосфере, поскольку они самокалибруются и не подвержены отклонениям, возникающим из-за помех от аэрозолей и облачности. Устоявшийся и проверенный временем метод ЛДП используется для бортовых измерений профилей водяного пара и озона на протяжении десятилетий. Эти воздушные прототипы продемонстрировали, что метод ЛДП является единственным жизнеспособным подходом в использовании дистанционного зондирования для получения реальных профилей малых газовых примесей с высоким пространственным разрешением от верхней тропосферы до планетарного пограничного слоя. Несмотря на то, что его можно легко развернуть с самолета, внедрение ЛДП космического базирования до сих пор не состоялось из-за ограничений в масштабируемости и эффективности импульсных лазеров, а также доступности эффективных детекторов, чувствительных к единичным фотонам. Несколько программ НАСА и ЕКА в настоящее время развивают технологии, необходимые для проведения методом ЛДП измерений водяного пара из космоса в течение следующего десятилетия.

Реализация метода ЛДП для профилирования из космоса малых газовых примесей в атмосфере требует достаточного атмосферного рассеяния и чувствительности обнаружения. Для измерений концентрации газа в условиях, когда соответствующие интенсивности линий поглощения лежат за пределами ближней инфракрасной области оптического спектра, а атмосферное рассеяние и эффективность детектора ограничены, можно использовать вариант метода ЛДП, метод интегрированного пути дифференциального поглощения (IPDA), для измерения взвешенной концентрации газа в столбе с помощью сильных поверхностных эхосигналов. Проведение высокоточных и точных измерений CH_4 и CO_2 методом IPDA было недавно продемонстрировано с самолета. МЕРЛИН, исследовательская программа под руководством Немецкого института аэрокосмических исследований (ДЛР) и Национального центра космических исследований Франции (CNES), находится в стадии разработки и призвана продемонстрировать осуществимость измерений CH_4 методом IPDA из космоса. Программы развития технологий, необходимых для проведения измерений CO_2 методом IPDA из космоса, существуют и в Азии.

В качестве примеров можно привести следующие области применения ЛДП и IDPA:

a) ЛДП H_2O с использованием полос поглощения в спектральных областях 820 нм и 935 нм;

b) ЛДП O_3 с использованием континуума поглощения в спектральной области 290—320 нм;

c) IDPA в столбе CO_2 с использованием линий на 1,57 мкм в окне 1,6—1,7 мкм или в окне 2,0—2,3 мкм;

d) IPDA в столбе H_2O с использованием линий в спектральной области 1,65 мкм.

2.3 КОСМИЧЕСКИЙ И НАЗЕМНЫЙ СЕГМЕНТЫ

Наблюдение из космоса предполагает использование сложной системы, состоящей из (i) космического сегмента для выполнения наблюдений, и (ii) наземного сегмента для управления космическим сегментом, обработки и распространения данных наблюдений.

2.3.1 **Космический сегмент**

Космический сегмент спутниковой системы включает в себя:

a) платформу (также называемую платформой спутника);

b) бортовые приборы;

c) средства связи для получения команд и передачи выходных данных приборов на землю.

Спутники для наблюдения за Землей могут иметь размер/массу в пределах двух порядков величины:

a) наноспутники: 1—10 кг (фактически их использование для оперативных наблюдений за Землей маловероятно);

b) кубосат: класс наноспутников, состоящих из множества кубических блоков размером 10 см × 10 см × 10 см, каждый из которых имеет массу не более 1,33 кг;

c) микроспутники: 10—100 кг;

d) миниспутники: 100—500 кг;

e) малые спутники: 500—1 000 кг;

f) спутники среднего размера: 1—2 тонны;

g) крупные изделия: > 2 тонн.

2.3.1.1 ***Обслуживающие платформы***

Спутниковая платформа обеспечивает возможности размещения приборов и предоставляет несколько видов обслуживания:

a) энергоснабжение для приборов, средств телесвязи и всех прочих спутниковых подсистем;

b) навигационные возможности для географической привязки наблюдений;

c) управление положением в пространстве для корректной ориентации приборов и стабилизации;

d) обеспечение теплового режима для обеспечения заданных условий для функционирования приборов;

e) устройства проверки функционирования для мониторинга и контроля состояния спутниковых подсистем;

f) двигатели для сохранения орбиты, и, если необходимо, изменения орбиты;

g) технические возможности для осуществления контроля за различными подсистемами платформы;

h) возможности обработки для работы с передаваемыми приборными данными и потоками данных в определенных форматах;

i) устройства хранения бортовых записей глобальных данных;

j) средства связи для получения команд с земли;

k) средства связи для передачи данных наблюдений и данных о состоянии станции на землю;

l) другие услуги связи, когда платформа выполняет только функцию ретрансляции данных.

2.3.1.2 *Системы навигации и местоопределения*

Системы навигации и местоопределения необходимы для геопривязки наблюдаемых данных, как в процессе съемки, так и впоследствии для обработки данных на земле. При этом используются следующие системы:

a) лазерные ретрорефлектометры;

b) приемники ГНСС;

c) системы радиоместоопределения;

d) оборудование слежения за звездами.

Лазерные ретрорефлектометры

Эти устройства представляют собой зеркала, которыми обычно являются уголковые отражатели. Они отражают лазерные лучи, посылаемые во время сеансов местоопределения на спутник из наземных пунктов, имеющих лазерное оборудование. Лазерные ретрорефлектометры используются на многих спутниках для точного определения орбиты по факту. Оно достигается путем пост-процессинга ряда измерений исключительно в ночное время и при безоблачном небе. Проводимый анализ предусматривает целую сеть скоординированных наземных станций. Получаемые результаты достаточно немногочисленны и поступают с задержкой. Однако они являются настолько точными, что могут использоваться для целей космической геодезии.

Системы радиоместоопределения

Данные системы специально спроектированы в поддержку задач альтиметрии. Они охватывают радиосвязь между спутником, с одной стороны, и наземными станциями передачи и/или получения сигнала, с другой. Определение местоположения выполняется в масштабе времени, близком к реальному, и отличается повышенной точностью после пост-процессинга. Двумя примерами таких систем являются:

a) Интегрированная спутниковая система доплеровской орбитографии и радиолокационного местоопределения (DORIS), измеряющая доплеровский сдвиг сигналов с наземных станций;

b) оборудование для точного определения дальности и скорости изменения дальности (PRARE), измеряющее дифференциальные сигналы от сети наземных станций.

Приемники ГНСС

Данные системы используют сдвиг фазы сигналов от нескольких спутников Глобальной навигационной спутниковой системы (ГНСС). ГНСС включает в себя навигационные группировки спутников США (ГСОМ), Российской Федерации (ГЛОНАСС), Европейского

союза (Galileo) и Китая (Compass, называемая в Китае Beidou). Большое количество спутников в настоящее время использует приемники ГНСС для поддержки своей навигации. Определение местоположения осуществляется в реальном масштабе времени.

Оборудование слежения за звездами

К таким приборам относятся формирователи изображений приборов с зарядовой связью, которые следят за яркими звездами, распознают их рисунок и посылают информацию в систему управления ориентацией спутника. Приборы слежения за звездами обеспечивают непрерывный мониторинг положения спутника, причем с гораздо большей точностью, чем системы на основе зондирования горизонта. Это требуется для приборов, которым нужна точная информация об ориентации (например лимбовым зондировщикам), как для активного управления ориентацией во время полета, так и для последующей обработки данных прибора. Все большее количество спутников сегодня оборудованы приборами слежения за звездами.

2.3.1.3 *Ориентация и стабилизация*

Системы ориентации и стабилизации являются важнейшими элементами платформы, которые определяют возможности наведения приборов.

Ориентация стороны платформы, на которой размещены датчики, в идеале должна сохраняться в сторону поверхности Земли, если только программа спутника не предусматривает другие цели (такие как мониторинг Солнца). Поскольку платформа во время своего движения по орбите сохраняет постоянную ориентацию в отношении звезд, необходим механизм стабилизации.

Самым простым (пассивным, инерционным) механизмом стабилизации является вращение. Ось вращения имеет постоянную ориентацию относительно звезд, поэтому она не выполняет требования ориентации относительно Земли. Для спутников на ГСО ось вращения может быть задана параллельно оси вращения Земли, и таким образом поверхность Земли будет сканироваться лишь небольшую часть времени (около 5 % времени обращения спутника) при каждом вращении спутника. Для орбитальных станций на низкой орбите ориентация оси вращения может быть задана специально таким образом, чтобы дать возможность прибору быть ориентированным в сторону поверхности Земли какую-то часть времени. В любом случае стабилизация вращением приемлема, только если радиометрический баланс прибора достаточен для выполнения измерений, для которых инструмент был спроектирован, несмотря на небольшую долю полезного времени наблюдения. Кроме того, стабилизация вращением может быть выполнена только для одного или весьма небольшого количества приборов на одной платформе.

Трехосная стабилизация гораздо больше подходит для поддержания постоянной ориентации по направлению к Земле и обеспечивает функционирование большего количества приборов на одной платформе. Это создает возможности для активного управления ориентацией спутника в отношении вращений вокруг оси, перпендикулярной орбитальной плоскости (тангаж); оси, касательной к мгновенному движению по орбите (крен), и направления в надир (рыскание).

Активное управление имеет принципиально важное значение, поскольку оно означает высокоточное определение положения (на основе, к примеру, визирования линии горизонта, с помощью приборов слежения за звездами или приемников ГНСС) и эффективные исполнительные механизмы (такие как микро-двигательные установки, гироскопы, точные детекторы изменения угла и эффективная управляющая электроника). Утрата активного управления является одной из основных причин неудачных полетов. Активное управление может повлиять на качество данных вследствие ограниченной точности, в частности в случае приборов с высоким разрешением и высоких орбит (ГСО), и механических возмущений в ориентации прибора, связанных с включением приводных механизмов.

Помимо основных систем ориентации и стабилизации (вращение и трехосный контроль) используются также интеллектуальные системы управления ориентацией, особенно на малых спутниках. Например, в гравитационно-градиентной системе используется длинная штанга, которая имеет направление в надир, что позволяет постоянно ориентировать одну сторону платформы в направлении поверхности Земли.

2.3.1.4 ***Система проверки функционирования спутника***

Важнейшая задача при проектировании спутников заключается в том, чтобы взаимно увязать функциональные возможности, которые устанавливаются на борту спутника, с функциями, которые можно обеспечить на земле при условии, что имеется достаточное количество информации о бортовых характеристиках. Размещение аппаратуры на борту спутника может дорого стоить, она может давать отказы, не подлежать восстановлению и иметь ограниченную работоспособность. Поэтому целесообразнее резервировать установку аппаратного обеспечения только на те случаи, когда это абсолютно необходимо и в разумной степени надежно. Более того, система, отслеживающая состояние спутника, дает всю дополнительную информацию, необходимую для правильной обработки данных на земле.

Система проверки функционирования спутника обеспечивает контроль как за состоянием платформы (деформации, температура излучающей поверхности, высота, состояние электрогенерирующих установок и всех других подсистем), так и за состоянием приборов (состояние и температура различных деталей, контрольные сигналы электроники и т. п.). Как правило, проверка состояния прибора, по крайней мере частично, заложена в самом приборе.

Объем и полнота проверки функционирования систем являются тем признаком, по которому спутники относят к различным классам. Спутники оперативного типа оборудованы большим количеством устройств проверки функционирования для мониторинга подсистем и возможной инициации восстановительных маневров (таких как переключение на резервные устройства). Информация, полученная в ходе проверки функционирования, является основным элементом для точной калибровки прибора и географической привязки данных.

Несмотря на важность наличия хорошей системы проверки функционирования, существуют ограничения по точности, которой можно добиться путем использования программной обработки. Ошибки, не устранённые после корректировок с помощью программного обеспечения или реконструкций, могут быть больше допустимых для конкретного применения. Поэтому некоторые корректировки могут проводиться только на основе бортовой аппаратуры.

2.3.1.5 ***Передача данных***

Платформа должна передавать на землю результаты наблюдений различных приборов. Какой бы ни была высота спутника над поверхностью Земли, радиосигналам, передаваемым на Землю, необходимо пройти через ионосферу и плазмосферу, которые блокируют распространение электромагнитных волн с частотой ниже, чем критическая частота плазмы (~25 МГц). Требуется прямая видимость между передатчиком и приемником на спутнике и на наземной станции.

Самый простой принцип получения наблюденных данных со спутника — это прямая трансляция в режиме реального времени. Для спутников, находящихся на низких околоземных орбитах (НОО), наземная станция будет получать все данные, которые спутник передает при прохождении зоны радиовидимости. Размер зоны радиовидимости будет один и тот же для FOV спутника с зенитным углом $\zeta = 90°$ (в принципе) или с углом $\zeta = 85°$ (с уменьшенной степенью риска помех от наземных источников или

орографической окклюзии). Из таблицы 2.1 видно, что для высоты спутника 800 км, к примеру, зона радиовидимости представляет собой окружность диаметром 5 000 км (для $\zeta = 85°$ или высоты = 5°).

В случаях, когда скорость спутника находится в пределах 400 км/мин и маршрут спутника проходит по центру над станцией приема данных, сеанс передачи сигнала длится самое большее 15 минут и уменьшается до нескольких минут при периферийных проходах.

Такой приём сигнала наиболее удобен, поскольку пользователю передаются наблюденные данные в реальном времени для незамедлительной обработки. Однако локальной приемной станцией могут быть получены только данные, наблюдённые и переданные во время прохождения спутника внутри зоны приема сигналов. Для ГСО прямая трансляция может непрерывно осуществляться на станцию, расположенную в рамках FOV.

Альтернативным способом получения данных со спутников, находящихся на НОО, является хранение данных наблюдений на борту спутника и передача данных по команде, когда спутник пролетает над центральной приемной станцией. Центральная станция, которая также используется для отправки команд на спутник, имеет такой же диапазон радиовидимости, что и любая локальная станция. Если она расположена на высоких широтах, то центральная станция может получать данные со многих орбит. Как показано в таблице 2.4, большинство солнечно-синхронных орбит проходят менее чем в 10° от полюса, так что центральная станция, расположенная на широте, к примеру около 80°, будет пересекать все орбиты и обеспечит прием глобальных данных. Сбор данных по принципу «хранение и сброс» данных имеет преимущество в том, что позволяет восстанавливать данные для всего земного шара, однако он имеет также ряд недостатков:

a) доступ к данным обеспечивается медленнее, поскольку задержка складывается из времени, которое необходимо для прохождения всей орбиты (до 100 мин); для получения данных на центральной станции (около 10 мин); их ретрансляции на центральный пункт обработки данных (около 10 мин), а также для перераспределения и доведения данных до абонентов (около 10 мин). Как следствие, общая задержка в доступности данных составляет 2–3 часа;

b) спутник должен передавать данные, накопленные за одну орбиту (около 100 мин) в течение времени, проведенного в пределах зоны радиовидимости центральной станции (примерно 10 мин). Поэтому скорость передачи данных и ширина полосы должны быть на один порядок величины больше, чем при прямом считывании данных, что сильно влияет на стоимость, размеры и сложность станции. Такой режим передачи данных соответствует требованиям спутникового оператора, но обычно не удобен для отдельного пользователя;

c) существуют приборы с такой высокой скоростью передачи данных, что они не могут в полном объеме храниться на борту спутника: может потребоваться отбор данных, подлежащих хранению, либо за счет понижения разрешения, либо путем предварительного отбора кадров (например, локальный охват района (ЛОР) — режим на полярно-орбитальных спутниках НУОА для наблюдения за окружающей средой (POES)).

Если не налажено получение данных на локальном уровне в реальном масштабе времени, то данные, которые собирает центральный пункт обработки данных, должны быть ретранслированы пользователям, как правило, после предварительной обработки. В случае геостационарных спутников ретранслятор на том же спутнике может быть использован для ретрансляции данных на локальные станции пользователей.

Для спутников, находящихся на НОО, в промежутке между двумя крайними ситуациями (прямое считывание, позволяющее иметь данные над ограниченным районом в реальном

масштабе времени, или хранение до момента сброса глобальных данных с задержкой 2–3 часа) существуют альтернативные или взаимодополняющие схемы восстановления данных, которые могут использовать:

a) несколько станций с передачей данных «вниз», разбросанных по земному шару, в том числе по одной станции вблизи каждого полярного региона; это позволяет сократить время хранения данных на борту космического аппарата;

b) сеть станций прямого считывания, разбросанных по земному шару, каждая из которых принимает данные по ограниченному району и ретранслирует их в центры данных, уменьшая тем самым задержку в доступности данных до нескольких десятков минут, правда при этом не обязательно обеспечивается глобальный охват;

c) спутник ретрансляции данных. который получает данные в реальном режиме времени от платформ наблюдения и ретранслирует их в центральный пункт обработки данных, что уменьшает задержку в наличии данных до нескольких минут.

Своевременность восстановления данных являются важнейшим вопросом для оперативных спутников; это особенно актуально для метеорологии, в силу одновременно существующих требований к оперативности и глобальному охвату. Для научно-исследовательских и опытно-конструкторских применений требование к оперативности не такое строгое, поэтому режим хранения данных до момента сброса является стандартной практикой, которая также предусматривает наличие эффективных средств архивирования и поиска, что предполагает высокий уровень сопровождения данных.

2.3.1.6 ***Услуги по сбору данных***

Помимо предоставления данных наблюдений Земли с платформы на орбите, спутники могут поддерживать другие виды обслуживания, действуя как ретрансляторы телесвязи. Наиболее часто предоставляются следующие виды услуг:

a) сбор данных *in situ* от платформ, размещенных на поверхности земли, воздушном судне, шаре-зонде, буях, судах или даже мигрирующих животных. Платформа сбора данных (ПСД) может передавать данные непрерывно или через установленные интервалы, или при получении запроса со спутника. Мобильные платформы могут быть обнаружены со спутника, если он находится на НОО. Спутники на ГСО могут обслуживать ПСД в пределах их прямой видимости (региональные) или ПСД, переносимые мобильными платформами (корабли, воздушные суда и т. п.), которые перемещаются в зоне обзора различных спутников на ГСО (международных);

b) поисково-спасательные операции, в ходе которых спутники обнаруживают сигналы бедствия от передающих устройств, имеющихся у нуждающихся в помощи. Затем просьбы о помощи ретранслируются в один из центров всемирной поисково-спасательной сети. Поисково-спасательное бортовое оборудование располагается на ряде действующих метеорологических спутников, находящихся на НОО и ГСО. Обслуживание, предоставляемое НОС, называется Спутниковая поисково-спасательная система слежения (САРСАТ), в то время как обслуживание на основе ГСО называется Геостационарный ретранслятор поисково-спасательной службы (ГЕОСАР);

c) ретрансляция метеорологической информации от метеорологических центров конечным пользователям в режиме радиовещания или выбранным центрам в зоне обзора спутника на ГСО. Функция связи «наверх» может выполняться центральным узлом системы или быть передана вспомогательным станциям, находящимся невдалеке от центра производства информации, имеющего оборудование для передачи сигналов с земли на спутник.

2.3.2 **Наземный сегмент**

В наземный сегмент спутниковой системы входят:

a) центральная станция спутникового управления и сбора глобальных данных;

b) периферийные станции для приема данных;

c) центры управления полетами и операциями;

d) центры обработки и архивирования данных;

e) системы распространения данных и продукции.

2.3.2.1 ***Центральная станция управления и сбора глобальных данных***

Этот компонент наземного сегмента может быть в широком смысле обозначен как станция управления и сбора данных (СУСД). Типичными задачами СУСД являются:

a) получение последовательности команд от центра управления полетами и передача команд на спутник (в отношении конфигурации полезной нагрузки, конфигурации спутников, контроля орбиты и т. п.);

b) прием телеметрических данных со спутника (для ориентации и определения орбиты, состояния спутника и полезной нагрузки и т. п.) и их незамедлительная передача в центр(ы) управления полетом;

c) прием геофизических и вспомогательных данных (связанных с проверкой функционирования, калибровкой и т. д.) и их передача в центры обработки и архивации данных;

d) дополнение полученных потоков данных информацией о точном времени и элементах орбиты.

Геостационарные спутники могут иметь только одну основную СУСД. Для спутниковых систем на околополярной орбите можно избежать слепых орбит путем размещения СУСД на очень высокой широте (например, Свальбард на 78° с.ш.). Две полярные СУСД являются базовыми станциями для программ НУОА, EBMETCAT и КМУ. Для орбит с низким наклонением необходима целая сеть СУСД, одна из которых будет главной СУСД.

СУСД использует для управления спутниками частоты в S-диапазоне (около 2 100 МГц). S-диапазон почти не чувствителен к погоде и не настолько критичен для точности наведения. Для приема геофизических данных используется L-диапазон (около 1 700 МГц), если скорость передачи данных менее 10 Мбит/с, или же X-диапазон (около 8 ГГц) при скорости передачи данных до 100 Мбит/с, или K_a-диапазон (около 26 ГГц) при скорости передачи данных в сотни Мбит/с.

2.3.2.2 ***Центры управления полетами и операциями***

Эти компоненты в общем плане могут называться центрами управления полётами (ЦУП). В их задачи входит:

a) прием информации о спутнике, полезной нагрузке и текущем положении орбиты из СУСД и (в отношении орбиты только) с других станций, измеряющих дальность;

b) сбор требований к конфигурации полезной нагрузки, планированию последовательности измерений, поступающих из центров обработки и архивации данных и от других пользователей, уполномоченных на внесение заданий в план полета спутника;

c) анализ информации о спутнике, полезной нагрузке и состоянии орбиты, а также требований к конфигурации полезной нагрузки/программы полета; подготовка отчетов мониторинга работоспособности приборов; разработка плана операций и передача команд в СУСД для их дальнейшей передачи на спутник;

d) предоставление в центры обработки и архивации данных дополнительной информации, которая касается обработки данных и была получена в ходе деятельности по управлению операциями, полезной нагрузкой или программой полета (включая точное определение орбиты, изменения в ориентации спутника и состоянии полезной нагрузки).

Центры управления полетами тесно связаны с пользователями, центрами практического применения и научными коллективами. ЦУП тесно связаны с СУСД и подразделениями, отвечающими за разработку спутника. В их распоряжении также имеется вся необходимая информация об особенностях проекта спутника. Эти два центра часто совмещены, хотя и не обязательно, и по возможности имеют поддержку со стороны резервного центра.

2.3.2.3 ***Центры обработки и архивации данных***

Эти компоненты отвечают за:

a) прием геофизических, калибровочных и выборочных дополнительных данных от СУСД;

b) прием дополнительных данных об орбите, спутнике и полезной нагрузке от ЦУП;

c) мониторинг калибровки приборов и выполнение взаимной калибровки, по мере необходимости;

d) создание и контроль качества различной продукции;

e) архивирование всей продукции;

f) распространение выборочной продукции;

g) анализ программы полета и состояния полезной нагрузки, и требований к планированию программы полета;

h) передача в ЦУП требований, относящихся к полезной нагрузке и управлению программой полета.

Созданием основных видов продукции обычно занимается спутниковый оператор в центральном учреждении. Внешние специализированные центры могут дополнять эти виды продукции путем обработки прочих видов конкретной продукции.

Архивация спутниковых данных требует поддержания высоких уровней доступности аппаратного обеспечения для внесения, обработки и хранения данных, а также услуг обнаружения и извлечения, при этом должна быть предусмотрена возможность долговременного сохранения данных на протяжении десятилетий. Данные должны быть связаны с соответствующими метаданными, содержащими всю информацию, необходимую для использования и оценки данных. Полные, стандартизированные метаданные, а также стандартизированные и функционально совместимые в мировом масштабе системы каталогов позволяют расширить возможности поиска данных до всемирного масштаба в рамках Информационной системы ВМО.

2.3.2.4 ***Распространение данных и продукции***

В зависимости от объемов данных и требований оперативности информации существуют несколько методов получения доступа к данным и продукции:

a) Прямое получение данных со спутника (когда есть такая возможность, особенно в случае с низкоорбитальными спутниками). Это обеспечивает наилучшую оперативность, но предполагает способность технических средств получать необработанные данные на соответствующей станции приема и обеспечивать их предварительную обработку при помощи соответствующего пакета программного обеспечения.

b) Повторная передача данных со спутника в режиме времени, близком к реальному, после предварительной или полной обработки на земле. Для спутников, находящихся на ГСО, ретрансляция может осуществляться тем же самым спутником. Сегодня ретрансляция успешнее всего осуществляется по каналам коммерческих спутников телесвязи, таких как система GEONETCast, которая состоит из трех скоординированных обслуживающих сервисных центров: EUMETCast (Европейской организации по эксплуатации метеорологических спутников), CMACast (Китайского метеорологического управления) и GEONETCast-Americas (НУОА). ЯМА содержит многофункциональный транспортный спутник Himawari-Cast. При использовании такого подхода услуги по рассылке могут быть оптимизированы в рамках наземного сегмента с учетом различных существующих программ и источников продукции, независимо от проектных ограничений любого конкретного спутника.

c) Повторная передача данных со спутника в режиме времени, близком к реальному, через специализированные сети, такие как Глобальная система телесвязи ВМО.

d) Распространение данных авторизованными оперативными пользователями в режиме, близком к реальному времени, из центров обработки данных.

e) Центры обработки данных в эпоху «больших данных» также способны передавать данные в реальном времени в облачные вычислительные службы для дополнительной обработки, архивирования и поиска продукции сообществом пользователей. Поставщики облачных услуг обеспечивают прямую компьютерную обработку данных без необходимости их дальнейшего распространения, при этом данные становятся более доступными.

f) Активный поиск данных не в реальном масштабе времени с использованием функции поиска данных FTP из центров данных, особенно из архивов.

Распространение данных и продукции может регламентироваться определёнными условиями, в зависимости от статуса и политики в области данных космического агентства, отвечающего за программу (оперативную, НИОКР и коммерческую), а также от характера их использования. Доступ к услугам повторной передачи данных обычно зашифрован и требуется регистрация, даже если оплата за это не взымается.

2.3.2.5 ***Принимающие станции пользователей***

Для того, чтобы более успешно использовать передачу данных со спутников в режиме реального времени или близком к реальному времени, создаются станции пользователей. В зависимости от доступности спутника и потребностей пользователей это могут быть:

a) станции высокоскоростного приема данных для получения всей информации, которая может быть предоставлена в открытом доступе или по соглашению с владельцем спутника;

b) станции низкоскоростного приема данных для отбора данных, имеющих меньший объем или более низкое качество;

c) принимающие терминалы коммерческих спутников телесвязи, используемые для распространения данных после предварительной обработки или обработки в центре обработки и архивации данных.

Частоты, которые используются станциями высокоскоростного приема данных, лежат в X-диапазоне (около 8 ГГц), который используется для скоростей передачи данных до 100 Мбит/с. Станции низкоскоростного приема данных используют относительно низкие частоты (L-диапазон: около 1 800 МГц для ГСО). Терминалы коммерческих спутников телесвязи используют K_u-диапазон (около 11 ГГц) или C-диапазон (около 3,8 ГГц).

2.3.2.6 ***Уровни обработки продукции***

Результаты спутниковых наблюдений извлекают из необработанных данных, полученных при помощи приборов, на основе использования цепочки обработки данных. Обычно для обозначения используют различные уровни обработки данных, конкретные формулировки которых зависят от рассматриваемого прибора. В таблице 2.11 представлено общее описание этих уровней обработки данных.

Уровень 0. Обработка данных осуществляется из потока необработанных данных путем удаления артефактов связи (таких как кадры синхронизации и заголовки сообщений) и добавления всех необходимых вспомогательных данных, включая информацию о проверке состояния систем и приборов и информацию, добавленную станцией о времени и слежении. Данные уровня 0 подлежат долговременной архивации для того, чтобы была возможность повторной обработки с использованием более совершенной модели прибора (к примеру, улучшение калибровки или географической привязки).

Уровни 1a или 1.0. Данные представляют собой приборные файлы (значения счета) в исходном виде, полученном прибором, с приложенной (но без применения) деформационной матрицей или алгоритмом для географической привязки, а также с калибровочными коэффициентами. Процесс с уровня 0 до уровня 1a/1.0 полностью обратимый. Данные уровня 1a/1.0 обычно подлежат долговременной архивации, хотя в принципе они могут быть воспроизведены, если данные уровня 0 были заархивированы.

Уровни 1b или 1.5. Данные состоят из откалиброванных, совместно зарегистрированных данных с определением географического местоположения в физических единицах (обычно интенсивность излучения), по-прежнему в исходном виде, полученном прибором. Процесс от уровня 1a/1.0 до уровня 1b/1.5 не является обратимым из-за

Таблица 2.11. Общая характеристика уровней обработки данных (требуется адаптация к конкретному прибору)

Уровень	*Описание*	
0	Данные прибора или дополнительные данные, восстановленные из необработанных спутниковых данных после удаления артефактов связи.	
1	Данные прибора извлечены, с полным исходным разрешением и информацией о калибровке.	1a (для НОО) или 1,0 (для ГСО): материалы калибровки и определение местоположения прикладываются, но не применяются.
		1b (для НОО) или 1,5 (для ГСО): калибровка и определение местоположения применяются.
		1c, 1d, и т. д.: по выбору для конкретных приборов.
2	Геофизическая продукция, полученная от одного прибора в исходной проекции.	
3	Геофизическая продукция от одного прибора, отображаемая в равномерном пространстве и масштабах временных отсчетов и, по возможности, полученная на нескольких орбитах (для НОО) или для различных временных периодов (для ГСО). Необратимый процесс вследствие процедур повторной выборки.	
4	Смешанная продукция нескольких датчиков и/или нескольких спутников, или результат модельного анализа.	

усечения, дискретизации и повторной выборки. Хотя уровень 1b/1.5 может в любом случае быть получен обработкой из уровня 1a/1.0 или уровня 0, работа по обработке столь значительна, что в основном данные уровня 1b/1.5 подлежат долговременной архивации.

Уровень 1c. Данные обрабатываются из данных уровня 1b определённых приборов для того, чтобы позволить их использование конечными пользователями. Процесс может быть полностью обратимым (например спектры интерферограмм Фурье-преобразования) или в то же время нет (например аподизированные спектры). Как правило, осуществляется долговременная архивация. Для некоторых приборов могут быть определены дополнительные шаги уровня 1 (1d, 1e и т. п.) (например добавление метки облака).

Обработка данных уровня 0 и уровня 1 осуществляется спутниковым оператором. В случае прямого считывания спутниковый оператор обычно обеспечивает доступность пред-процессингового программного обеспечения уровня 0 и уровня 1 для локальных пользователей данных.

Продукция уровня 2 генерируется из данных уровня 1 путем применения алгоритмов с ограниченным использованием внешней информации. Информация о качестве данных предоставляется дополнительно. Эта продукция генерируется в исходной проекции, полученной прибором, и обычно подлежит долговременной архивации.

Продукция уровня 3 генерируется путем составления последовательности из продукции уровня 2 с последовательных орбит (при НОО) или для последовательных моментов времени (при ГСО). Возможные пробелы в последовательности могут быть заполнены интерполяцией. Вследствие процедур повторной выборки, вытекающей из картирования в однородном пространстве и временных сетках, уровень 3 является необратимым процессом. Продукция генерируется не в реальном времени спутниковыми операторами или конечными пользователями; она обычно подлежит долговременной архивации.

Продукция уровня 4 создается путем объединения данных от различных приборов одного или различных спутников, либо от других источников данных, или путем усвоения в модели. В продукции уровня 4 вклад отдельно взятого спутникового прибора может быть трудно распознаваем.

СПРАВОЧНАЯ И ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ЛИТЕРАТУРА

August, T.; Klaes, D.; Schlüssel, P. et al. IASI on Metop-A: Operational Level 2 Retrievals after Five Years in Orbit. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer* **2012**, *113* (11), 1340–1371. https://doi.org/10.1016/j.jqsrt.2012.02.028.

Källén, E. Special Issue with Manuscripts Related to ESA's Atmospheric Dynamics Mission/Aeolus. *Tellus A: Dynamic Meteorology and Oceanography* **2008**, *60* (2), 189–190, https://doi.org/10.1111/j.1600-0870.2007.00296.x.

Susskind, J.; Blaisdell, J. M.; Iredell, L. Improved Methodology for Surface and Atmospheric Soundings, Error Estimates, and Quality Control Procedures: The Atmospheric Infrared Sounder Science Team Version-6 Retrieval Algorithm. *Journal of Applied Remote Sensing* **2014**, *8* (1), 1–34. https://doi.org/10.1117/1.JRS.8.084994.

ГЛАВА 3. ПРИБОРЫ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ

В настоящей главе представлен обзор основных принципов приборов. В нем приводятся общие технические характеристики моделей типовых приборов наблюдения за Землей.

3.1 ОСНОВНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПРИБОРОВ

Для наблюдения за Землей используются различные приборы и принципы зондирования. Главными рассматриваемыми характеристиками в данной главе являются:

a) сканирование, шаг-статичный кадр, полоса захвата и цикл наблюдения;

b) спектральный диапазон и разрешение;

c) пространственное разрешение (IFOV, пиксель, размер пикселя по земной поверхности (GSD), угловое расстояние между пикселями (ASD), функция передачи модуляции (MTF));

d) радиометрическое разрешение.

3.1.1 Сканирование, шаг-статичный кадр, полоса захвата, цикл наблюдения

Наиболее важной характерной особенностью прибора является то, каким образом он сканирует местность для получения необходимых данных наблюдений. Это зависит от типа орбиты (геостационарная или негеостационарная орбита), контроля ориентации платформы (вращение или трехосная стабилизация), конструкции прибора, а также в некоторых случаях от конкретного вида производимых измерений. В настоящей главе будут описаны только наиболее распространенные методы сканирования.

Сканирование означает движение линии прямой видимости (ЛПВ) прибора над местностью, представляющей интерес, во время сбора данных. Данные, собранные во время сканирования, называются полосой захвата. Перемещение от одной части местности к другой без сбора данных называется прогоном. Статичный кадр — это особое подмножество сканирования, при котором отсутствует движение ЛПВ относительно местности. Переход от одного статичного кадра к другому часто называют шагом.

Определяющим условием для сканирования является необходимость вести съемку участка непрерывно (получение изображений) или выборочно (зондирование). В обоих случаях может использоваться похожий режим сканирования. Однако, только получение изображения требует постоянного покрытия местности, а зондирование допускает выборку с пропусками.

К негеостационарным орбитам относятся все орбиты, на которых поверхность Земли движется относительно космического аппарата. Они включают НОО, умеренно эллиптическую орбиту (УЭО) и ВЭО. Наиболее распространенными являются НОО.

На негеостационарных орбитах двухмерное сканирование земного участка может быть основано на использовании движения спутника вдоль трассы. Тогда сканирование поперек трассы может быть обеспечено вращающимся сканирующим зеркалом (рисунок 3.1). Для получения изображений скорость вращения синхронизируется с движением спутника таким образом, что линии изображения поперек трассы перекрываются. Другими словами, угловое движение космического аппарата между поворотами сканирующего зеркала равно размеру полосы захвата вдоль трассы.

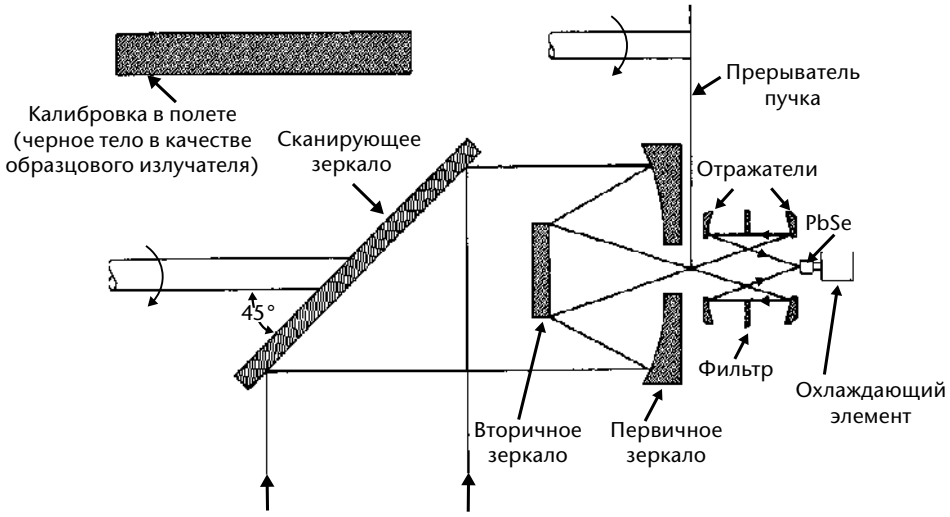


Рисунок 3.1. Типовая схема сканирующего радиометра на НОО

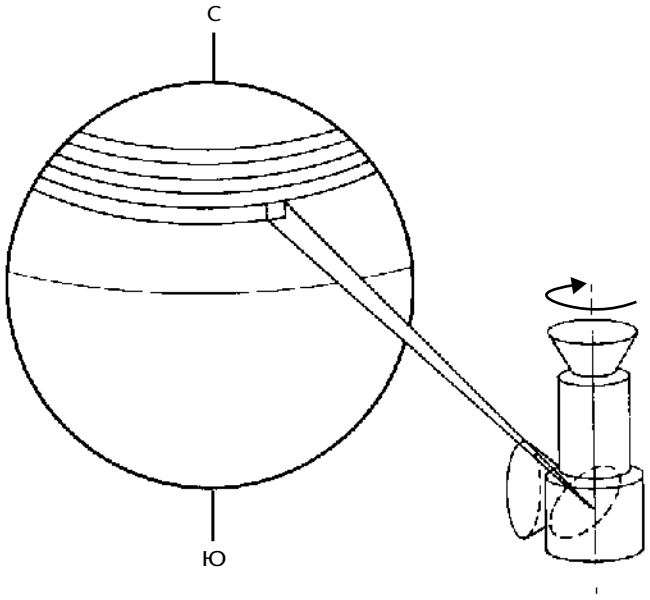


Рисунок 3.2. Схема сканирования с геостационарного спутника со стабилизацией по вращению

В случае ГСО нет движения спутника по отношению к поверхности Земли. Два направления сканирования должны быть поэтому созданы прибором или вращением спутника. На рисунке 3.2 предполагается, что спутник стабилизирован по вращению: западно-восточное сканирование осуществляется посредством вращения спутника, в то время как северно-южное сканирование — шаговым двигателем. Для трехосно-стабилизированной платформы прибор должен обеспечивать движение ЛПВ как с запада на восток, так и с севера на юг.

С появлением матричных детекторов возникли новые возможности сканирования (рисунок 3.3). На низкой околоземной орбите (НОО) линейная антенная решетка может быть расположена поперек трассы спутника и будет сканировать участок местности без какого бы то ни было механического движения (режим сканирования «pushbroom»). По другой схеме линейная антенная решетка может быть расположена параллельно трассе и тогда механическое сканирование поперек трассы будет сканировать несколько линий параллельно (режим сканирования «whiskbroom»). С геостационарной околоземной

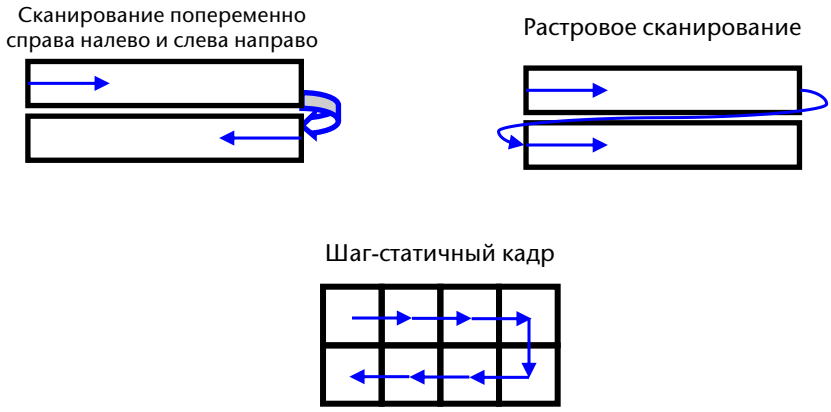


Рисунок 3.3. Схемы сканирования: попеременно справа налево и слева направо, растровые и шаг-статичный кадр

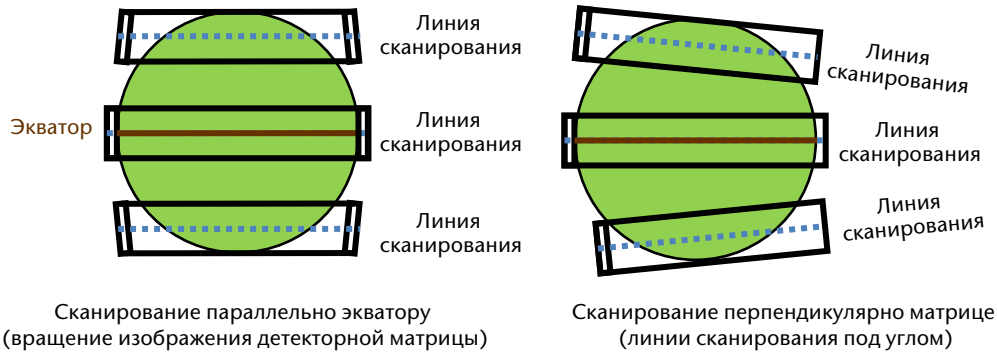


Рисунок 3.4. Однозеркальный бочковидный сканер: сканирование параллельно экватору приводит к повороту изображения детекторной матрицы; для детекторной матрицы может быть нормальным угловое сканирование

орбиты сканирование поперек трассы в настоящее время является стандартным методом. Например, 16-полосный усовершенствованный базовый формирователь изображений (УБФИ) GOES-R сканирует от 322 линий в инфракрасных (ИК) каналах до 1460 линий в канале видимого спектра самого высокого разрешения (ВИД). Для зондирования или получения изображений с помощью двумерной детекторной матрицы на любой орбите можно использовать схему «шаг-статичный кадр».

При использовании большой детекторной матрицы в оптическом приборе необходимо учитывать влияние, которое оказывает сканирование на вращение поля зрения детекторной матрицы, что может усложнить обработку изображений. Существует множество конфигураций сканирующих зеркал. Здесь будут рассмотрены два наиболее распространенных типа: однозеркальный бочковидный сканер и двухзеркальный ортогональный сканер.

При использовании однозеркального бочковидного сканера (как показано на рисунке 3.4), поле зрения детектора поворачивается на угол, равный углу поворота (относительно поля зрения в надире). Когда имеется только один элемент детектора (например, усовершенствованный радиометр очень высокого разрешения (AVHRR)), это вращение не оказывает существенного влияния на изображение, поскольку центр пикселя остается в центре. Однако для линейной или двумерной матрицы этот поворот поля зрения может

иметь важное значение, поскольку при изменении угла сканирования постоянно меняется относительное расположение пикселей. Для приборов ГСО угол сканирования изменяется только на ±4,4 градуса, поэтому для коротких матриц поворот не важен (например, формирователь изображений GOES-15), но может иметь большое значение при длинных матрицах (например, УБФИ GOES-16). Однако для приборов на НОО угол сканирования меняется в пределах более ±54 градусов, что приводит к значительному повороту даже очень коротких детекторных матриц, поэтому в некоторых приборах на НОО однозеркальный бочковидный сканер не используется.

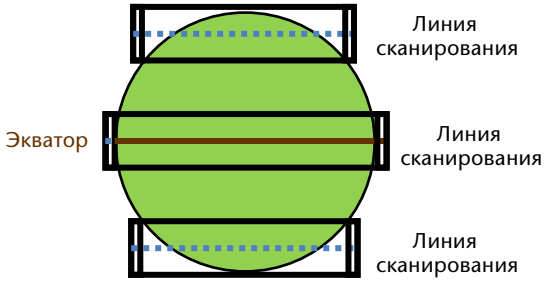
Двухзеркальный ортогональный сканер (рисунок 3.5) обеспечивает более быстрое и адаптивное сканирование вдоль полосы захвата. При такой конфигурации, когда зеркало, расположенное ближе к Земле, регулирует наведение ЛПВ с севера на юг, а зеркало, расположенное ближе к телескопу, регулирует наведение ЛПВ с запада на восток, западно-восточные полосы захвата, идущие параллельные экватору, могут быть получены при любом северо-южном расположении путем установки северо-южного зеркала и последующего изменения положения западно-восточного зеркала.

Очень удобным механизмом для измерений, чувствительных к поляризации, является коническое сканирование (рисунок 3.6). В этой геометрии угол падения является постоянным. Поэтому эффект поляризации не меняется вдоль линии сканирования (т. е. дуги). В то время как при сканировании поперек трассы угол падения меняется вдоль линии сканирования при движении из надира к краю изображения. Такое постоянство эффекта поляризации по изображению очень важно для микроволновых (МКВ) измерений в каналах окна, где излучение, отраженное от таких элементов как поверхность океана, сильно поляризовано. Измерение дифференциальной поляризации дает важную информацию, которую было бы очень трудно использовать, если угол падения изменялся бы по всему участку изображения. Другой интересной особенностью конического сканирования является то, что разрешение остается постоянным по всему изображению.

Недостаток конического сканирования заключается в том, что при выбранном угле падения поле обзора, как правило, не достигает горизонта. Например, полоса захвата с высоты орбиты 800 км составляет ~1 600 км для типичного зенитного угла 53°, который оптимален для улучшения информации о дифференциальной поляризации в МКВ-диапазоне. В отличие от этого полоса захвата прибора с поперечным сканированием приближается к 3 000 км в предположении диапазона зенитного угла ± 70°, как следует из настоящего тома, глава 2, таблица 2.1.

Полоса захвата является важной характеристикой прибора на НОО, поскольку она определяет цикл наблюдения. В главе 2, таблице 2.2 настоящего тома отмечалось, что для солнечно-синхронной орбиты на высоте 800 км один прибор с полосой захвата как минимум 2 800 км обеспечивает одно глобальное покрытие в день при измерениях, проводимых только в дневное время (например, видимые и коротковолновые (КВ)





Сканирование параллельно экватору
без вращения изображения детекторной матрицы

Рисунок 3.5. Двухзеркальный ортогональный сканер: сканирование параллельно экватору без вращения изображения детекторной матрицы

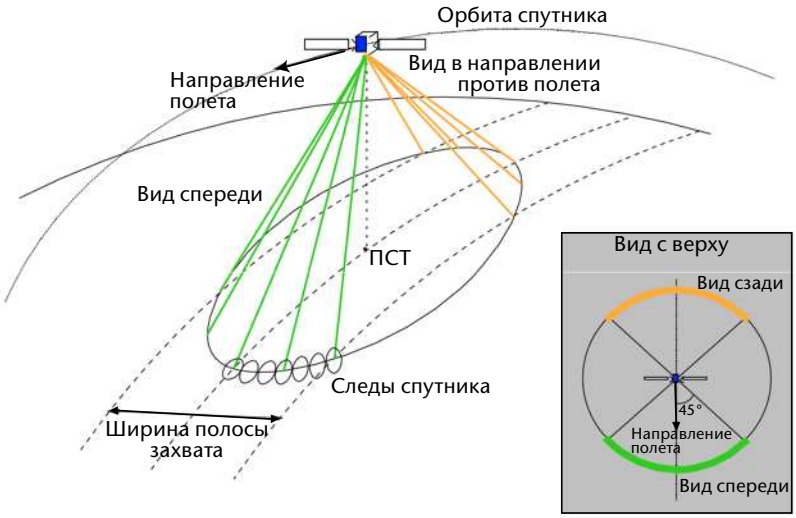


Рисунок 3.6. Геометрия конического сканирования

датчики), или два глобальных покрытия в день при измерениях, осуществляемых днем и ночью (например, ИК- или МКВ-датчики). Приборы микроволнового конического сканирования обычно позволяют получать одно глобальное покрытие в день.

Оценка цикла наблюдений для типичных приборов НОО

Порядок величины цикла наблюдений (Δt, в днях) для данной полосы захвата может быть оценен путем простых расчетов. Учитывая протяженность экватора (~40 000 км), число орбит в день (~14,2) и при допущении, что не существует значительного перекрытия между соседними полосами захвата на экваторе, расчет состоит в следующем:

a) для дневных и ночных датчиков (ИК- или МКВ-диапазоны), работающих как на восходящих, так и нисходящих витках: Δt = 1 400/полоса захвата (например, для микроволнового конического сканера с полосой захвата 1 400 км: Δt = 1 день);

b) для чисто дневных датчиков (КВ), работающих только на одном витке за орбитальный период: Δt = 2 800/полоса захвата (например, наблюдение за состоянием суши в видимом диапазоне с полосой захвата 180 км: Δt = 16 дней).

Что касается приборов, не производящих сканирования поперек трассы, таких как альтиметры и радиолокаторы обнаружения осадков, для них понятие полосы захвата не применимо. В таких случаях интервал выборки поперек трассы Δx на экваторе используется вместо понятия «полосы захвата», входящей в представленные выше отношения. Полезно также оценить глобальную среднюю величину данного интервала выборки. Этот интервал представлен несколько другим отношением вследствие более тесного расположения орбит на более высоких широтах:

a) при среднем интервале выборки поперек трассы Δx характерное время, необходимое для глобального охвата, составляет:

   i) $\Delta t = 900/\Delta x$ для датчиков, работающих в дневное и ночное время (например, радиолокационный альтиметр — 2 (РА-2) на спутнике для изучения окружающей среды (Envisat): Δx = 26 км, Δt = 35 дней);

   ii) $\Delta t = 1\,800/\Delta x$ для чисто дневных датчиков (например, спектральный радиометр для исследования обратного рассеяния солнечного УФ-излучения (СБУФ) Национального управления по исследованию океанов и атмосферы (НУОА): Δx = 170 км, Δt = 11 дней);

b) соответственно, за интервал времени Δt (например, период повторения орбиты или основной подцикл) средний интервал выборки поперек трассы записывается как:

   i) $\Delta x = 900/\Delta t$ для датчиков, работающих в дневное и ночное время (например, альтиметр Совместной сети спутников для альтиметрии в интересах океанографии (ДЖЕЙСОН): $\Delta t = 10$ дней, $\Delta x = 90$ км);

   ii) $\Delta x = 1\,800/\Delta t$ для чисто дневных датчиков (например, СБУФ НУОА: $\Delta t = 5$ дней, $\Delta x = 360$ км).

Лимбовые зондировщики — это, как правило, устройства, не выполняющие сканирования в поперечном направлении. В предположении интервала выборки поперек трассы $\Delta x = 300$ км, что равно горизонтальному разрешению измерений, из приведенных выше соотношений получаем следующие циклы наблюдений:

a) Δt 3 дня для датчиков, работающих в дневное и ночное время (например, MIPAS на Envisat: 3 дня = 1 орбитальный подцикл);

b) Δt 6 дней для чисто дневных датчиков (например, СКИАМАЧИ-лимб на борту спутника Envisat: 6 дней = 2 орбитальных подцикла).

Что касается приборов, обеспечивающих редкие, но равномерно распределённые наблюдения, цикл охвата или среднюю выборку можно оценить путем сравнения числа событий с их разрешением при покрытии поверхности Земли. Например, в случае радиозатмения с использованием ГСОМ + ГЛОНАСС каждый спутник способен обеспечить 1 000 наблюдений в день при характерном разрешении измерений 300 км для всей поверхности Земли 510 млн км^2, отсюда:

a) время, необходимое для одного спутника, производящего 1 000 наблюдений/день: $\Delta t = 510\,000\,000/300/300/1\,000 = 5{,}7$ дней;

b) число спутников, необходимых для цикла наблюдения Δt: $N = 5{,}7/\Delta t$ (например, для $\Delta t = 0{,}5$ дней, число спутников близко к 12).

Исключительный случай представляют собой приборы, использующие затменные методы (затмение Солнца, Луны, звезд). Затмение Солнца или Луны позволяет провести всего несколько измерений в день и только на больших высотах над уровнем моря дневного/ночного терминатора (Солнца) или на несколько более низких широтах (для Луны). Затмение звезд может позволить провести несколько десятков измерений в день (например, 40 измерений в целях глобального мониторинга содержания озона с помощью затменных наблюдений звезд прибором GOMOS (Global Ozone Monitoring by Occultation of Stars (мониторинг глобального содержания озона с помощью затменных наблюдений звезд)) на спутнике Envisat), равномерно распределенных по широте.

3.1.2 Спектральный диапазон: радиометры и спектрометры

Еще одной важной характеристикой прибора является спектральный диапазон, в котором работает прибор. Как обсуждалось в главе 2, 2.2, настоящего тома, спектральным диапазоном определяется, какие именно свойства тела можно наблюдать, включая отражательную способность, температуру и диэлектрические свойства. В спектральном диапазоне могут существовать области окон прозрачности и полосы поглощения, которые в основном соответствуют конденсированным и газообразным средам соответственно.

Спектральный диапазон может быть более широким или менее узким в зависимости от эффектов, которые необходимо усилить, или от мешающих факторов, которые необходимо устранить. Подразделы окон или полос, покрываемые прибором, называются каналами. Количество каналов зависит от того, сколько порций независимой информации необходимо извлечь из одной полосы. Если ограниченное число четко разделенных каналов достаточно для поставленной цели, то прибор может содержать только эти каналы

и такой прибор называется радиометром. Если содержание информации быстро меняется с частотой по спектральному диапазону до такой степени, что каналы должны быть перекрывающимися, то такой прибор называют спектрометром.

Метод, принятый для разделения каналов или для разделения поддиапазонов спектрометра, является основной отличительной особенностью прибора. Фактически существует две возможности физически разделить два канала на отдельные детекторы (или детекторные матрицы) и связанные с ними системы фильтрования. Во-первых, луч можно сфокусировать на диафрагме, ограничивающей поле зрения, и разложить его на две полосы при помощи дихроичного зеркала. Преимущество в этом случае заключается в том, что два канала смотрят на одно и то же поле зрения (которое может быть матрицей IFOV), что позволяет обеспечить сорегистрацию. Однако, если две длины волны расположены слишком близко друг к другу (например, расщепленное окно), то дихроичное зеркало не может разделить их достаточно четко. Второе решение — дать возможность всему лучу создать изображение в фокальной плоскости и настроить детекторы (или детекторные матрицы) с различными фильтрами (тем самым идентифицировать различные каналы) в различных частях фокальной плоскости (разделение в поле). Это гораздо более простое решение, однако поскольку каждый канал смотрит с разным IFOV, может оказаться сложнее обеспечить одновременную регистрацию. Возможны и комбинированные решения: на рисунке 3.7 показано решение, реализованное в УБФИ GOES-R для разделения 16 каналов с помощью двух светоделительных элементов и 16 отдельных детекторных матриц. Современные матрицы детекторов гораздо больше по размеру, чем они были в прошлом, и, следовательно, гораздо удобнее проводить разделение в месте эксплуатации.

Спектрометры обеспечивают непрерывную спектральную выборку в спектральном диапазоне или в нескольких спектральных поддиапазонах. (Эти поддиапазоны иногда называют каналами, но не следует путать их с каналами радиометра). Существует несколько видов радиометров, наиболее простым из которых является призма. К числу других относятся решетчатые интерферометры; наиболее распространенными являются интерферометры Михельсона и Фабри-Перо. На рисунке 3.8 показана схема интерферометра Михельсона.

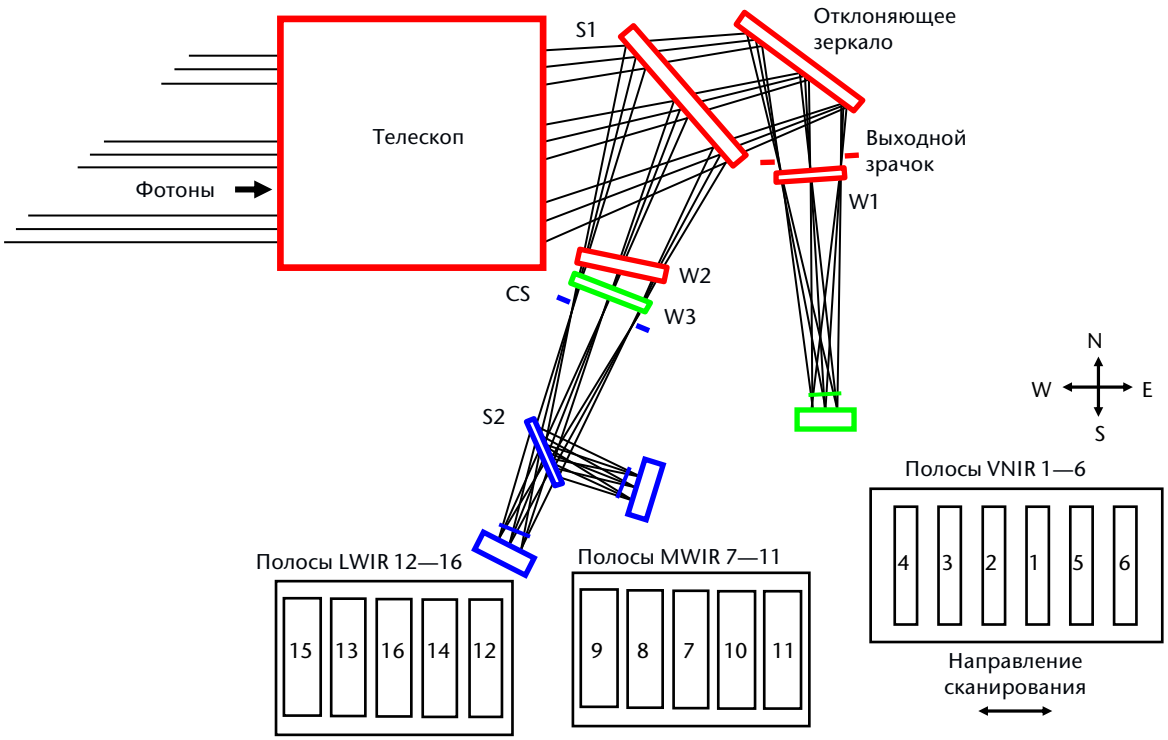


Рисунок 3.7. Схема разделения каналов в УБФИ на GOES-R

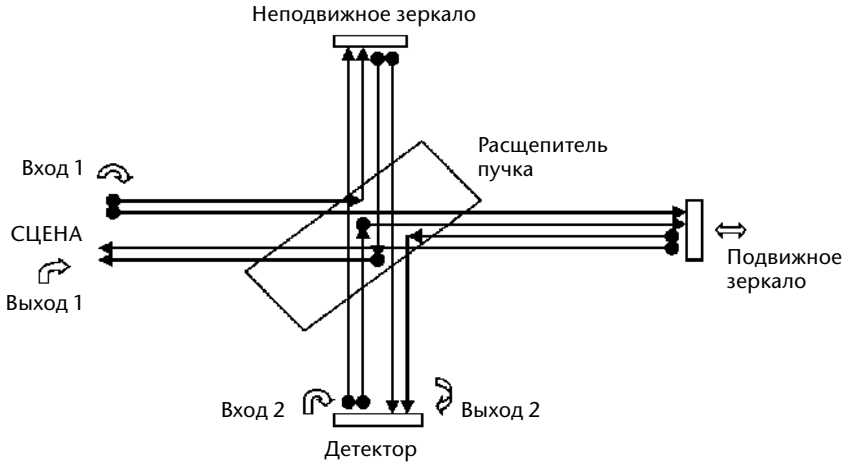


Рисунок 3.8. Схема интерферометра Михельсона с двумя входами и двумя выходами

В интерферометре в каждый момент времени все детекторные элементы наблюдают один и тот же спектральный канал, но каждый спектральный канал наблюдается с небольшой разницей во времени. В дисперсионном спектрометре (например, решетчатом спектрометре) все спектральные каналы собираются одновременно, но каждый детекторный элемент наблюдает за отдельной спектральной полосой. Каждый подход имеет преимущества и недостатки. Оптимальная конструкция спектрометра зависит от конкретной задачи.

Для спектрометра спектральное разрешение является важной характеристикой. Для интерферометра Михельсона разрешение определяется максимальной длиной разности оптических путей (OPD) между лучами, отраженными между неподвижно закрепленным и перемещающимся зеркалами. Что касается неаподизированного разрешения, определяется формулой:

$$\Delta\nu = 1/\mathrm{OPD}_{\max} \tag{3.1}$$

Например, в IASI, приборе, устанавливаемом на метеорологическом оперативном спутнике (Метоп), смещение подвижного зеркала составляет ± 2 см. Следовательно OPD_{max} = 4 см и $\Delta\nu$ = 0,25 см$^{-1}$. Если требуется тонкий анализ спектра (например, для обнаружения линий малых газовых составляющих), то необходима аподизация, подразумевающая фактор ~2. В таком случае аподизированное разрешение $\Delta\nu$ = 0,5 см$^{-1}$.

Для решетчатого спектрометра разрешение определяется количеством штрихов N и применяемым порядком дифракции m. Разрешающая способность $\lambda/\Delta\lambda$ записывается как:

$$\lambda/\Delta\lambda = m \cdot N \tag{3.2}$$

Для интерферометра Михельсона спектральное разрешение остается постоянным с изменением длины волны. Для решетчатого спектрометра, между тем, разрешающая способность постоянна, и спектральное разрешение меняется с длиной волны. В случае если решетчатый спектрометр должен охватывать широкий спектральный диапазон, этот диапазон необходимо разбить на поддиапазоны, использующие различные порядки дифракции m. Разрешающая способность может, как следствие, меняться в зависимости от поддиапазона.

Для радиометра количество каналов и их ширина полосы пропускания играют одинаково важную роль для спектрального разрешения спектрометра.

3.1.3 Пространственное разрешение (мгновенное поле зрения, пиксель, размер пикселя по земной поверхности, угловое расстояние между пикселями и функция передачи модуляции)

В обиходе пространственное разрешение представляет собой меру способности различать различные детали на изображении. В оптических системах оптические элементы собирают свет и формируют изображение, детекторные элементы записывают его, и все они ограничивают разрешение.

IFOV — возможно самое близкое понятие к тому, что обычно подразумевают под разрешением. В оптических приборах (т. е. приборы для измерений в КВ- и ИК-диапазонах) оно определяется апертурой пучка и габаритами детектора. В МКВ-диапазоне оно определяется размером антенны.

В оптических системах размер IFOV проектируется, главным образом, из энергетических соображений (см. 3.1.4). IFOV может определяться формой детектора; и хотя она может быть квадратной, контур IFOV не является достаточно четким. Фактически изображение точки представляет собой дифракционную фигуру, которую называют функцией рассеяния точки (рисунок 3.9). IFOV является сверткой функции рассеяния точки и пространственным откликом детектора.

Энергия, поступающая на детектор, также определяется временем интегрирования последовательных показаний сигнала. Во время сканирования изображения положение ЛПВ вдоль направления сканирования меняется на величину, которую называют расстоянием выборки. Расстояние выборки — это произведение скорости ЛПВ и интервала времени между выборками детектора. При формировании картинки в растровом двумерном виде пиксель (элемент картинки) выглядит как группа прямоугольных элементов. В x-направлении (вдоль направления сканирования) распределение пикселей соответствует расстоянию выборки. В y-направлении (поперек сканирования) распределение пикселей отвечает расстоянию ЛПВ между элементами детекторной матрицы (в пределах полосы захвата) и движению спутника на протяжении временного расстояния от одной полосы захвата до другой (или шагу смещения в направлении север-юг с ГСО).

Угловое расстояние выборки (ASD) — это изменение угла ЛПВ между выборками детектора. У многих приборов постоянное ASD.

Размер пикселя по земной поверхности (GSD) — это расстояние на поверхности Земли между выборками детектора. Из-за кривизны земной поверхности у приборов с постоянным ASD непрерывно изменяется GSD. В некоторых приборах используется

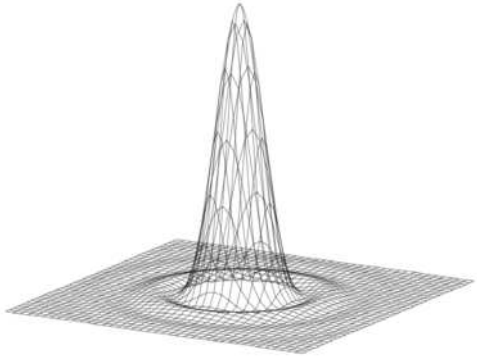


Рис. 3.9. Вид функции рассеяния точки

агрегация переменных и/или передискретизация (либо как встроенная функция, либо при наземной обработке) для вычисления пикселей с более равномерным GSD из выборки детектора с постоянным ASD.

Примечание: Если расстояние выборки для прибора указано в линейных единицах, это не обязательно означает, что он имеет постоянный GSD. ASD часто выражаются в единицах, имеющих линейное измерение, а не угловое, чтобы пользователям данных было легче их интуитивно понять (например, 1 км, а не 28 микрорадиан). В этом случае используемое линейное измерение равно GSD в надире.

Передискретизация — это просто использование соответствующим образом взвешенного среднего значения выборок детектора для вычисления значения пикселя. Для приборов, в которых применяется повторная дискретизация, важно проводить различие между элементами выборки (то, что считывается с элементов детектора) и пикселями (выходной сигнал устройства передискретизации).

Размер пикселя часто путают с разрешением, поскольку пользователь непосредственно воспринимает размер элемента картинки, а IFOV — это технический параметр, не видимый для пользователя. В направлении вдоль сканирования IFOV каждого пикселя обычно перекрывается с соседними пикселями. Тем не менее, неправильно думать, что разрешение может быть улучшено просто путем уменьшения времени интегрирования, поскольку время интегрирования должно быть достаточно продолжительным для сбора достаточного количества фотонов для обеспечения соответствующей радиометрической точности (см. 3.1.4).

Существует определенный баланс между размером IFOV и размером пикселя. Когда расстояние выборки равно размеру IFOV, формирователь изображений часто называют «идеальным», хотя его лучше было бы описать с помощью термина «максимально эффективный». Для такого прибора мгновенные поля зрения являются непрерывными и перекрывающимися по всему изображению. В такой системе собирается минимально необходимое количество пикселей для того, чтобы избежать пропусков в изображении. Если размер пикселя меньше IFOV, то есть наблюдается перекрытие между последовательными IFOV, то прибор часто называют «сверхдискретизированным». Если размер пикселя больше IFOV, то есть существуют пропуски между последовательными IFOV, то прибор обычно описывается как «субдискретизированный».

Вместе с тем, идеальное соотношение IFOV и размера пикселя зависит от способа применения выборок. Сверхдискретизация полезна для уменьшения эффектов наложения спектров (т. е. ненужного усиления высоких пространственных частот). Если IFOV равен размеру пикселя, умноженному на 4,88, то система соответствует критерию Найквиста: это означает, что она может точно захватывать все пространственные частоты вплоть до размера IFOV. Однако, как правило, снижение точности для более высоких пространственных частот и незначительное искажение оправдываются значительным снижением скорости передачи данных и повышением радиометрической точности, что достигается при использовании пикселя размером гораздо ближе к размеру IFOV. Субдискретизация может быть необходимой, когда требуется больше энергии для обеспечения необходимой радиометрической точности. Приведем примеры взаимосвязи между IFOV и пикселем:

a) AVHRR: IFOV = 1,1 км; пиксель = 1,1 км вдоль трассы, 0,80 км вдоль скана (сверхдискретизация) (AVHRR представляет собой прибор с постоянным ASD);

b) SEVIRI: IFOV = 4,8 км; пиксель = 3,0 км поперек и вдоль скана (сверхдискретизация);

c) УБФИ 0,64 мкм (красный) канал запад-восток: IFOV = 12,4 мкрад; ASD выборки = 11 мкрад; ASD пикселя = 14 мкрад (0,5 км). Обратите внимание, что IFOV УБФИ и ASD выборки были оптимизированы в соответствии с алгоритмом передискретизации, чтобы обеспечить желаемую MTF для результирующего пиксельного изображения.

MTF — это количественный способ оценки пространственного разрешения. Она тесно связана с понятиями IFOV и пикселя. Она даже более непосредственно связана с диаметром апертуры «L» первичной оптики прибора. MTF соответствует возможности прибора корректно реагировать на отклик на изменение амплитуды объекта. Она является отношением между наблюденной амплитудой и истинной амплитудой сигнала от объекта в синусоидальном представлении. Наблюденная амплитуда ослабляется вследствие влияния таких факторов как дифракция от оптической апертуры; «окно», обусловленное детектором, и нечеткость изображения электроники. Эффект интегрирования излучения по идеальному (квадратичному) детектору дает вклад в MTF:

$$\mathrm{MTF}_{\mathrm{window}}(f) = \mathrm{sinc}(\pi \cdot \mathrm{IFOV} \cdot f), \quad \text{при} \quad f = 1/\left(2\,\Delta x\right)\left(\mathrm{km}^{-1}\right) \quad \text{и} \quad \mathrm{sinc}\, y = \frac{\sin y}{y} \qquad (3.3)$$

Это показывает, что, для Δx = IFOV, MTF = sinc (π/2) = 2/π. Поэтому даже у «идеального» формирователя изображений MTF меньше единицы. Значение 2/$\pi \approx$ 0,64 соответствует площади половины синусоиды, вписанной в квадрат. Понятие MTF следует рассматривать в тесной связи с понятием радиометрической точности: она определяет на какой пространственной длине волны два элемента фактически можно разрешить, если их излучение различается на обнаруживаемый минимум. Конечно, два элемента, излучение которых различается на значительно большую величину, чем обнаруживаемый минимум, могут быть распознаны, даже если они гораздо меньше. Однако, если они так малы, что IFOV/2, то MTF = 0, и их невозможно распознать никаким образом (f = 1/IFOV называется частотой среза).

Интересно отметить, каким образом $\mathrm{MTF}_{\mathrm{window}}$ меняется на различных длинах волн с точки зрения IFOV (в случае, если пространственная длина волны равна 2 Δx). Таблица 3.1 может быть получена при помощи уравнения 3.3:

Таблица 3.1. Изменение функции $\mathrm{MTF}_{\mathrm{window}}$ отношения Δx /IFOV

Δx/IFOV	1/2	2/3	1	2	3	4	5	6
$\mathrm{MTF}_{\mathrm{window}}$	0	0,30	0,64	0,90	0,95	0,97	0,98	0,99

Таблица показывает, что элементы, составляющие всего две трети IFOV, могут быть разрешены, но только в том случае, если их энергетическая яркость отличается больше, чем в три раза от минимально детектируемой. Она также показывает, что элементы, которые в два раза больше IFOV, могут быть разрешены, если разница в их энергетической яркости превышает минимальное значение на 10 %.

Другой крупный вклад в MTF вносит дифракция. Отношение записывается как:

$$\mathrm{MTF}_{\mathrm{diffraction}} = \frac{2}{\pi}\left[\cos^{-1}\left(\frac{f}{f_d}\right) - \frac{f}{f_d}\sqrt{1-\left(\frac{f}{f_d}\right)^2}\right] \qquad (3.4)$$

где f = 1/(2 ϑ H) (при H = высота спутника над поверхностью Земли);
ϑ = угловое разрешение (т. е. IFOV/ H);
f_d = L/(λ H);
L = апертура первичной оптики и отсюда f/f_d = λ/(2 ϑ L).

Дифракция является доминирующей, когда длина волны λ достаточно большая (как и в случае микроволн), когда оптическая апертура относительно небольшая или когда высота спутника достаточно большая (как и в случае ГСО). Величина $\mathrm{MTF}_{\mathrm{diffraction}}$ = 0,5 имеет место при f/f_d = 0,41, а именно:

$$\vartheta = 1{,}22\,\frac{\lambda}{L} \qquad (3.5)$$

что соответствует классическому закону дифракции.

Таким образом, то, что обычно обозначают термином «разрешение» включает в себя, по крайней мере, три параметра. Хотя их следует рассматривать в зависимости от контекста, но в то же время каждый из них более тесно ассоциируется с различным восприятием:

a) IFOV: невидим для пользователя; определяет радиометрический баланс изображения;

b) пиксель: дает прямое восприятие степени детализации изображения;

c) MTF: контролируя восстановление амплитуды, обеспечивает восприятие контрастности.

3.1.4 **Радиометрическое разрешение**

Несмотря на то, что пользователь вряд ли может наблюдать радиометрическое разрешение, оно является фактором, определяющим конструкцию прибора. Механизмы сканирования, спектральное разрешение, пространственное разрешение, время интегрирования и оптическая апертура — все они проектируются таким образом, чтобы были выполнены требования по радиометрическому разрешению. Радиометрическое разрешение представляет собой минимальную разницу в энергетической яркости, необходимую для различения двух объектов в двух соседних IFOV. Наблюдаемая разница является сочетанием истинной разницы интенсивности излучения двух тел (сигнал) и разницы, наблюдаемой, даже когда содержание мгновенных полей зрения одинаково (шум). Отношение сигнал/шум (ОСШ, на англ. яз. SNR) является одним из способов выражения радиометрического разрешения.

Шум зависит от нескольких факторов, как следует из формулы, представляющей радиометрические характеристики прибора:

$$\mathrm{NESR} = \frac{2\,F}{D^{*}\cdot\Delta\nu\cdot\tau\cdot\sqrt{\pi\cdot t\cdot\Delta\Omega}} \tag{3.6}$$

где:
NESR= спектральная плотность энергетической яркости, эквивалентная шуму (единицы: Вт·м$^{-2}$·ср$^{-1}$ [см$^{-1}$]$^{-1}$, т.е. на единицу волнового числа);
$F = f/L$, F-число (f = фокусное расстояние системы, L = апертура телескопа);
D^{*} = порог обнаружения (сильно зависит от ν);
$\Delta\nu$ = спектральное разрешение (выраженное через волновое число $\nu = 1/\lambda$);
τ = пропускная способность прибора;
t = время интегрирования;
$\Delta\Omega$ = пропускная способность системы, определяемая произведением ($\pi\cdot L^2/4$) на (IFOV$^2/H^2$), где $\pi\cdot L^2/4$ = площадная апертура телескопа;
H = высота спутника;
IFOV$^2/H^2$ = телесный угол, под которым находится IFOV.

В общем случае при определении $I(\nu)$ = спектральная плотность энергетической яркости на входе прибора (единицы измерения: Вт·м$^{-2}$·ср$^{-1}$ [см$^{-1}$] $^{-1}$), получаем:

$$\mathrm{SNR} = I(\nu)/\mathrm{NESR} \tag{3.7}$$

Для коротких волн входная спектральная энергетическая яркость — это солнечная спектральная энергетическая яркость, скорректированная на угол падения и отраженная согласно отражательной способности тела (или альбедо, если тело можно аппроксимировать как ламбертовский рассеиватель). Из уравнений 3.6 и 3.7 следует:

$$\frac{\mathrm{SNR}}{\mathrm{IFOV}\sqrt{\Delta\nu\cdot t}} \propto L \quad \text{(при конкретной входной энергетической яркости } I(\nu) \text{ или альбедо } \rho) \tag{3.8}$$

Это отношение в явном виде связывает параметры «ориентированные на пользователя», такие как SNR, спектральное разрешение $\Delta\nu$, IFOV и время интегрирования t с размером первичной оптики L.

Для узкополосных ИК-каналов радиометрическое разрешение обычно записывается как:

$$\mathrm{NE}\Delta\mathrm{T} = \frac{\mathrm{NESR}}{dB/dT} \tag{3.9}$$

где B = функция Планка и NEΔT = эквивалентная шуму дифференциальная температура при конкретной температуре T.

При NEΔT, формула, представляющая радиометрические характеристики 3.6, может быть переписана в следующем виде:

$$\mathrm{NE}\Delta\mathrm{T}\cdot\Delta\nu\cdot\mathrm{IFOV}\cdot\sqrt{t} = \frac{4H}{\pi\cdot dB/dT}\cdot\frac{F}{L\cdot D^{*}\cdot\tau} \tag{3.10}$$

С левой стороны формулы 3.10 — ориентированные на пользователя параметры (радиометрическое, спектральное, горизонтальное и временное разрешения), а с правой — размерные параметры прибора (F-число, оптическая апертура, порог обнаружения и пропускная способность). Данная формула применима не во всех условиях, но полезна во многих случаях для грубого анализа. Основные отклонения случаются, главным образом, тогда, когда сам детектор является источником доминирующих помех, либо когда время отклика детектора недостаточно короткое по сравнению с располагаемым временем интегрирования. Такое обычно случается в диапазоне дальней части инфракрасного спектра (ДИК), однако может наблюдаться и для коротких волн, когда, например, используются микроболометры или тепловые детекторы для работы при комнатной температуре. Другими словами, D^{*}, который очевидно зависит от ν, может очень сильно зависеть от располагаемого времени интегрирования.

В случае широкополосных каналов концепция NESP в том виде, как она записана в уравнении 3.6, должна быть переформулирована в терминах интегрированного шума по всему спектральному диапазону, покрываемому каждым каналом. В этом случае также можно получить отношение подобное формуле 3.10:

$$\mathrm{NE}\Delta\mathrm{R}\cdot\mathrm{IFOV}\cdot\sqrt{t} \propto \frac{1}{L} \tag{3.11}$$

где NEΔR — эквивалентная шуму дифференциальная энергетическая яркость (единица измерения: Вт·м$^{-2}$·ср$^{-1}$).

Ситуация будет другой в микроволновом диапазоне по двум причинам. Во-первых, вследствие необходимости ограничения размера антенны согласно закону дифракции существует связь между IFOV и оптической апертурой L:

$$\mathrm{IFOV} = \frac{1.24\cdot H\cdot c}{L\cdot\nu^{*}} \tag{3.12}$$

где ν^{*} = частота = c/λ, а c = скорость света.

Следовательно, остается меньше места для альтернативных параметров. Во-вторых, механизм обнаружения основан на сравнении температуры объекта с «температурой системы», которая повышается с шириной полосы пропускания. Окончательное выражение, эквивалентное уравнениям 3.8, 3.10 и 3.11 в МКВ-диапазоне можно записать следующим образом:

$$\mathrm{NE}\Delta\mathrm{T}\cdot\sqrt{\Delta\nu^{*}\cdot t} = T_{\mathrm{sys}} \tag{3.13}$$

где T_{sys} = температура системы.

Температура системы зависит от многих технологических факторов и резко растет с увеличением частоты. С одной стороны, из уравнения 3.13 видно, что в случае МКВ-диапазона радиометрическое разрешение может лишь немного быть улучшено

путем увеличения ширины полосы и времени интегрирования, поскольку оно будет увеличиваться по квадратному корню ширины полосы, времени интегрирования или их произведения. С другой стороны, из-за режима ограничения дифракции обычный способ повышения ОСШ путем увеличения оптической апертуры не применим, поскольку если диаметр антенны увеличивается, то IFOV соразмерно уменьшается (см. уравнение 3.12).

Настоящее краткое рассмотрение хорошо иллюстрирует непосредственное влияние требований пользователей и программы полета на габариты прибора. Оно также позволяет понять, насколько важно формулировать требования таким образом, чтобы оставлять возможность для оптимизации, не обязательно ухудшая при этом общие требуемые характеристики. К примеру, на основании уравнения 3.10 можно составить ряд рекомендаций, а именно:

a) для рассматриваемого набора параметров прибора (L, F, τ и D^*) некоторые параметры, представляющие интерес для пользователя (NEΔT, $\Delta\nu$, IFOV и t), могут быть улучшены за счет некоторых других. В некоторых случаях это можно осуществить на уровне программного обеспечения во время обработки данных на земле. Однако, если по всем требованиям пользователей все параметры будут только улучшаться и никакие из них не будут ухудшаться, то потребуется увеличение габаритов прибора;

b) влияние NEΔT, $\Delta\nu$ и IFOV на размеры прибора линейным образом связано с диаметром оптики L. Влияние t на размеры прибора (время интегрирования, обусловленное требованием охвата данной зоны в данное время) уменьшается по квадратному корню времени интегрирования. Поэтому требования по увеличению охвата и/или более частых наблюдений имеют меньшее значение, чем требования по улучшению пространственного, спектрального и радиометрического разрешений;

c) увеличение апертуры оптики L оказывает очень большое влияние на размер прибора. Поскольку очень трудно реализовать оптические системы с F-числом = $f/L < 1$, увеличение L означает увеличение фокусного расстояния и, следовательно, увеличение объемов оптики прибора в целом. Например, уменьшение IFOV с 3 до 2 км приводит к увеличению массы прибора в два раза.

3.2 КЛАССИФИКАЦИЯ ПРИБОРОВ

В настоящем разделе приборы наблюдения Земли классифицированы согласно их основным техническим характеристикам. Ниже рассматриваются следующие приборы:

a) формирователи оптических изображений среднего разрешения;

b) формирователи оптических изображений высокого разрешения;

c) надирные сканирующие коротковолновые радиометры;

d) надирные сканирующие инфракрасные радиометры;

e) микроволновые радиометры или микроволновые радиометры зондирования;

f) лимбовые зондировщики;

g) радиозатменные зондировщики Глобальной навигационой спутниковой системы;

h) широкополосные радиометры;

i) приборы для мониторинга солнечного излучения;

j) формирователи изображений молний;

k) радиолокаторы обнаружения облаков и осадков;

l) радиолокационные скаттерометры;

m) радиолокационные альтиметры;

n) радиолокаторы с получением изображений (радиолокаторы с синтезированной апертурой);

o) лидарная аппаратура;

p) градиометры/акселерометры;

q) приборы для мониторинга солнечной активности, солнечного ветра или околоземного пространства;

r) приборы для мониторинга параметров космической среды;

s) магнетометры или датчики электрического поля.

Большинство классов приборов подразделяются на более мелкие категории. Приводятся примеры, иллюстрирующие использование параметров приборов для конкретных применений. Полный перечень приборов для наблюдения Земли со спутников и подробное описание их характеристик имеются в базе данных ВМО о ресурсах космического базирования, доступной в режиме реального времени, с которой можно ознакомиться на веб-странице Космической программы ВМО.

3.2.1 Формирователи оптических изображений среднего разрешения

Приборы этого типа имеют следующие характеристики:

a) функционирование в ВИД, БИК, КВИК, СВИК и ТИК областях спектра (т. е. от 0,4 до 15 мкм);

b) дискретные каналы, от нескольких каналов до нескольких десятков каналов, разделенные дихроичными фильтрами или спектрометрами с полосой пропускания от ~10 нм до ~1 мкм;

c) средства формирования изображений: сплошная или перекрывающаяся выборка с пространственным разрешением порядка 1 км, обеспечивающая полосу захвата от нескольких сот до нескольких тысяч километров;

d) сканирование: обычно поперек трассы, но иногда многоугловое и иногда с несколькими поляризациями;

e) предназначены для использования на спутниках как на НОО, так и ГСО.

В зависимости от спектральных диапазонов, количества и ширины полосы пропускания каналов и радиометрического разрешения области применения могут включать:

a) формирование многоцелевых изображений в ВИД/ИК- диапазонах для анализа облаков, общего содержания аэрозолей, температуры поверхности моря, покрытия океана льдом, радиационных параметров поверхности суши, индексов растительности, пожаров и снежного покрова. Наиболее важной характеристикой прибора является размер спектрального диапазона;

b) формирование изображений цветности океана, наблюдения за аэрозолем и классификация растительного покрова. Для этих целей наиболее важной характеристикой прибора является количество каналов с узкой полосой пропускания в видимой и ближней ИК-областях спектра;

c) формирование изображений со специальной геометрией визирования для более совершенных наблюдений за аэрозолем и перистыми облаками, получения точной температуры поверхности моря, радиационных параметров поверхности суши, включая двунаправленную функцию распределения отражения. Наиболее важными характеристиками прибора являются количество углов визирования и, если таковые имеются, поляризаций.

В таблицах 3.2—3.6 приводятся в качестве примеров характеристики для трех многоцелевых формирователей изображений в ВИД/ИК-диапазонах (AVHRR/3 на НОО, МОДИС на НОО и SEVIRI на ГСО), одного формирователя изображений цветности океана (MERIS) и одного формирователя изображений со специальной геометрией визирования (POLDER). Экспериментальный датчик MODIS играет особую роль как многоцелевой формирователь изображений в ВИД/ИК-областях спектра. Он используется, главным образом, для определения спецификаций усовершенствованных приборов оперативного типа. В таблице 3.3 выделены основные области использования различных групп каналов.

Таблица 3.2. Пример многоцелевого формирователя изображений ВИД/ИК-областей спектра, функционирующего на НОО: AVHRR /3 на борту спутников NOAA и Metop

AVHRR/2/3	*Усовершенствованный радиометр с очень высоким разрешением*
Спутники	NOAA-15, NOAA-16, NOAA-17, NOAA-18, NOAA-19; Metop-A, Metop-B, Metop-C
Программа исследований	Формирование многоцелевых изображений в ВИД/ИК-диапазонах для анализа облаков, определения общего содержания аэрозолей, температуры поверхности моря, покрытия океана льдом, радиационных параметров поверхности суши, нормированного разностного вегетационного индекса, пожаров, снежного покрова и т. д.
Основные характеристики	6 каналов (канал 1,6 и 3,7 альтернативные), сбалансированные ВИД, БИК, КВИК, СВИК и ТИК-диапазоны
Дополнительная информация	https://www.wmo-sat.info/oscar/instruments/view/60 https://www.wmo-sat.info/oscar/instruments/view/61 https://www.wmo-sat.info/oscar/instruments/view/62

Таблица 3.3. Пример многоцелевого формирователя изображений ВИД/ИК-диапазонов, функционирующего на НОО: MODIS на борту спутников системы наблюдений за Землей EOS-Terra и EOS-Aqua

MODIS	*Сканирующий спектрорадиометр среднего разрешения*
Спутники	EOS-Terra и EOS-Aqua
Программа исследований	Формирование многоцелевых изображений в ВИД/ИК-диапазонах для анализа облаков, определения свойств аэрозолей, температуры поверхности моря и суши, покрытия океана льдом, цветности океана, радиационных параметров поверхности суши, индексов растительности, пожаров, снежного покрова, общего содержания озона, ветра по движению облаков в полярных районах и т. д.
Основные характеристики	36-канальный ВИД/ИК-спектрорадиометр
Дополнительная информация	https://www.wmo-sat.info/oscar/instruments/view/296

Таблица 3.4. Пример многоцелевого формирователя изображений ВИД/ИК-диапазонов, функционирующего на ГСО: SEVIRI на борту спутника Meteosat второго поколения

SEVIRI	*Радиометр видимого и ИК-диапазонов с улучшенным разрешением изображений для развертки*
Спутники	Meteosat-8, Meteosat-9, Meteosat-10, Meteosat-11
Программа исследований	Формирование многоцелевых изображений в ВИД/ИК диапазонах для анализа облаков, общего содержания аэрозолей, температуры поверхности моря, радиационных параметров поверхности суши, нормированного разностного вегетационного индекса, пожаров, снежного покрова, слежения за ветром по движению облаков и т. д.
Основные характеристики	12 каналов, сбалансированные ВИД, БИК, КВИК, СВИК и ТИК-диапазоны
Дополнительная информация	https://www.wmo-sat.info/oscar/instruments/view/503

Таблица 3.5. Пример формирователя изображения цветности океана на НОО: MERIS на борту спутника Envisat

MERIS	*Спектрометр с формированием изображения со средним разрешением*
Спутник	Envisat
Программа исследований	Изображение цветности океана, определение свойств аэрозоля, индексов растительности и т. д.
Основные характеристики	15 каналов ВИД- и ближнего ИК-диапазонов с очень узкой полосой пропускания
Дополнительная информация	https://www.wmo-sat.info/oscar/instruments/view/277

Таблица 3.6. Пример формирователя изображений со специальной геометрией обзора: POLDER на борту спутника PARASOL

POLDER	*Прибор для измерений поляризации и направленности отражающей способности Земли*
Спутник	PARASOL
Программа исследований	Формирование изображений со специальной геометрией обзора для наблюдений более высокого качества за аэрозолями и перистыми облаками, определения радиационных параметров поверхности суши, включая двумерную функцию распределения отражательной способности объектов и т. д.
Основные характеристики	Двунаправленный обзор, мультиполяризация, 9 узкополосных каналов ВИД- и ближнего ИК-диапазонов
Дополнительная информация	https://www.wmo-sat.info/oscar/instruments/view/405

3.2.2 **Формирователи оптических изображений высокого разрешения**

Приборы этого типа имеют следующие основные характеристики:

a) длины волн в ВИД-, БИК- и КВИК-диапазонах, т.е. от 0,4 до 3 мкм с возможным расширением в СВИК- и ТИК-областях;

b) изменяемое количество каналов и полос пропускания:

   i) один канал (панхроматический) с полосой пропускания около 400 нм (например, 500—900 нм);

   ii) от 3 до 10 многоспектральных каналов с полосой пропускания около 100 нм;

   iii) непрерывный спектральный диапазон (гиперспектральный); как правило, имеет 100 каналов с полосой пропускания около 10 нм;

c) пространственное разрешение в диапазоне меньше, чем от одного метра, до нескольких десятков метров;

d) функция получения изображения: сплошная и смежная выборка, покрывающая полосу захвата от нескольких десятков до приблизительно 100 км, которая часто соответствует полю зрения в несколько сотен километров;

e) предназначены для использования на НОО. ГСО не исключается, однако пока еще не используется.

В зависимости от спектральных диапазонов, количества каналов и ширины полосы пропускания, а также возможностей управляемого нацеливания оптические формирователи изображения высокого разрешения могут выполнять различные исследовательские функции, а именно:

a) панхроматические формирователи изображений: наблюдение, распознавание, стереоскопия для цифровой модели высоты рельефа и прочее. Наиболее значимыми характеристиками приборов являются разрешение и возможности нацеливания с автоматическим управлением;

b) мультиспектральные формирователи изображений: наблюдение за сушей для мониторинга землепользования, наземного покрова, подземных вод, классификации растительности, мониторинга стихийных бедствий и прочее. Наиболее значимыми характеристиками прибора является количество каналов и спектральный охват;

c) гиперспектральные формирователи изображений: наблюдение за сушей, особенно в целях изучения вегетационных процессов, углеродного цикла и прочее. Наиболее значимыми характеристиками прибора являются спектральное разрешение и спектральный охват.

В таблицах 3.7—3.9 представлены в качестве примера характеристики панхроматического формирователя изображений (WV60), мультиспектрального формирователя изображений (ETM+) и гиперспектрального формирователя изображений (Hyperion).

Таблица 3.7. Пример панхроматического формирователя изображений высокого разрешения: WV60 на борту спутника WorldView-1

WV60	*Камера World View 60*
Спутник	WorldView – 1
Программа исследований	Наблюдение, распознавание, стереоскопия для цифровой модели высоты рельефа и т. д.
Основные характеристики	Панхроматический канал, разрешение: 0,5 м, возможности управления, 60 см апертура телескопа
Дополнительная информация	https://www.wmo-sat.info/oscar/instruments/view/697

Таблица 3.8. Пример мультиспектрального формирователя изображений: ETM+ на борту спутника Landsat-7

ETM+	*Усовершенствованный прибор для тематического картирования +*
Спутник	Landsat-7
Программа исследований	Наблюдения за сушей для мониторинга землепользования, наземного покрова, подземных вод, классификации растительного покрова, мониторинга стихийных бедствий и т. д.
Основные характеристики	8 каналов: 1 панхроматический, 6 ВИД-, БИК- и КВИК-диапазонов, 1 ТИК-диапазон Разрешение 15 м, 30 м и 60 м
Дополнительная информация	https://www.wmo-sat.info/oscar/instruments/view/136

Таблица 3.9. Пример гиперспектрального формирователя изображений высокого разрешения: Hyperion на борту спутника NMP EO-1

	Hyperion
Спутник	Программа нового тысячелетия – Наблюдения за Землей-1 (NMP EO-1)
Программа исследований	Наблюдение за сушей, в особенности изучение вегетационных процессов, углеродного цикла и т. д.
Основные характеристики	Решёточный спектрометр в ВИД-, БИК- и КВИК-диапазонах с 220 каналами (гиперспектральных) в двух группах, покрывающих диапазоны 0,4–1,0 мкм и 0,9–2,5 мкм, соответственно Ширина полосы пропускания каналов: 10 нм Разрешение: 30 м
Дополнительная информация	https://www.wmo-sat.info/oscar/instruments/view/204

3.2.3 Надирные сканирующие коротковолновые радиометры

Этот спектрометр имеет следующие основные характеристики:

a) функционирует в ультрафиолетовой (УФ), ВИД-, БИК- и СВИК-областях спектра (от 0,2 до 3 мкм));

b) спектральное разрешение варьируется от доли нанометра до нескольких нанометров;

c) пространственное разрешение порядка 10 км;

d) горизонтальная дискретизация не обязательно сплошная и смежная;

e) возможности сканирования — от направления только в надир до полосы охвата в несколько тысяч километров;

f) предназначен для использования как на НОО, так и ГСО.

В зависимости от спектральных полос и разрешения надирные сканирующие коротковолновые радиометры могут решать задачи атмосферной химии в целях мониторинга ряда компонентов атмосферы, которые в основном определяются используемыми областями спектра:

a) только УФ-область спектра: профиль озона;

b) УФ- и ВИД-области спектра: профиль и общее содержание озона, или общий профиль небольшого числа других компонентов атмосферы, таких как BrO, NO_2, OClO, SO_2 и аэрозоля;

c) УФ-, ВИД- и БИК-области спектра: профиль и общее содержание озона, или общий профиль некоторых других компонентов атмосферы, таких как BrO, ClO, H_2O, HCHO, NO, NO_2, NO_3, O_2, O_4, OClO, SO_2 и аэрозоля;

d) УФ-, ВИД-, БИК- и КВИК-области спектра: профиль и общее содержание озона, или общий профиль некоторых других компонентов атмосферы, таких как BrO, CH_4, ClO, CO, CO_2, H_2O, HCHO, N_2O, NO, NO_2, NO_3, O_2, O_4, OClO, SO_2 и аэрозоля;

e) БИК- и КВИК-области спектра и, возможно, дополнительно СВИК- и ТИК-области: общее содержание или общий профиль отдельных компонентов атмосферы, таких как CH_4, CO, CO_2, H_2O и O_2.

В таблицах 3.10 и 3.11 представлен один пример с полным спектральным покрытием (СКИАМАЧИ-надир на НОО) и один пример с ограниченным спектральным покрытием (УВБ на ГСО).

Таблица 3.10. Пример надирного сканирующего коротковолнового радиометра на НОО: СКИАМАЧИ-надирна борту спутника Envisat

СКИАМАЧИ-надир	*Сканирующий абсорбционный спектрометр с формированием изображения для составления атмосферных карт – устройство сканирования в надирном режиме*
Спутник	Envisat
Программа исследований	Атмосферная химия, отслеживание компонентов атмосферы: BrO, CH_4, ClO, CO, CO_2, H_2O, HCHO, N_2O, NO, NO_2, NO_3, O_2, O_3, O_4, OClO, SO_2 и аэрозоля
Основные характеристики	Спектральный диапазон: УФ/ВИД/БИК/КВИК-области спектра Возможность получения изображений: дифракционный спектрометр, покрывающий восемь полос, 8192 каналов, с 7 каналами поляризации
Дополнительная информация	https://www.wmo-sat.info/oscar/instruments/view/478

Таблица 3.11. Пример надирного сканирующего коротковолнового радиометра на ГСО: UVN на борту спутника Meteosat третьего поколения (MTG)

UVN	*Спектрометр в УФ-, видимом и ближнем ИК-диапазонах (также известный как Sentinel-4)*
Спутники	MTG-S1, MTG-S2
Программа исследований	Атмосферная химия, отслеживание компонентов атмосферы: BrO, ClO, H_2O, HCHO, NO, NO_2, NO_3, O_2, O_3, O_4, OClO, SO_2 и аэрозоля
Основные характеристики	Спектральный диапазон: УФ/ВИД/БИК-области спектра Возможность получения изображений: дифракционный спектрометр, покрывающий 3 полосы, 1 470 каналов
Дополнительная информация	https://www.wmo-sat.info/oscar/instruments/view/584

3.2.4 Надирные сканирующие инфракрасные радиометры

Радиометры или спектрометры этого типа имеют следующие основные характеристики:

a) функционирование в СВИК- и ТИК-областях спектра (3—15 мкм) с возможным расширением в дальнюю ИК-область (до 50 мкм) и вспомогательные каналы в ВИД/БИК-областях спектра;

b) спектральное разрешение порядка 0,1 $см^{-1}$ (очень высокое разрешение), 0,5 $см^{-1}$ (гиперспектральное) или 10 $см^{-1}$ (радиометр);

c) пространственное разрешение порядка 10 км;

d) горизонтальная дискретизация, не обязательно сплошная или смежная;

e) возможности сканирования варьируются от направления только в надир до полосы охвата в несколько тысяч километров;

f) предназначены для использования как на НОО, так и ГСО.

В зависимости от спектральных диапазонов и разрешения надирные сканирующие инфракрасные радиометры могут использоваться для решения задач профилирования температуры и влажности атмосферы и/или атмосферной химии в отношении ряда компонентов атмосферы:

a) радиометры позволяют получить профили температуры и влажности грубого вертикального разрешения;

b) спектрометры позволяют получить профили температуры и влажности высокого вертикального разрешения, а также приближенный профиль озона и общее содержание или общий профиль некоторых других компонентов атмосферы, таких как CH_4, CO, CO_2, HNO_3, NO_2, SO_2 и аэрозоля;

c) спектрометры очень высокого разрешения, предназначенные для изучения химии атмосферы, позволяют получить профили или общее содержание C_2H_2, C_2H_6, CFC-11, CFC-12, CH_4, $ClONO_2$, CO, CO_2, COS, H_2O, HNO_3, N_2O, N_2O_5, NO, NO_2, O_3, PAN, SF_6, SO_2 и аэрозоля.

В таблицах 3.12—3.14 представлены три примера: радиометр на ГСО (радиометр на геостационарном оперативном спутнике для исследования окружающей среды (GOES)); гиперспектральный интерферометр на НОО (IASI на Metop) и спектрометр очень высокого разрешения на НОО (TES-nadir на EOS-Aura).

Таблица 3.12. Пример надирного сканирующего радиометра инфракрасного диапазона на ГСО: радиометр на борту спутника GOES

	Радиометр GOES
Спутники	GOES -8, GOES -9, GOES -10, GOES -11, GOES -12, GOES -13, GOES -14, GOES -15
Программа исследований	Профили температуры и влажности грубого вертикального разрешения
Основные характеристики	Радиометр: 18 узкополосных каналов в СВИК/ТИК- + 1 ВИД-областях спектра
Дополнительная информация	https://www.wmo-sat.info/oscar/instruments/view/526

Таблица 3.13. Пример гиперспектрального надирного сканирующего интерферометра инфракрасного диапазона на НОО: IASI на борту спутника Metop

IASI	*Интерферометр зондирования атмосферы в инфракрасном диапазоне*
Спутники	Metop-A, Metop-B, Metop-C
Программа исследований	Профили температуры и влажности высокого вертикального разрешения Приближенный профиль озона Общее содержание или общий профиль ряда других компонентов атмосферы, таких как CH_4, CO, CO_2, HNO_3, NO_2, SO_2 и аэрозоля
Основные характеристики	Спектрометр: спектральное разрешение 0,25 $см^{-1}$ (без аподизации), СВИК/ТИК-области спектра, интерферометр с 8 461 каналами и одним каналом, встроенным в ТИК-формирователь изображений
Дополнительная информация	https://www.wmo-sat.info/oscar/instruments/view/207

Таблица 3.14. Пример надирного сканирующего спектрометра инфракрасного диапазона очень высокого разрешения на НОО: надир TES на борту спутника EOS-Aura

Надир TES	*Тропосферный эмиссионный спектрометр — устройство сканирования в надирном режиме*
Спутник	EOS-Aura
Программа исследований	Атмосферная химия: профили и общее содержание C_2H_2, C_2H_6, CFC-11, CFC-12, CH_4, $ClONO_2$, CO, CO_2, COS, H_2O, HNO_3, N_2O, N_2O_5, NO, NO_2O_2, O_3, PAN, SF_6, SO_2 и аэрозоля
Основные характеристики	Спектрометр, спектральное разрешение 0,059 $см^{-1}$ (без аподизации), СВИК/ТИК-спектральный диапазон, интерферометр с формированием изображений: четыре полосы, 40 540 каналов
Дополнительная информация	https://www.wmo-sat.info/oscar/instruments/view/563

3.2.5 Микроволновые радиометры

Радиометры этого типа имеют следующие основные характеристики:

a) частота от 1 до 3 000 ГГц (длины волн от 0,1 мм до 30 см);

b) ширина полосы пропускания канала от нескольких МГц до нескольких ГГц;

c) пространственное разрешение от нескольких километров до примерно 100 километров, определяемое размером антенны и частотой излучения;

d) горизонтальная дискретизация не обязательно сплошная или смежная;

e) сканирование: поперек трассы (полоса захвата порядка 2 000 км), коническое (полоса захвата порядка 1 500 км, возможна одиночная или двойная поляризация) или только в надир;

f) предназначены для использования на НОО.

В зависимости от частоты, пространственного разрешения и режима сканирования микроволновые радиометры могут выполнять различные научные задачи:

a) формирование многоцелевых МКВ-изображений для определения осадков; содержания жидкой воды и ледяных кристаллов в облаке; количества водяного пара в атмосфере, который может выпасть в виде осадков; температуры поверхности океана; скорости приво́дного ветра (и направления, если используется мультиполяризация); покрова морского льда; влажности поверхности почвы; состояния снега и водного эквивалента снега, водно-болотных угодий, мониторинга экосистем, составление карт паводковых бедствий и т.п. Наиболее важными характеристиками прибора в этом плане являются следующие: расширение спектрального диапазона, по крайней мере, от 19 ГГц (возможно, 10 ГГц или лучше 6–7 ГГц) до самое меньшее 90 ГГц, а также коническое сканирование для использования конической поляризации в условиях постоянного угла падения;

b) зондирование температуры и влажности, а также осадков, практически при любых условиях погоды. Наиболее важными характеристиками прибора являются каналы в полосах поглощения O_2 для температуры (основная частота: 57 ГГц) и H_2O для влажности (основная частота: 183 ГГц);

c) определение солености воды на поверхности океана и объемного содержания влаги в почве. Наиболее важной характеристикой прибора является низкая частота в L-полосе (основная частота: 1,4 ГГц); это предполагает использование очень больших антенн (см. рисунок 3.10);

d) атмосферная коррекция для обеспечения выполнения задач альтиметрии. Наиболее важными характеристиками прибора являются использование частоты водяного пара 23 ГГц с прилегающими окнами, а также совмещение центра с альтиметром в надирных наблюдениях.

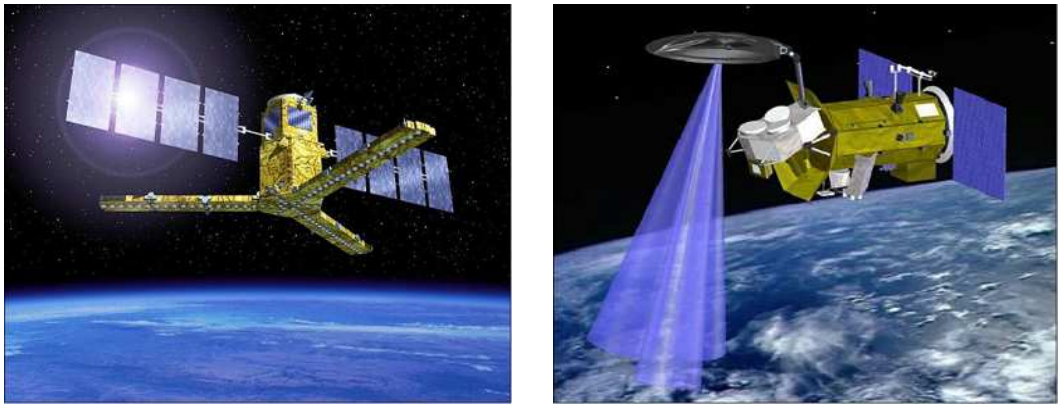


Рисунок 3.10. Схематическое изображение спутника для наблюдений за влажностью почвы и соленостью океана (SMOS) с прибором MIRAS на борту (слева) и спутника для научных применений (SAC-D) с прибором Aquarius (справа). Диаметр реальной апертуры антенны прибора Aquarius составляет 2,5 м. Антенна синтезированной апертуры MIRAS вписана в окружность диаметром 4 м.

В таблицах 3.15—3.18 содержатся характеристики многоцелевого радиометра (AMSR-2), зонда температуры и влажности (ATMS), низкочастотного радиометра (MIRAS) и радиометра для наблюдений в надир (AMR).

Таблица 3.15. Пример многоцелевого микроволнового формирователя изображений: AMSR-2 на борту спутника Миссии по изучению глобальных изменений для воды «SHIZUKU» (ГКОМ-В)

AMSR-2	*Усовершенствованный микроволновый сканирующий радиометр – 2 (AMSR-2)*
Спутник	ГКОМ-В
Программа исследований	Формирование многоцелевых изображений в МКВ-диапазоне для определения интенсивности осадков на поверхности (в жидкой и твердой фазе), температуры поверхности океана, морского ледового покрова и типа льда, скорости ветра (у поверхности), биомассы, содержания жидкой воды в облаках, интегрального содержания водяного пара, температуры поверхности почвы, снежного покрова и водного эквивалента снежного покрова, влажности поверхности почвы и т. д.
Основные характеристики	Спектральный диапазон: 6,9–89 ГГц, 7 частот, 16 каналов, только каналы-окна, коническое сканирование
Дополнительная информация	https://space.oscar.wmo.int/instruments/view/amsr2

Таблица 3.16. Пример микроволнового зонда температуры/влажности: ATMS на борту спутников Суоми-Национальное полярно-орбитальное партнерство (Suomi-NPP) и Объединенная полярная спутниковая система (JPSS)

ATMS	*Усовершенствованный микроволновый зонд*
Спутник	Suomi-NPP, JPSS-1 (NOAA-20), JPSS-2, JPSS-3 и JPSS-4
Программа исследований	Зондирование температуры и влажности практически при любых условиях погоды; также применим для обнаружения осадков
Основные характеристики	Спектральный диапазон: 23–183 ГГц, 22 канала, охватывающих полосы 57 и 183 ГГц Сканирование поперек трассы
Дополнительная информация	https://www.wmo-sat.info/oscar/instruments/view/53

Таблица 3.17. Пример микроволнового радиометра L-диапазона: MIRAS на борту спутника SMOS

MIRAS	*Микроволновый радиометр для получения изображений с синтезированной апертурой*
Спутник	Спутник для изучения влагосодержания в почве и солености океана (SMOS)
Программа исследований	Соленость воды поверхности океана, объемное содержание влаги в почве
Основные характеристики	Очень большая антенна с синтезированной апертурой, одна частота L-полосы (1,413 ГГц) Несколько поляриметрических режимов
Дополнительная информация	https://www.wmo-sat.info/oscar/instruments/view/287

Таблица 3.18. Пример несканирующего микроволнового радиометра, спроектированного для обеспечения задач альтиметрии: AMR на борту спутника JASON

AMR	*Усовершенствованный микроволновый радиометр*
Спутники	JASON-2, JASON-3
Программа исследований	Атмосферная коррекция для альтиметров JASON-1 и JASON-2
Основные характеристики	3 частоты: 18,7 ГГц, 23,8 ГГц и 34 ГГц
Дополнительная информация	https://www.wmo-sat.info/oscar/instruments/view/26

3.2.6 Лимбовые зондировщики

Семейство приборов этого типа имеет следующие основные характеристики:

a) сканирование лимба Земли: определяет вертикальное разрешение (в диапазоне 1—3 км), наблюдаемый атмосферный слой (в диапазоне 10—80 км) и пространственное разрешение (около 300 км вдоль линии визирования);

b) спектрометры, использующие или УФ/ВИД/БИК/КВИК-области спектра (200—3 000 нм), или СВИК/ТИК-области спектра (3—16 мкм), либо высокочастотный микроволновый диапазон (100—3 000 ГГц);

c) пространственное разрешение: от нескольких десятков километров до нескольких сотен километров в поперечном направлении;

d) горизонтальная выборка ограничена одним или несколькими азимутальными направлениями;

e) предназначены только для использования на НОО.

Лимбовые зондировщики могут обеспечивать наблюдения верхних слоев тропосферы, стратосферы и мезосферы с высоким вертикальным разрешением, главным образом, для задач атмосферной химии. В зависимости от спектральных диапазонов лимбовые зондировщики могут отслеживать следующие компоненты:

a) коротковолновые спектрометры для ряда компонентов в зависимости от покрываемой части спектра; для полного (УФ/ВИД/БИК/КВИК-диапазонов) основными компонентами являются: BrO, CH_4, ClO, CO, CO_2, H_2O, HCHO, N_2O, NO, NO_2, NO_3, O_2, O_3, O_4, OClO, SO_2 и аэрозоль;

b) ИК-спектрометры для ряда компонентов в зависимости от покрываемой части спектра; для полных СВИК/ТИК-областей спектра основными компонентами являются: C_2H_2, C_2H_6, CFCs (CCl_4, CF_4, F11, F12, F22), CH_4, $ClONO_2$, CO, COF_2, H_2O, HNO_3, HNO_4, HOCl, N_2O, N_2O_5, NO, NO_2, O_3, OCS, SF_6 и аэрозоль;

c) микроволновые спектрометры для ряда компонентов в зависимости от покрываемой части спектра; в диапазоне 100—3 000 ГГц основными компонентами являются: BrO, ClO, CO, H_2O, HCl, HCN, HNO_3, HO_2, HOCl, N_2O, O_3, OH и SO_2;

d) затменные датчики, следящие за Солнцем, Луной и звездами, для ряда компонентов в зависимости от покрываемой части спектра; для полного спектра УФ/ВИД/БИК/КВИК-диапазонов основными компонентами являются: H_2O, NO_2, NO_3, O_3, OclO и аэрозоль.

В таблицах 3.19—3.22 показаны характеристики лимбовых датчиков, использующих коротковолновый (СКИАМАЧИ-лимб), инфракрасный (ИМПЗА), микроволновый (МЛЗ) диапазоны, а также затменные методы в коротковолновом диапазоне (СЕЙДЖ-III МКС).

Таблица 3.19. Пример лимбового зондировщика, использующего коротковолновый диапазон: СКИАМАЧИ-лимб на борту спутника Envisat

СКИАМАЧИ-лимб	*Сканирующий абсорбционный спектрометр с формированием изображений для составления атмосферных карт – устройство сканирования в лимбовом режиме*
Спутник	Envisat
Программа исследований	Химия верхней атмосферы Отслеживаемые компоненты: BrO, CH_4, ClO, CO, CO_2, H_2O, HCHO, N_2O, NO, NO_2, NO_3, O_2, O_3, O_4, OclO, SO_2 и аэрозоль
Основные характеристики	Дифракционный спектрометр в УФ/ВИД/БИК/КВИК-диапазонах, восемь полос, 8 192 каналов, с 7 каналами поляризации
Дополнительная информация	https://www.wmo-sat.info/oscar/instruments/view/477

Таблица 3.20. Пример лимбового зондировщика, использующего инфракрасный диапазон: MIPAS на борту спутника Envisat

MIPAS	*Интерферометр Михельсона для пассивного зондирования атмосферы*
Спутник	Envisat
Программа исследований	Химия верхней атмосферы Отслеживаемые компоненты: C_2H_2, C_2H_6, ХФУ (CCl_4, CF_4, F11, F12, F22), CH_4, $ClONO_2$, CO, COF_2, H_2O, HNO_3, HNO_4, HOCl, N_2O, N_2O_5, NO, NO_2, O_3, OCS, SF_6 и аэрозоль
Основные характеристики	ИК-спектрометр: интерферометр Михельсона, диапазон 685–2 410 $см^{-1}$ (4,15–14,6 мкм), спектральное разрешение 0,035 $см^{-1}$ (без аподизации) 60 000 каналов/спектр NESR: 50 $нВт \cdot см^{-2} \cdot ср^{-1} \cdot см$ при 685 $см^{-1}$, 4,2 $нВт \cdot см^{-2} \cdot ср^{-1} \cdot см$ при 2 410 $см^{-1}$
Дополнительная информация	https://www.wmo-sat.info/oscar/instruments/view/286

Таблица 3.21. Пример лимбового зондировщика, использующего микроволновый-диапазон: MLS на борту спутника EOS-Aura

MLS	*Микроволновый лимбовый зондировщик*
Спутник	EOS-Aura
Программа исследований	Химия верхней атмосферы Отслеживаемые компоненты: BrO, ClO, CO, H_2O, HCl, HCN, HNO_3, HO_2, HOCl, N_2O, O_3, OH и SO_2
Основные характеристики	МКВ-спектрометр: 5-полосный, 36 субполосный, 1 000 канальный Миллиметровый-субмиллиметровый гетеродинный радиометр на частотах 118 ГГц (9 полос), 190 ГГц (6 полос), 240 ГГц (7 полос), 640 ГГц (9 полос) и 2 500 Ггц (5 полос)
Дополнительная информация	https://www.wmo-sat.info/oscar/instruments/view/293

Таблица 3.22. Пример лимбового зондировщика, использующего затменный метод в коротковолновом диапазоне: SAGE-III на МКС

SAGE-III МКС	*Эксперимент по стратосферному аэрозолю и газам-III для МКС*
Спутник	Международная космическая станция (МКС)
Программа исследований	Атмосферная химия в стратосфере Отслеживаемые компоненты: H_2O, NO_2, NO_3, O_3, OClO и аэрозоль
Основные характеристики	УФ/ВИД/БИК/КВИК-диапазоны (290–1 550 нм), 9-полосный дифракционный спектрометр солнечного и лунного затмения
Дополнительная информация	https://www.wmo-sat.info/oscar/instruments/view/693

3.2.7 Радиозатменные зондировщики Глобальной навигационной спутниковой системы

Приборы этого типа имеют следующие основные характеристики:

a) приемники ГНСС используют по крайней мере две частоты L-диапазона около 1 180 ГГц, 1 250 ГГц и 1 580 ГГц;

b) наблюдения лимба Земли от земной поверхности до высоты спутника во время фазы затмения спутников, входящих в группировки ГНСС (таких как ГСОМ, ГЛОНАСС, Galileo и Compass/BeiDou);

c) направленные антенны: смотрящие назад (для заходящих аппаратов ГНСС), вперед (для восходящих аппаратов ГНСС) и тороидальные (для навигации);

d) эффективное пространственное разрешение составляет около 300 км вдоль направления «спутник на НОО – затмевающий спутник ГНСС»; несколько десятков километров в поперечном направлении;

e) горизонтальная выборка ограничена числом событий затмений за день: от 250 до 1 500 событий для спутника в зависимости от числа систем ГНСС, сигнал от которых он получает, и технических возможностей отслеживания вперед/назад;

f) поддерживаются комплексной системой наземных станций (см. рисунок 3.11);

g) предназначены только для использования на НОО.

В зависимости от конкретных функциональных возможностей радиозатменные зондировщики могут обеспечивать получение различных видов информации:

a) временной интервал дискретизации сигнала определяет вертикальное разрешение профилей температуры, влажности и плотности;

b) чувствительность измерений в нижних слоях атмосферы определяется размером антенн затмения и методом временной выборки;

c) количество используемых частот влияет на точность двух измерений параметров ионосферы: общее содержание электронов и профиль плотности электронов;

d) число событий затмений в день зависит от количества задействованных группировок ГНСС (ГСОМ, ГЛОНАСС, Galileo, BeiDou), числа принимающих каналов для параллельного слежения дополнительных спутников ГНСС и возможностей размещения антенны: ее ориентации только назад, только вперед, или и то, и другое.

В таблице 3.23 в качестве примера представлены основные характеристики одного радиозатменного зондировщика (GRAS).

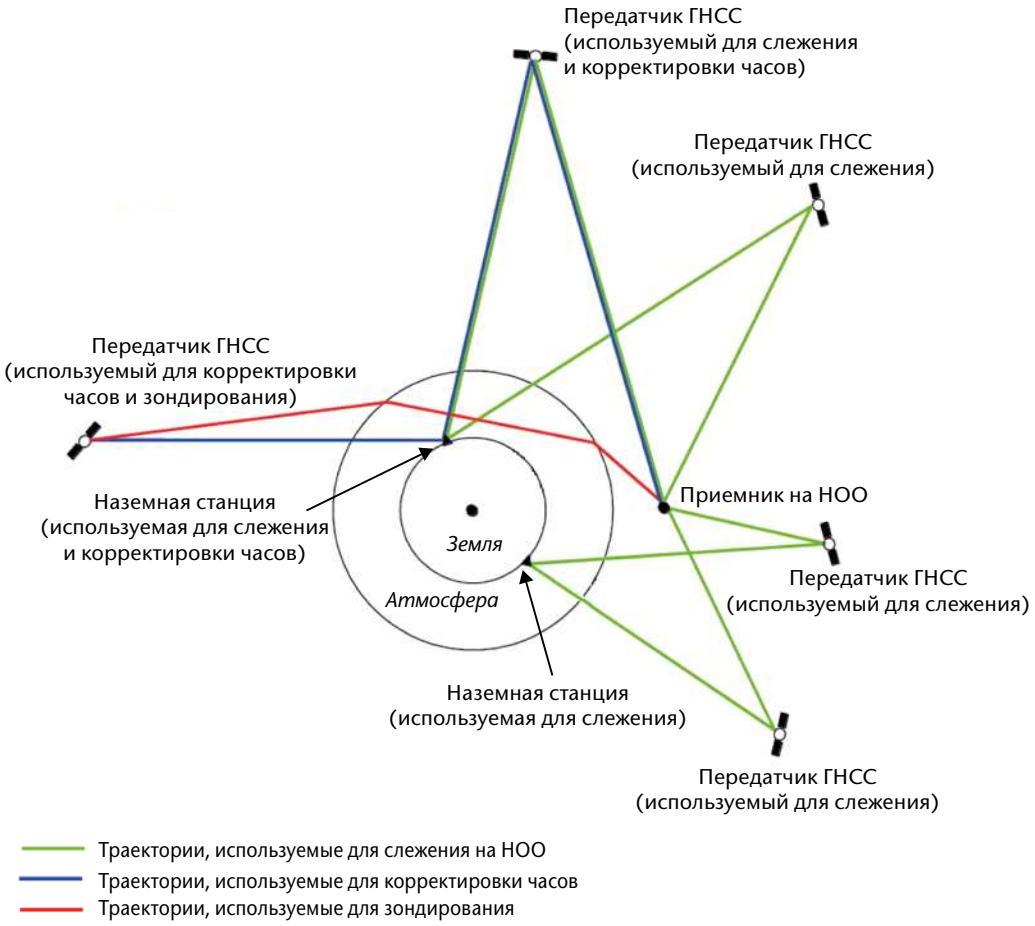


Рис. 3.11. Общий вид системы радиозатмения

Таблица 3.23. Пример радиозатменного зондировщика: GRAS на борту спутника Metop

GRAS	*Приемник ГНСС для атмосферного зондирования*
Спутник	Metop-A, Metop-B, Metop-C
Программа исследований	Профили температуры, влажности и плотности высокого вертикального разрешения
Основные характеристики	Измерение фазовой задержки вследствие отражения во время затмения между навигационным спутником и спутником на НОО, группировка спутников ГНСС: ГСОМ, частоты: L1 = 1 575,42 МГц и L2 = 1 227,6 МГц, 8 принимающих каналов: 4 для затмения, 8 для навигации
Дополнительная информация	https://www.wmo-sat.info/oscar/instruments/view/174

3.2.8 Широкополосные радиометры

Приборы этого типа имеют следующие основные характеристики:

a) длины волн в диапазонах общего излучения, исходящего от Земли и атмосферы (0,2—300 мкм), а также частично отраженной солнечной радиации (0,2—4,0 мкм);

b) один широкополосный канал, интегрирующий по каждому из двух диапазонов, и добавочные узкополосные каналы в ВИД- и/или ТИК-диапазонах для сбора информации об облаках в пределах IFOV;

c) сканирование поперек трассы со сплошной и смежной дискретизацией для охвата полосы захвата в несколько тысяч километров с пространственным разрешением порядка 10 км;

d) предназначены для использования как на НОО, так и на ГСО; возможно также наблюдение из точки либрации (точки Лагранжа) L1.

Широкополосные радиометры предназначены для измерения радиационного баланса Земли — уходящего длинноволнового и коротковолнового излучения на верхней границе атмосферы (ВГА). Точность измерения зависит от конкретных характеристик:

a) максимально возможное продление коротковолновой области спектра в ультрафиолетовую часть, а длинноволновой области спектра в ДИК-область спектра как можно дальше с предельно максимальными плоскими характеристиками в диапазонах;

b) встроенные средства с несколькими режимами обзора для перехода от детектирования излучения к детектированию облученности;

c) дополнительные узкополосные каналы для сбора информации об облаках в пределах IFOV.

В таблицах 3.24 и 3.25 приводятся характеристики одного широкополосного радиометра на НОО (CERES) и одного на ГСО (GERB).

Таблица 3.24. Пример широкополосного радиометра на НОО: CERES на борту спутников TRMM, EOS-Terra/Aqua, Suomi-NPP и JPSS

CERES	*Система изучения облачности и излучения Земли*
Спутник	TRMM, EOS Terra, EOS-Aqua, Suomi-NPP, JPSS-1
Программа исследований	Радиационный баланс Земли: уходящее длинноволновое и коротковолновое излучение на верхней границе атмосферы
Основные характеристики	Два широкополосных и один узкополосный каналы Либо: два блока — один для сканирования поперек трассы и один для двухосного сканирования для расчетов потока излучения, либо: один блок, работающий в различных режимах попеременно
Дополнительная информация	https://www.wmo-sat.info/oscar/instruments/view/78

Таблица 3.25. Пример широкополосного радиометра на ГСО: GERB на борту спутника Meteosat второго поколения

GERB	*Прибор для наблюдения с геостационарной орбиты за радиационным балансом Земли*
Спутник	Meteosat -8, Meteosat -9, Meteosat -10, Meteosat -11
Программа исследований	Радиационный баланс Земли: уходящее длинноволновое и коротковолновое излучение на ВГА
Основные характеристики	Два широкополосных канала
Дополнительная информация	https://www.wmo-sat.info/oscar/instruments/view/153

3.2.9 Приборы для мониторинга солнечного излучения

Приборы имеют следующие основные характеристики:

a) длины волн в диапазоне солнечной радиации (0,15–50 мкм);

b) интегрирование по всему диапазону (общее солнечное излучение) и/или спектроскопия в диапазоне 0,15–3,00 мкм;

c) общее солнечное излучение (ОСИ) измеряется абсолютными методами, такими как при помощи активных резонансных радиометров, ориентированных на Солнце;

d) предназначены для использования как на НОО, так и на ГСО.

Устройства измерения интенсивности солнечного излучения дополняют широкополосные радиометры в измерениях радиационного баланса Земли. Они также используются для мониторинга солнечной активности в целях наблюдения за космической погодой. Конкретными параметрами, определяющими их рабочие характеристики, являются следующие:

a) расширение чувствительности в солнечном диапазоне излучения;

b) способность предоставлять в конкретных условиях спектральную информацию в УФ/ВИД/БИК/КВИК-диапазонах.

В таблице 3.26 в качестве примера представлены основные характеристики устройства измерения интенсивности солнечного излучения на НОО (TSIS).

3.2.10 Формирователи изображений молний

Приборы этого типа имеют следующие основные характеристики:

a) детекторная матрица (ПЗС): непрерывное наблюдение за Землей в очень узком O_2-диапазоне на 777,4 нм;

b) измерение частоты появления вспышек молний, пространственной протяженности (области) и их интенсивности в IFOV;

c) пространственное разрешение 5–10 км;

Таблица 3.26. Пример устройства для измерения интенсивности солнечного излучения на НОО: TSIS на борту спутника JPSS – Free Flyer (FF)

TSIS	*Прибор для измерения общего солнечного излучения и его спектрального распределения*
Спутник	Международная космическая станция (МКС)
Программа исследований	Мониторинг солнечного излучения (интегрального и в разных частях спектра)
Основные характеристики	Комплект: Четыре активных резонансных радиометра для измерения полного потока солнечного излучения (устройство для мониторинга полной интенсивности падающего излучения: диапазон 0,2—10 мкм), призменный спектрометр для измерения спектральной плотности падающего излучения (устройство для мониторинга спектральной интенсивности падающего излучения: диапазон 0,2—2,0 мкм; спектральное разрешение: 0,25—33 нм)
Дополнительная информация	https://www.wmo-sat.info/oscar/instruments/view/580

d) сплошная и смежная горизонтальная выборка: полный диск с ГСО и полоса захвата несколько сотен километров с НОО;

e) предназначены для использования на НОО и ГСО.

Изображения молний и тенденции частоты вспышек могут быть полезны как косвенное свидетельство усиления восходящих потоков/конвекционной силы, конвективных осадков, непрерывного тока и образования NO_x. Выборка будет различной на НОО и ГСО:

a) на НОО измерения могут проводиться в течение короткого интервала видимости одного участка Земли в поле зрения матрицы ПЗС во время движения спутника (около 90 секунд);

b) на ГСО мониторинг ведется непрерывно.

В таблицах 3.27 и 3.28 представлен один пример формирователя изображений молний на НОО (LIS) и один на ГСО (GLM).

Таблица 3.27. Пример формирователя изображений молний на НОО: LIS на борту спутника TRMM

LIS	*Датчик изображений молний*
Спутник	Проект по измерению осадков в тропиках (TRMM)
Программа исследований	Косвенное свидетельство усиления конвекционных процессов и развития сильных бурь, косвенное свидетельство конвективных осадков, косвенное свидетельство образования NO_x
Основные характеристики	ПЗС камера, работающая на 777,4 нм (O_2) для подсчета вспышек и измерения их пространственной протяженности и интенсивности
Дополнительная информация	https://www.wmo-sat.info/oscar/instruments/view/250

Таблица 3.28. Пример формирователя изображений молний на ГСО: GLM на борту спутника GOES

GLM	*Геостационарный картограф молний*
Спутник	GOES-R (GOES-16), GOES-S (GOES-17), GOES-T, GOES-U
Программа исследований	Косвенное свидетельство конвективных осадков и турбулентности, косвенное свидетельство образования NO_x, изучение электрического поля Земли
Основные характеристики	ПЗС-камера, работающая на 777,4 нм (O_2) для подсчета вспышек и измерения их интенсивности
Дополнительная информация	https://www.wmo-sat.info/oscar/instruments/view/157

3.2.11 Радиолокаторы обнаружения облаков и осадков

Приборы этого типа имеют следующие основные характеристики:

a) рабочие частоты в K_u (~14 ГГц), K_a (~35 ГГц) или W (~94 ГГц) диапазонах;

b) частота повторения импульсов обеспечивает вертикальное разрешение в несколько сотен метров;

c) пространственное разрешение от 2 до 5 км;

d) сплошная и смежная горизонтальная выборка; полоса захвата — только из надира до нескольких сотен километров;

e) предназначены только для использования на НОО.

Рабочая частота определяет возможные применения:

a) K_u -диапазон подходит для интенсивных дождевых осадков (жидкие осадки с размером капель, превышающим 1 см). Не дающие осадков облака (капли размером менее < 0,1 мм) полностью прозрачны, а легкие осадки с трудом поддаются обнаружению. На относительно низких частотах электронное коммутирование, которое необходимо для того, чтобы не допустить механического движения больших антенн, осуществляется достаточно легко. Поэтому могут быть реализованы достаточно большие полосы захвата (несколько сотен километров);

b) K_a -диапазон подходит для слабого дождя (из слоистых облаков) и осадков в виде снега. Электронное коммутирование еще возможно и можно реализовать полосы захвата в несколько сотен километров;

c) W-диапазон подходит для облаков, не дающих осадки (капли размером менее < 0,1 мм). В ряде работ сообщалось также о его применении для наблюдений за системами облаков, дающих осадки, в особенности на границах зон с осадками/или в случаях без осадков, включая глаз тропического циклона.

В таблицах 3.29 и 3.30 приводится пример двухчастотного (K_u и K_a) радиолокатора для измерения осадков (DPR) и пример радиолокатора профилирования облачности в W-диапазоне (CPR на борту спутника CloudSat).

Таблица 3.29. Пример радиолокатора для измерения осадков: DPR на борту спутника ГПМ Core Observatory

DPR	*Двухчастотный радиолокатор для измерения осадков*
Спутник	Спутник Программы глобальных измерений осадков (ГПМ) Core Observatory
Программа исследований	Вертикальный профиль интенсивных дождевых осадков (жидких), слабых дождевых осадков и осадков в виде снега
Основные характеристики	Двухчастотный радиолокатор с получением изображения, частоты: 13,6 ГГц и 35,55 ГГц, чувствительность: 0,5 мм/ч на частоте 13,6 ГГц; 0,2 мм/ч на частоте 35,55 ГГц
Дополнительная информация	https://www.wmo-sat.info/oscar/instruments/view/125

Таблица 3.30. Пример радиолокатора профилирования облачности: CPR на борту спутника CloudSat

CPR	*Радиолокатор для получения профилей облаков*
Спутник	CloudSat
Программа исследований	Вертикальный профиль воды в облаках, не дающих осадков (жидкая вода и лед)
Основные характеристики	Частота 94,05 ГГц, чувствительность: –30 дБZ
Дополнительная информация	https://www.wmo-sat.info/oscar/instruments/view/91

3.2.12 Радиолокационные скаттерометры

Приборы этого типа имеют следующие основные характеристики:

a) рабочие частоты в C- (~5 ГГц) или K_u- (~14 ГГц) диапазонах;

b) очень точная калибровка для измерения коэффициентов обратного рассеяния (σ^0) от капиллярных волн в океане;

c) пространственное разрешение: 10–50 км;

d) сплошная и смежная горизонтальная выборка; полоса захвата около 1 000 км;

e) предназначены только для использования на НОО.

Существует две концепции, которые отличаются, главным образом, принципом сканирования (см. рисунок 3.12):

a) электронное сканирование: с боковым обзором, в основном с использованием C-диапазона и обеспечением трех азимутальных проекций дифференциального σ^0. Это более точный метод для приво́дного ветра низкой интенсивности и влажности почвы;

b) коническое сканирование: как правило, используется K_u -диапазон, с двумя лучами и двумя поляризациями, что позволяет получить четыре азимутальных проекции дифференциальных σ^0.

В таблицах 3.31 и 3.32 представлены радиолокационные скаттерометры, осуществляющие сканирование в режиме «pushbroom» (ASCAT) и коническое сканирование (SeaWinds).

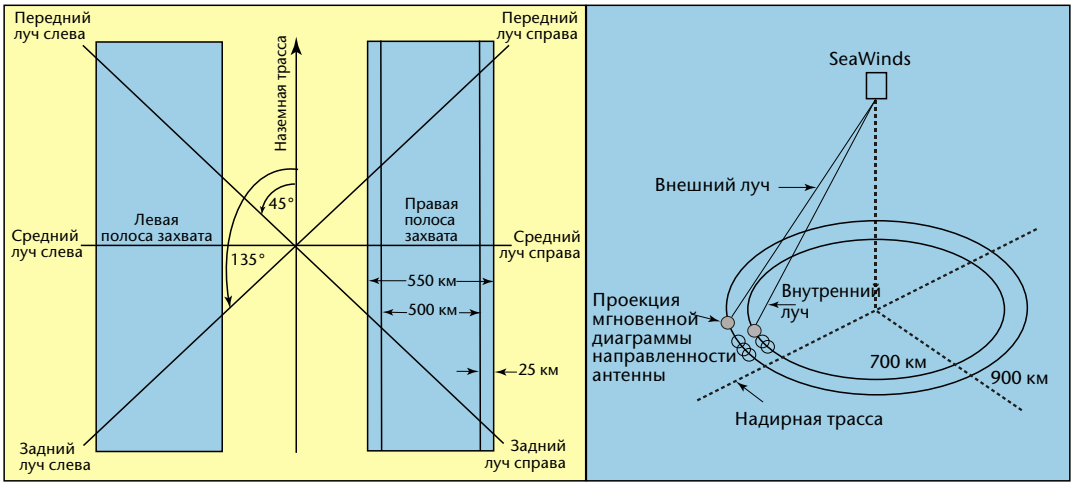


Рисунок 3.12. Две концепции скаттерометров с несколькими режимами обзора. Слева: шесть антенн для трех $\sigma = s$ при азимутальном угле 45°, 90° и 135° соответственно, как с левой, так и с правой стороны от подспутниковой трассы (ASCAT на борту Metop). Справа: коническое сканирование антенны с двумя лучами и двумя поляризациями, для $\sigma = s$ при четырех азимутальных углах для зон внутри окружности (SeaWinds на борту спутника QuikSCAT). При концепции ASCAT остается непокрытой полоса ~700 км вблизи подспутниковой трассы. При концепции SeaWinds пробелов, очевидно, не существует, однако точность является невысокой во внутренней части полосы захвата вблизи подспутниковой трассы.

Таблица 3.31. Пример радиолокационного скаттерометра, работающего в режиме «pushbroom»: ASCAT на борту спутника Metop

ASCAT	*Усовершенствованный скаттерометр*
Спутник	Metop-A, Metop-B, Metop-C
Программа исследований	Вектор приво́дного ветра; влажность почвы в широком масштабе
Основные характеристики	C-диапазон (5,255 ГГц), боковой обзор с левой и правой сторон, 3 антенны с каждой стороны
Дополнительная информация	https://www.wmo-sat.info/oscar/instruments/view/47

Таблица 3.32. Пример радиолокационного скаттерометра с коническим сканированием: SeaWinds на борту спутника QuikSCAT

	SeaWinds
Спутник	Программа быстрых скаттерометров (QuikSCAT)
Программа исследований	Вектор приво́дного ветра
Основные характеристики	K_u-диапазон (13,4 ГГц), коническое сканирование, два луча, две поляризации
Дополнительная информация	https://www.wmo-sat.info/oscar/instruments/view/482

3.2.13 **Радиолокационные альтиметры**

Приборы этого типа имеют следующие основные характеристики:

a) рабочие частоты в K_u-диапазоне (~14 ГГц), вместе с дополнительными частотами в C- (~5 ГГц) или K_a- (~35 ГГц) диапазонах;

b) очень точное измерение расстояния между спутником и поверхностью Земли;

c) пространственное разрешение в диапазоне 20 км;

d) только надирная ориентация;

e) предназначены только для использования на НОО.

Радиолокационные альтиметры обычно работают в K_u-диапазоне, используя C-диапазон для коррекции вращения сигнала, вызванного ионосферой. Они связаны с надирным микроволновым радиометром для коррекции, учитывающей водяной пар. Высокоточное определение ими дальности используется для топографии океана; разброс эхо-сигналов содержит информацию о значимой высоте волны, в то время как их интенсивность дает информацию о скорости ветра.

В зависимости от конкретных характеристик прибора и орбиты спутника альтиметры могут быть оптимизированы для различных применений, таких как:

a) относительно высокой не-солнечно-синхронной орбиты (например, 1 336 км), когда наклонение обеспечивает высокую устойчивость орбиты (например, 66°); особенно подходит для твердой оболочки Земли (геоида) и циркуляции океана;

b) обработка эхо-сигналов аналогично РСА для синтезирования более высокого пространственного разрешения вдоль подспутниковой трассы (см. рисунок 3.13);

c) параллельные антенны для выполнения функций альтиметрии с более широкой полосой обзора при помощи интерферометрии, что особенно полезно для землепользования, включая внутренние воды (такие как озера);

d) двойная частота (C- и K_u-диапазоны), которая позволяет получить информацию об общем содержании электронов между спутником и поверхностью Земли.

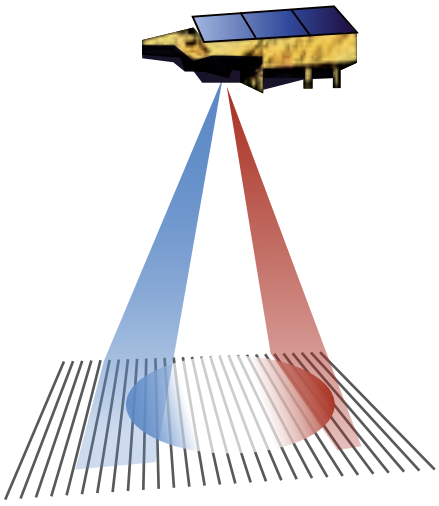


Рис. 3.13. Повышение разрешения альтиметра вдоль трассы спутника путем обработки сигнала аналогично РСА

В таблице 3.33 приводятся основные характеристики радиолокационного альтиметра для получения данных геодезического качества (Poseidon-3).

Таблица 3.33. Пример радиолокационного альтиметра: Poseidon-3 на борту спутника JASON-2

Poseidon-3	*Твердотельный радиолокационный альтиметр – 3*
Спутник	JASON-2
Программа исследований	Топография океана, геоид, значимая высота волны, скорость ветра, общее содержание электронов
Основные характеристики	2 частоты: 5,3 ГГц; 13,58 ГГц
Дополнительная информация	https://www.wmo-sat.info/oscar/instruments/view/407

3.2.14 Радиолокатор с получением изображений (радиолокатор с синтезированной апертурой)

Целый ряд приборов этого типа имеет следующие характеристики:

a) рабочие частоты в P- (~0,4 ГГц), L- (~1,3 ГГц), S- (~2,7 ГГц), C- (~5,3 ГГц), X- (~9,6 ГГц) или K_u- (~17,2 ГГц) диапазонах. Наиболее часто используются L-, C- и X-диапазоны;

b) Различные комбинации поляризаций для передачи и приема: HH, VV, VV/HH, HH/HV и VV/VH;

c) обеспечивается оптимальное соотношение между пространственным разрешением и полосой захвата: разрешение 1–30 м соответствует полосе захвата 30–100 км; но разрешение 100–1 000 м соответствует полосе захвата 300–500 км;

d) боковой обзор, обычно с одной стороны, обеспечивающий высокое разрешение в пределах зоны обзора, составляющей несколько сотен километров;

e) предназначены только для использования на НОО.

Рисунок 3.14 иллюстрирует режимы функционирования радара с синтетической апертурой (РСА) в диапазоне C ASAR .

Рабочая частота является наиболее важной характеристикой, которая оптимизируется для тех задач, для которых предназначен РСА:

a) P-диапазон больше всего подходит для мониторинга биомассы и гидрологического картирования;

b) L-диапазон больше всего подходит для наблюдений за волнением и определения объемного содержания почвенной влаги;

c) S-диапазон больше всего подходит для определения объемного содержания почвенной влаги;

d) C-диапазон охватывает широкий спектр применений: морской лед, волновые параметры по спектральному анализу фрагментов изображений, влажность поверхностного слоя почвы, характеристики снежного покрова, ледники, подземные воды и т.п. Однако оптимальные наблюдения за каждым отдельным параметром могут проводиться на других частотах;

e) X-диапазон обеспечивает наилучшее пространственное разрешение и следовательно лучше всего подходит для наблюдений;

f) K_a-диапазон особенно подходит для снега, который является прозрачным на более низких частотах;

g) интерферометрия сигналов от одного РСА в различные моменты времени или двух РСА, работающих во время полета в последовательном режиме, позволяет получать цифровую модель рельефа и обнаруживать изменения очертаний (таких как береговой линии и водоемов) и высоты (например, верхнего уровня вулкана).

В таблице 3.34 приводятся основные характеристики РСА С-диапазона (ASAR).

Таблица 3.34. Пример РСА С-диапазона: ASAR на борту спутника Envisat

ASAR	*Усовершенствованный радиолокатор с синтезированной апертурой*
Спутник	Envisat
Программа исследований	Морской лед, волновые параметры по спектральному анализу фрагментов изображений, влажность поверхностного слоя почвы, характеристики снежного покрова, ледники, подземные воды и т. д.
Основные характеристики	РСА С-диапазона, частота: 5,331 ГГц, мультиполяризационный режим и варьируемое нацеливание/разрешение
Дополнительная информация	https://www.wmo-sat.info/oscar/instruments/view/44

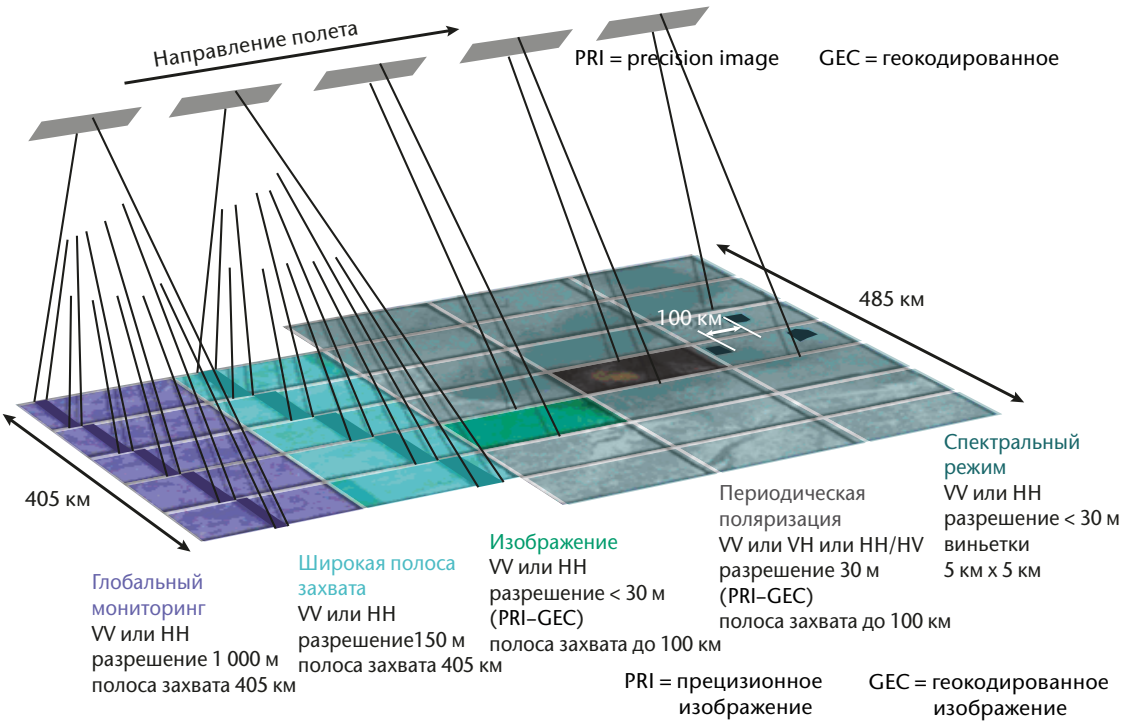


Рис. 3.14. Режимы функционирования ASAR на борту Envisat. В режимах глобального мониторинга и широкой полосы захвата полоса захвата составляет 405 км для 1 000 м или 150 м разрешения. В режимах «изображение» и «периодическая поляризация» 100-километровая полоса захвата с 30-метровым разрешением может быть направлена на одно из семи положений внутри зоны обзора 485 км. В волновом режиме выборка осуществляется на основе виньетки 5 км x 5 км с разрешением 30 м через каждые 100 км вдоль трассы.

3.2.15 **Лидарная аппаратура**

Ряд приборов этого типа имеет следующие основные характеристики:

a) рабочие длины волн в УФ- (например, 355 нм), ВИД- (например, 532 нм), БИК- (например, 1 064 нм) или КВИК- (например, 1 600 нм) диапазонах;

b) возможно использование двух длин волн, двух приемников (для рассеяния Ми и Рэлея); поляриметрия;

c) горизонтальное разрешение в 100-метровом диапазоне, которое часто может снижаться до 50 км для получения достаточного количества декоррелированных выборок;

d) вертикальное разрешение в 100-метровом диапазоне (примерно 10 см для лидарных альтиметров);

e) сканирование не проводится: наблюдения в надир или под углом.

Космический лидар представляет собой массивное устройство, которое требует оптимизации в зависимости от конкретных видов применения:

a) доплеровские лидары в основном функционируют в УФ-диапазоне, используя как рассеяние Ми, так и рассеяние Рэлея, и предназначены для слежения за аэрозолем и молекулами воздуха; позволяют получить косую проекцию радиальной составляющей для скорости ветра в безоблачной атмосфере и аэрозоля;

b) лидары обратного рассеяния функционируют на одной (в УФ-диапазоне) или двух (ВИД- и БИК-диапазоны) длинах волн, часто имеют более одной поляризаций; наблюдения в надир, позволяющие определить профиль аэрозоля, высоту верхней границы облака и атмосферные неоднородности, такие как высота верхней границы планетарного пограничного слоя и тропопауза;

c) лидарные альтиметры обычно функционируют на двух длинах волн (ВИД- и БИК-диапазоны); наблюдения в надир используются как очень высокое вертикальное разрешение (для возвышений морского льда) и горизонтальное разрешение (ледовые границы);

d) лидары дифференциального поглощения функционируют на одной длине волны с центром на максимуме поглощения одной из малых газовых составляющих в УФ-, ВИД-, БИК- или КВИК-диапазонах, а также в близкорасположенных окнах прозрачности; наблюдения ведутся в надир, с высоким вертикальным разрешением за такими компонентами, как O_3, H_2O и CO_2.

В таблицах 3.35—3.38 приводятся характеристики доплеровского лидара (ALADIN), лидара обратного рассеяния (CALIOP), лидарного альтиметра (GLAS) и лидара дифференциального поглощения (CO_2 лидар).

Таблица 3.35. Пример доплеровского лидара: ALADIN на борту спутника ADM-Aeolus

ALADIN	*Лазерный доплеровский измеритель параметров атмосферы*
Спутник	Программа по изучению динамики атмосферы (ADM)-Aeolus
Программа исследований	Профиль ветра в безоблачной атмосфере, профиль аэрозоля, высота верхней границы облаков
Основные характеристики	Одна длина волны (355 нм), боковой обзор: 35° от надира Лазер с высоким спектральным разрешением (ЛВСР) для распознавания типов аэрозолей
Дополнительная информация	https://www.wmo-sat.info/oscar/instruments/view/17

Таблица 3.36. Пример лидара обратного рассеяния: CALIOP на борту спутника CALIPSO

CALIOP	*Лидар с ортогональной поляризацией для наблюдения за облаками и аэрозолями*
Спутник	Лидар и инфракрасный радиолокатор для спутниковых наблюдений облаков и аэрозолей (CALIPSO)
Программа исследований	Профиль аэрозоля, высота верхней границы облаков и атмосферные неоднородности (высота верхней границы планетарного пограничного слоя и тропопаузы)
Основные характеристики	Две длины волны (532 и 1 064 нм), измерения с двумя ортогональными поляризациями
Дополнительная информация	https://www.wmo-sat.info/oscar/instruments/view/73

Таблица 3.37. Пример лидарного альтиметра: GLAS на борту спутника ICESat

GLAS	*Геофизическая лазерная альтиметрическая система*
Спутник	Спутник для изучения льда, облачности и возвышения суши (ICESat)
Программа исследований	Толщина и топография полярного ледового щита, высота верхней границы облаков, аэрозоли
Основные характеристики	Две длины волны (532 и 1 064 нм)
Дополнительная информация	https://www.wmo-sat.info/oscar/instruments/view/155

Таблица 3.38. Пример лидара дифференциального поглощения: лидар CO_2 на борту спутника ASCENDS

	Лидар CO_2
Спутник	Активное зондирование эмиссии CO_2 в ночное, дневное время и по временам года (ASCENDS)
Программа исследований	Мониторинг CO_2 с беспрецедентной точностью при помощи лазерного локатора
Основные характеристики	Длина волны 1,572 мкм для CO_2 Также рассматривается возможность мониторинга O_2 на 1 260 нм или на 765 нм
Дополнительная информация	https://www.wmo-sat.info/oscar/instruments/view/86

3.2.16 **Градиометры/акселерометры**

Знание гравитационного поля является исключительно важным для моделирования Земли как твердого тела. Существуют несколько спутниковых методов для решения этой проблемы:

a) длинноволновые составляющие гравитационного поля измеряются при помощи радиолокационной или лидарной альтиметрии, либо при помощи высокоточной орбитографии (например, лазерной дальнометрии, радиопозиционирования, ГНСС, слежения за звездами);

b) коротковолновые составляющие (аномалии и возмущения гравитационного поля) наблюдаются на высоте спутника при помощи акселерометров и градиометров, совмещенных с системами определения расстояния между спутниками. Акселерометр измеряет колебания гравитационного поля вдоль траектории спутника. Градиометр охватывает целый ряд акселерометров, которые измеряют тензор градиента гравитационного поля. Спутниковые дальномерные системы представляют собой приемопередающие системы, работающие, как правило, в K-диапазоне (24 ГГц) и K_a-диапазоне (32 ГГц). Они предназначены для точного измерения расстояния и изменений в расстоянии между спутниками на скоординированных орбитах. Такие же измерения могут производиться путем приема сигналов с десятков спутников ГНСС: это позволяет определять изменения в местоположении с особой точностью.

В таблицах 3.39 и 3.40 приводятся характеристики градиометра/акселерометра (EGG) и высокоточной системы измерения расстояния между спутниками (HAIRS).

Таблица 3.39. Пример акселерометра/градиометра: EGG на борту спутника GOCE

EGG	*Трехосный электростатический гравитационный градиометр*
Спутник	Исследователь гравитационного поля и установившихся океанских течений (GOCE)
Программа исследований	Твердая оболочка Земли Наблюдение за гравитационным полем Земли вдоль орбиты
Основные характеристики	Три пары трехосных акселерометров, специально скомпонованных для измерения тензора градиента гравитационного поля, точность: 10^{-12} м·с$^{-2}$, разрешение: $2 \cdot 10^{-12}$ м·с$^{-2}$·Гц$^{-1/2}$
Дополнительная информация	https://www.wmo-sat.info/oscar/instruments/view/127

Таблица 3.40. Пример системы измерения расстояния между спутниками: HAIRS на борту спутника по изучению климата и гравитационных возмущений (GRACE)

HAIRS	*Высокоточная ситема измерения расстояния между спутниками*
Спутник	GRACE (2 спутника, одновременно находящиеся в полете на расстоянии 220 км друг от друга)
Программа исследований	«Твердая оболочка Земли» Наблюдения за гравитационным полем Земли вдоль орбиты
Основные характеристики	Двухчастотная дальнометрия в K-диапазоне (24 ГГц) и K_a -диапазоне (32 ГГц), точность: 10 мкм
Дополнительная информация	https://www.wmo-sat.info/oscar/instruments/view/176

3.2.17 Приборы для мониторинга солнечной активности

Мониторинг солнечной активности осуществляется путем дистанционного зондирования или посредством измерений *in situ* солнечного ветра в глубоком космическом пространстве или с орбиты Земли. Могут быть использованы различные подходы к проведению измерений:

a) электромагнитное излучение: измеряется радиометрами, спектрометрами и поляриметрами γ-лучей (менее 0,001 нм), X-лучей (0,001—10 нм), самых коротких длин волн УФ-излучения (10—120 нм), УФ-излучения (120—380 нм), ВИД (380—780 нм) и более длинных длин волн, включая радиоволны (более 1 м);

b) энергетические частицы (электроны, протоны, α-частицы, ионы, космические лучи, нейтроны): диапазон энергий обычно разбивается на высокоэнергетический, средне-энергетический и низкоэнергетический; при этом границы диапазонов зависят от типа заряженных частиц; измерения могут интегрироваться по всему энергетическому диапазону или части диапазона; внутри диапазона может быть использована спектроскопия;

c) магнитные и электрические поля, измеряемые непосредственно в солнечном ветре и определяемые по фотосфере; эти поля определяются на основе либо измерений солнечного ветра, либо спектроскопии солнечных изображений в видимом диапазоне на основе эффекта Зеемана, или путем выполнения доплеровского анализа или использования множественной поляризации;

d) измерения могут проводиться путем интегрирования по всему солнечному диску; получение изображения солнечного диска или получение изображения только одной солнечной короны в результате затенения диска (коронография);

e) одним из конкретных видов наблюдений является наблюдение за интенсивностью солнечного излучения, либо его интегральной величины или спектрально разрешаемого (см. 3.2.9).

Пример характеристик аппаратного комплекса для мониторинга солнечной активности из точки L1 Лагранжа (точки либрации), SOHO, приводится в таблице 3.41.

Таблица 3.41. Пример аппаратного комплекса измерения солнечной активности: аппаратура SOHO

	Аппаратура SOHO
Спутник	Обсерватория для солнечных и гелиосферических исследований (SOHO)
Программа исследований	Наблюдение за Солнцем из точки Лагранжа L1
Основные характеристики	Приборный комплекс для дистанционного зондирования солнечной атмосферы Приборный комплекс для изучения *in situ* частиц солнечного ветра Гелио-сейсмологический аппаратный комплекс (изучение недр Солнца)
Дополнительная информация	https://www.wmo-sat.info/oscar/satellites/view/458

3.2.18 Приборы для мониторинга параметров космической среды

Мониторинг параметров космической среды на уровне платформы позволяет получить информацию, которая используется для мониторинга и прогнозирования общих условий космической погоды, а также для обеспечения безопасности платформы. Такая аппаратура обычно включает в себя:

a) детекторы заряженных частиц, предназначенные для конкретных диапазонов энергии, либо интегральных, либо спектрально разрешаемых;

b) магнетометры и электрометры.

Пример характеристик аппаратного комплекса для мониторинга *in situ* параметров космической среды ГГАК-М приводится в таблице 3.42.

Таблица 3.42. Пример аппаратного комплекса для мониторинга параметров космической среды: ГГАК-М на борту спутника Метеор-М

ГГАК-М	*Гелиогеофизический аппаратный комплекс*
Спутник	«Метеор-М» № 1, «Метеор-М» № 2, «Метеор-М» № 2-1, «Метеор-М» № 2-2
Программа исследований	Мониторинг параметров космической среды на высоте спутника
Основные характеристики	Аппаратный комплекс: Спектрометр геоактивных излучений (МСГИ-МКА): Потоки электронов в энергетическом диапазоне 0,1—15 кэВ (канал высокой чувствительности) Потоки ионов (протонов) в энергетическом диапазоне 0,1—15 кэВ (канал высокой чувствительности) Потоки электронов в энергетическом диапазоне 0,1—15 кэВ (канал низкой чувствительности) Мониторинг интегральных потоков электронов с пороговой энергией 40 кэВ Система радиационного мониторинга (КГИ-4С): Общий поток протонов с пороговой энергией: 5, 15, 25, 30 и 40 МэВ Общий поток электронов с пороговой энергией: 0,17; 0,7; 1,7; 2,0 и 3,2 МэВ Потоки протонов с пороговой энергией: 25 и 90 МэВ
Дополнительная информация	https://www.wmo-sat.info/oscar/instruments/view/822

3.2.19 Магнетометры и датчики электрического поля

Магнитное и электрическое поля в магнитосфере могут быть измерены *in situ*, когда спутник двигается по своей орбите. Если это высокоэксцентрическая орбита, то она пересекает магнитосферу на различных широтах, обеспечивая получение трехмерных профилей. Градиенты полей лучше наблюдать, когда сразу несколько спутников находятся на скоординированных орбитах. Общепринятыми приборами для этих целей являются:

a) скалярные или векторные магнетометры;

b) средства измерения потока электронов (используемые для расчета электрического поля).

Пример характеристик аппаратного комплекса Cluster для трехмерных наблюдений за магнитосферой с использованием четырех спутников приводится в таблице 3.43.

Таблица 3.43. Пример аппаратного комплекса для мониторинга параметров магнитосферы: аппаратура Cluster

CIS	*Кластерный ионный спектрометр*
Спутник	Cluster A, B, C и D (четыре спутника, работающие одновременно на скоординированных орбитах)
Программа исследований	Мониторинг магнитосферы в 3-D
Основные характеристики	Комплекс включает в себя следующие приборы: Феррозондовый магнитометр (FGM), пространственно-временной анализ флуктуаций поля (STAFF), электрические поля и волны (EFW), волны высокой частоты и исследование электронной плотности по релаксации (WHISPER), широкополосные данные (WBD), цифровой волновой процессор (DWP), измеритель электронного смещения (EDI), эксперимент: Кластерный ионный спектрометр (CIS), прибор для исследования плазмы, электронов и токов (PEACE), исследования при помощи адаптивных детекторов частиц (RAPID), прибор активного контроля потенциала космического аппарата (ASPOC)
Дополнительная информация	https://www.wmo-sat.info/oscar/instruments/view/766

ГЛАВА 4. СПУТНИКОВЫЕ ПРОГРАММЫ

Измерения, описанные в главе 2 настоящего тома, производятся в рамках спутниковых программ[1], осуществляемых космическими агентствами в соответствии с мандатом на проведение оперативных наблюдений для обслуживания конкретного сообщества пользователей, либо приоритетным мандатом для проведения научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ.

Международная координация деятельности между операторами спутников осуществляется в рамках Координационной группы по метеорологическим спутникам (КГМС), первоочередной задачей которой является поддержание группировки оперативных спутников в интересах метеорологии и мониторинга климата, и Комитета по спутниковым наблюдениям за Землей (КЕОС), который инициировал создание «виртуальных группировок» с тематическими задачами (топография поверхности океана, осадки, состав атмосферы, формирование изображений поверхности суши, вектор ветра над поверхностью океана, радиометрия цветности океана и температура поверхности моря).

Разработкой спутников и их размещением на орбите в целях предоставления оперативного обслуживания также все чаще занимаются неправительственные субъекты, в том числе коммерческие поставщики.

Помимо базовой группировки метеорологических спутников на геостационарной и околополярной солнечно-синхронной орбитах, эти программы включают в себя космические аппараты для изучения окружающей среды, нацеленные на измерение конкретных параметров атмосферы, изучение океана и льда, наблюдения за поверхностью суши, наблюдения за твердой оболочкой Земли или за космической погодой. Многие из этих космических аппаратов для изучения окружающей среды предназначены и эксплуатируются в научно-исследовательских и демонстрационных целях. Однако срок работы некоторых из них продлевается, что позволяет им достичь определенного уровня оперативного развития, а другие же закладывают основу для последующей оперативной деятельности. Их работа позволяет обеспечить непрерывное наблюдение за компонентами окружающей среды. Научно-исследовательские спутники используются в моделях и продуктах оперативного прогнозирования земной и космической погоды. Дополнительная информация о принципах и неопределенностях измерений геофизических переменных приводится в главе 5 настоящего тома.

Для каждого типа применения полеты спутников на орбите могут рассматриваться в качестве составной части группировок космических аппаратов, которые будут предоставлять преимущества в полном объеме только тогда, когда они осуществляются на основе координации действий с другими, обеспечивая тем самым синергию между различными установленными датчиками.

Ниже рассматриваются следующие категории космических аппаратов:

a) оперативные метеорологические спутники;

b) специальные космические аппараты для исследования атмосферы;

c) космические аппараты для исследования океана и морского льда;

d) космические аппараты для наблюдения за поверхностью суши;

e) космические аппараты для изучения твердой оболочки Земли;

f) космические аппараты для изучения космической погоды.

---

[1] Подробное описание этих программ имеется в интерактивном режиме в регулярно обновляемой базе данных ВМО о возможностях космического компонента наблюдений — Инструмент анализа и обзора возможностей систем наблюдений (OSCAR): https://www.wmo-sat.info/oscar/spacecapabilities.

4.1 ОПЕРАТИВНЫЕ МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИЕ СПУТНИКИ

Система оперативных метеорологических спутников образует костяк космического компонента Интегрированной глобальной системы наблюдений ВМО (ИГСНВ). Он разделяется на два компонента в соответствии с характеристиками орбиты:

a) группировка спутников на геостационарной или сильно вытянутой эллиптической орбите;

b) группировка спутников на солнечно-синхронных орбитах.

На следующем вебсайте представлена ежегодно обновляемая информация о статусе и положении оперативных метеорологических спутников: https://community.wmo.int/en/activity-areas/wmo-space-programme-wsp/global-planning.

4.1.1 Спутниковая группировка на геостационарной или сильно вытянутой эллиптической орбите

ГСО особенно подходит для оперативной метеорологии, потому что она позволяет проводить очень частые замеры (с периодичностью менее часа или минуты), как это требуется для быстро развивающихся явлений (метеорологические условия в течение суток) или для регистрации таких явлений, как молнии, вулканические извержения и лесные пожары. Пространственное разрешение обычно составляет примерно от 1 до 3 км. К основным наблюдениям с геостационарной орбиты относятся наблюдения за:

a) развитием облачности (обнаружение, зона охвата, высота верхней границы облачности и температура, тип, фазовое состояние воды в верхней части облачности, размер частиц, а также изменение этих параметров во времени);

b) профилем температуры и влажности для мониторинга атмосферной устойчивости;

c) ветром по отслеживанию перемещения облачности и за распределением водяного пара (о ветрах на разных уровнях можно судить путем отслеживания перемещения водяного пара на разных уровнях в безоблачном небе);

d) конвективными осадками (в сочетании с данными в МКВ-диапазоне, полученными со спутников на НОО, обнаружением молний и путем наблюдения за температурой верхней границы облаков и ее временными изменениями);

e) быстро изменяющимися переменными на поверхности Земли (температура поверхности моря в прибрежных районах, пожары);

f) озоном и другими малыми газовыми составляющими атмосферы, подверженными суточному колебанию или возникающими из изменяющихся источников.

Одним из недостатков геостационарной орбиты является плохая видимость районов в высоких широтах, примерно выше 60° для проведения измерений количественных характеристик и 70° для измерений качественных характеристик. Это ограничение можно преодолеть за счет использования наклонных орбит с большим эксцентриситетом (орбиты спутников Молния, Тундра или трехапогейные орбиты) вместо геостационарных орбит (см. 2.1.4, глава 2 настоящего тома). Кроме того, дифракционный предел из-за малых углов, стягиваемых на большой дальности, представляет собой проблему для получения оптических изображений с очень высоким разрешением и для МКВ-радиометрии. Наблюдения с ГСО в МКВ-диапазоне для всепогодного зондирования температуры и влажности и для измерения количественных характеристик осадков должны быть осуществимы с использованием высоких частот, по мере того как технология становится доступной.

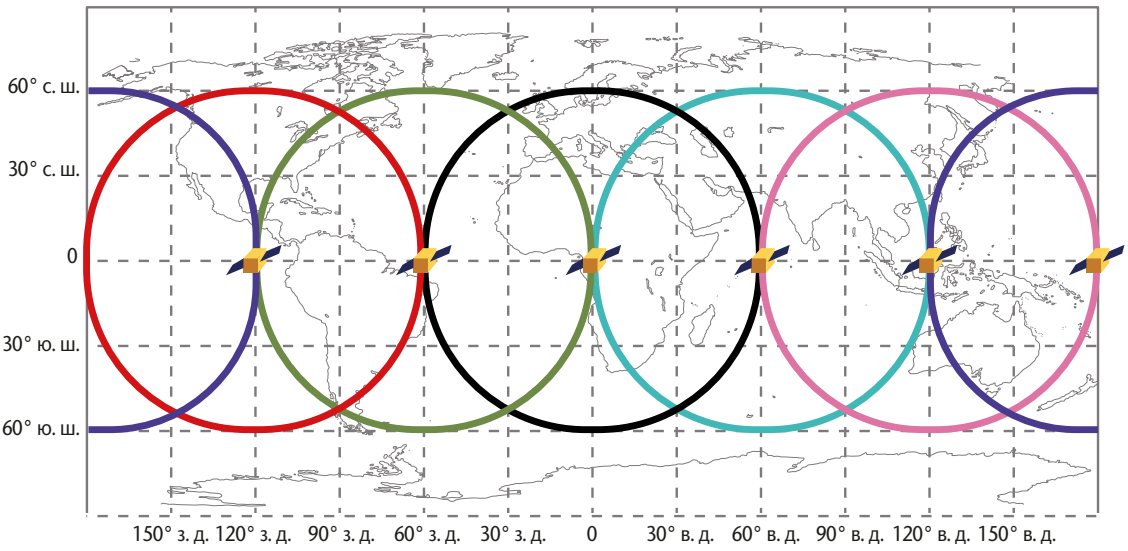


Рисунок 4.1. Зона охвата с шести геостационарных спутников, расположенных на равном расстоянии друг от друга. Окружности стягивает геоцентрический угол 60°, рассматриваемый в качестве практического предела для наблюдений за количественными характеристиками (для использования в целях определения качественных характеристик изображения фактически охватывают больший район). Все широты между 55° ю. ш. и 55° с. ш. охвачены наблюдениями.

Потребность в глобальных частых наблюдениях с геостационарных спутников, расположенных на неполярной орбите, предполагает необходимость иметь постоянно на орбите шесть космических аппаратах, расположенных на равном расстоянии друг от друга (рисунок 4.1). Для устойчивой эксплуатации такой группировки необходимо обеспечивать наличие дублирующих спутников сверх этого минимума.

В таблице 4.1 перечислены оперативные программы, согласившиеся вносить вклад в поддержание группировки метеорологических геостационарных спутников и их номинальное расчетное положение на орбите. Другие местоположения могут использоваться на временной основе, например в нештатных ситуациях.

4.1.2 Спутниковая группировка на солнечно-синхронной орбите

Солнечно-синхронная орбита обеспечивает глобальный охват, что необходимо для таких применений, как глобальное численное прогнозирование погоды (ЧПП), полярная метеорология и климатология. Для этих применений проведение очень частых замеров менее критично, чем глобальный охват и высокая точность.

К основным данным, получаемым с солнечно-синхронных орбит, относятся:

a) информация о вертикальных профилях температуры и влажности, полученная с помощью измерений радиоизлучения и радиозатмений, как важнейший вклад в ЧПП;

b) данные наблюдений за облачностью в высоких широтах в дополнение к наблюдениям с ГСО;

c) данные наблюдений за осадками с помощью МКВ радиометрии;

d) приземные переменные (температура поверхности моря и суши, растительность и индексы влажности почвы);

Таблица 4.1. Существующие и планируемые спутниковые программы оперативных метеорологических систем на ГСО

Аббревиатура	*Полное название*	*Ответственная организация*	*Номинальное расчетное положение*
GOES-16 и GOES-17	Geostationary Operational Environmental Satellite (Геостационарный оперативный спутник для изучения окружающей среды)	НУОА	75,2° з. д. и 137,2° з. д.
Meteosat	Meteorological Satellite (Метеорологический спутник)	ЕВМЕТСАТ	0°
Электро/ГОМС	Электро/Геостационарный оперативный метеорологический спутник	Росгидромет	76° в. д., 14,5° з. д. и 166° в. д.
INSAT и Kalpana	Indian National Satellite (Индийский национальный спутник) и Kalpana	ИСРО	74° в. д. и 93,5° в. д.
FY-2 и FY-4	Feng-Yun-2 и следующий за ним Feng-Yun-4	КМУ	79° в. д., 86,5° в. д., 112° в. д. и 105° в. д.
COMS и GEO KOMPSAT	Communication, Oceanography and Meteorology Satellite (Спутник в интересах связи, океанографии и метеорологии) и последующий Geostationary Korea Multi-purpose Satellite (Корейский геостационарный многоцелевой спутник)	КМА	128,2° в. д. или 116,2° в. д.
Himawari/ MTSAT	Himawari, включая многофункциональный транспортный спутник (Multifunctional Transport Satellite)	ЯМА	140° в. д.

Примечание:

НУОА = Национальное управление по океанам и атмосфере США

ЕВМЕТСАТ = Европейская организация по эксплуатации метеорологических спутников

Росгидромет = Федеральная служба Российской Федерации по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды

ИСРО = Индийская организация по космическим исследованиям

КМУ = Китайское метеорологическое управление

КМА = Корейская метеорологическая администрация

ЯМА = Японское метеорологическое агентство

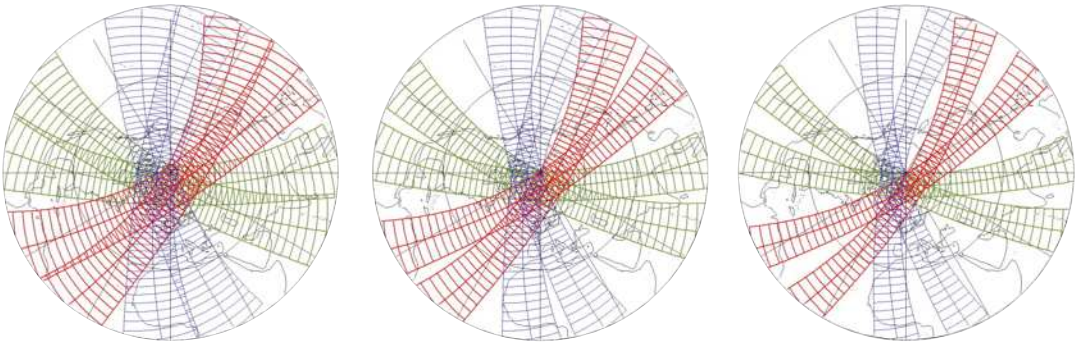
e) данные о ледовом покрове, снеге, гидрологических переменных;

f) приземные радиационные переменные (интенсивность излучения, альбедо, фотосинтетически активная радиация, доля поглощаемой в процессе фотосинтеза активной радиации;

g) данные об озоне и других малых газовых составляющих атмосферы для мониторинга окружающей среды и климата.

Дополнительными преимуществами солнечно-синхронной и других околоземных орбит является возможность проведения активного зондирования в МКВ- (радиолокатор) и оптическом (лидар) диапазонах и лимбовых измерений более высоких слоев атмосферы.

Глобальный охват с приблизительно четырехчасовыми интервалами может быть обеспечен с помощью трех спутников на солнечно-синхронной орбите на скоординированных орбитальных плоскостях, пересекающих экватор, к примеру в 05:30, 09:30 и 13:30 по местному солнечному времени при условии, что полоса захвата прибора достаточно



Полученные изображения в ВИД/ИК-диапазонах с помощью бокового сканирования — полоса захвата 2 900 км

Зондирование в ИК/МКВ диапазонах с помощью бокового сканирования — полоса захвата 2 200 км

Микроволновые радиометры с коническим сканированием — полоса захвата 1 700 км

Рисунок 4.2 Охват с трех солнечно-синхронных спутников с высоты 833 км и расположенных на равном удалении друг от друга по времени пересечения экватора (ВПЭ) в 05:30 (нисходящий узел), 09:30 (нисходящий узел) и 13:30 (восходящий узел). Для построения этой схематической диаграммы допускается, что все спутники пересекают экватор в 12:00 всемирного скоординированного времени (ВСВ). Рисунок относится к интервалу времени 3 ч и 23 мин (для того чтобы захватить две полные орбиты каждого спутника) с центром в 12:00 ВСВ. Показаны три типичные полосы захвата: вверху слева полоса 2 900 км для космического аппарата, предоставляющего изображения в ВИД/ИК-диапазонах; вверху справа полоса 2 200 км для космического аппарата, зондирующего в ИК/МКВ-диапазонах; внизу слева полоса 1 700 км для микроволновых конических сканеров. Почти 3-часовой глобальный охват обеспечивается для получения изображений в ВИД/ИК-диапазонах, принимая во внимание, что для космических аппаратов с зондированием в ВИД/МКВ-диапазонах охват почти полный достигается на широтах свыше 30 градусов. Для глобального охвата с микроволновых конических сканеров с 3-х часовым интервалом потребовалось бы восемь спутников.

широкая и измерения можно проводить как в дневное, так и в ночное время (см. рисунок 4.2). В таблице 4.2 перечислены оперативные программы, участвующие сейчас или в будущем в поддержании группировки метеорологических спутников на солнечно-синхронной орбите, по состоянию на 2012 г.

4.2 СПЕЦИАЛИЗИРОВАННЫЕ КОСМИЧЕСКИЕ АППАРАТЫ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ АТМОСФЕРЫ

4.2.1 Атмосферные осадки

Атмосферные осадки являются основной метеорологической переменной, но их измерение требует эксплуатации микроволнового спектрального диапазона с разрешением, соответствующим масштабу явления, и при относительно низкой повторяемости явления; это подразумевает использование приборов большого размера. Кроме того, соотношение между пассивным МКВ-зондированием и осадками не определено. Измеряется только общий столб осадков и только на нескольких каналах. Задача извлечения данных строго некорректна и требует моделирования вертикальной структуры облачности, которая может наблюдаться только радиолокатором. Космический аппарат TRMM (запущен в 1997 г.), на котором установлены соответствующие пассивные и активные МКВ-датчики, позволил разработать алгоритмы, которые обеспечили значительно лучшее использование пассивных измерений.

Таблица 4.2. Существующие и запланированные спутниковые программы оперативных метеорологических систем на НОО

Аббревиатура	*Полное название*	*Ответственная организация*	*Высота*	*Номинальная расчетная ВПЭ*
NOAA	National Oceanic and Atmospheric Administration (Национальное управление по океанам и атмосфере США)	НУОА	833 км	13:30 восходящий узел
Suomi-NPP	Suomi National Polar-orbiting Partnership (Суоми — Национальное полярно-орбитальное партнерство)	НУОА, НАСА	833 км	13:30 восходящий узел
JPSS	Joint Polar Satellite System (Объединенная полярная спутниковая система)	НУОА	833 км	13:30 восходящий узел
DMSP	Defense Meteorological Satellite Program (Программа метеорологических спутников Минобороны США)	МО США	833 км	05:30 нисходящий узел
GOSAT	Greenhouse Gas Observing Satellite (Спутник для наблюдений за парниковыми газами)	ЯАИ	613 км	13:00 нисходящий узел
Metop	Meteorological Operational Satellite (Метеорологический оперативный спутник)	ЕВМЕТСАТ	817 км	09:30 нисходящий узел
Metop-SG	Meteorological Operational Satellite – Second Generation (Метеорологический оперативный спутник — второе поколение)	ЕВМЕТСАТ	817 км	09:30 нисходящий узел
OCO	Orbiting Carbon Observatory (OCO-2/OCO-3 ISS) (Орбитальная углеродная обсерватория)	НАСА	705/400 км	13:30 восходящий узел/ данные отсутствуют
FY-3	Feng Yun 3 (Фен-Юн-3)	КМУ	836 км	10:00 нисходящий узел и 14:00 восходящий узел
Метеор-М	Метеор серии «М»	Росгидромет	830 км	09:30 нисходящий узел и 15:30 восходящий узел
Метеор-МП	Метеор серии «МП»	Росгидромет	830 км	09:30 нисходящий узел и 15:30 восходящий узел

Примечание:

НАСА = Национальное управление по аэронавтике и исследованию космического пространства (США)

МО США = Министерство обороны США

ЯАИ = Японское агентство аэрокосмических исследований

Информацию о других организациях см. в примечаниях к предыдущим таблицам в этой главе



Рисунок 4.3. Концепция Программы глобальных измерений осадков

TRMM позволил разработать концепцию ГПМ, которая осуществляется в международном масштабе (запущена в 2014 г.). Ее целью является обеспечение глобального охвата измерениями осадков с трехчасовыми интервалами. Поскольку минимально необходимым прибором для измерений является МКВ-радиометр с конической разверткой и ограниченной полосой захвата, трехчасовая повторяемость требует функционирования восьми спутников на равно удаленных околополярных орбитах (рисунок 4.3). Помимо этих «группировок спутников» «основная обсерватория» на наклоненной орбите, снабженная двухчастотным радиолокатором для измерения осадков, позволяет «откалибровать» все другие данные измерений с помощью пассивных радиометров, когда орбиты спутников группировки и основной лаборатории пересекаются между собой.

RainCube, 6U CubeSat с радиолокатором на 35 ГГц для наблюдения за осадками, является примером того, как небольшие спутниковые платформы могут повысить эффективность космических наблюдений. Кроме спутниковых программ, специально предназначенных для наблюдений за осадками, любой оперативный космический аппарат, снабженный МКВ-радиометрами (например, Программа метеорологических спутников Минобороны США (DMSP)), может вносить вклад в эту комплексную систему.

4.2.2 Радиозатменные измерения

Радиозатменные измерения со спутников ГНСС являются эффективным способом получения профилей температуры и влажности с вертикальным разрешением, недостижимым с помощью приборов, находящихся в надире. Оперативные системы осуществляются, например, с помощью метеорологических оперативных спутников EBMETCAT. Результаты исследований, проводимых в центрах ЧПП, свидетельствуют о положительном влиянии радиозатменных измерений на эффективность ЧПП. Наибольшее влияние наблюдается в верхнем слое тропосферы и нижнем слое стратосферы.

4.2.3 Атмосферная радиация

Ограничением моделей ЧПП и общей циркуляции является представление скорости диабатического нагрева вследствие радиационных процессов в атмосфере. Аэрозоли; характеристики процессов, происходящих внутри облака (в особенности, льдообразование); радиационные потоки в трехмерной атмосфере наряду с процессами

на верхней границе атмосферы и поверхности Земли являются их главными факторами. Часто они недостаточно хорошо известны, а для измерения некоторых из этих переменных требуются приборы для наблюдений (лидар, радиолокатор облачности и др.), что пока что нереализуемо для многоцелевых оперативных метеорологических спутников. Таким образом, наблюдение за атмосферными радиационными потоками, либо напрямую, либо для повышения точности расчетов, осуществляется с помощью приборов, установленных на оперативных спутниках или на специальных космических аппаратах.

Измерение плотности потока широкополосного атмосферного излучения в длинноволновом спектре на верхней границе атмосферы было первым наблюдением, выполненным из космоса в октябре 1959 г. со спутника Explorer VII. Во время первых полетов спутников TIROS планетарное альбедо Земли и ее радиационный баланс были плохо изучены. Радиационный баланс является важнейшей климатической переменной, поэтому непрерывное наблюдение за его компонентами (коротковолновой и длинноволновой) играет ключевую роль.

Наблюдение за полями атмосферной радиации (или величинами, которые необходимы для расчета полей атмосферной радиации) требует параллельного наблюдения за отдельными факторами, вносящими вклад в радиационный баланс, например, профилями температуры и влажности, облаками, аэрозолем, малыми газовыми составляющими. Одним из подходов к практически одновременному наблюдению за подобными геофизическими параметрами является концепция группового полета. Она находит свое воплощение в проекте A-каскад (рис. 4.4). В соответствии с этой концепцией несколько спутников располагаются на почти одной и той же солнечно-синхронной орбите на высоте 705 км, ВПЭ ~13:30 на восходящем узле орбиты, следуя друг за другом по одной земной проекции траектории с интервалом в несколько секунд.

4.2.4 Химический состав атмосферы

Важность определения химического состава атмосферы значительно возросла со временем. Первоначально все внимание уделялось мониторингу озона, особенно

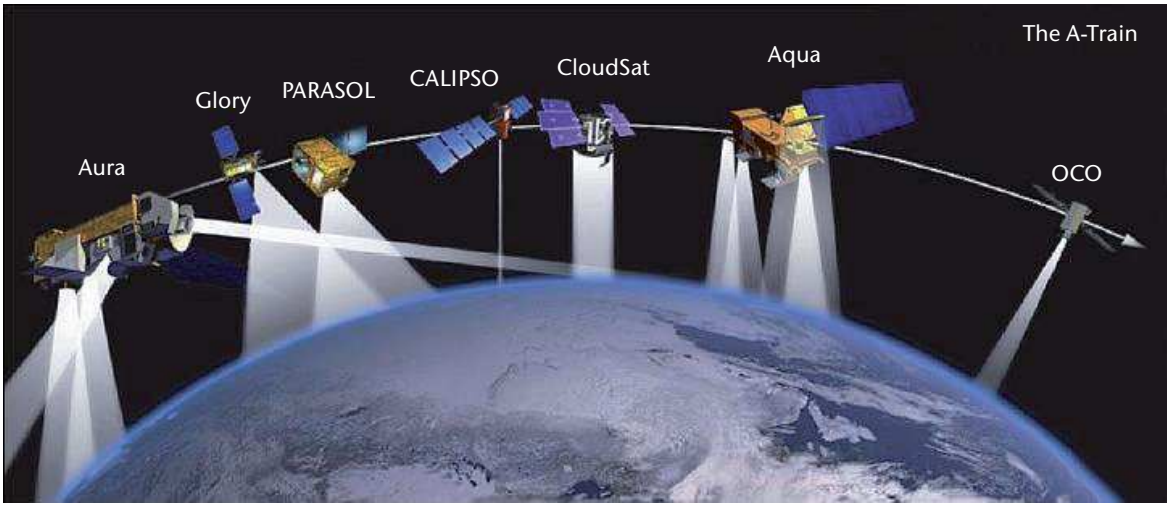


Рис. 4.4. A-Каскад. Интервал по времени пересечения экватора между спутниками, изучающими атмосферную радиацию (Glory, PARASOL, CALIPSO, CloudSat и EOS Aqua), составляет около 2 минут. Обратите внимание, что могут быть изменения в составе спутников, участвующих в A-Каскаде; к примеру, PARASOL был исключен после пяти лет работы на орбите; EOS Aura был добавлен; Glory не был выведен на орбиту при запуске; потерянный при запуске Orbiting Carbon Observatory орбитальная (обсерватория для наблюдений за углеродом (OCO)) был заменен на OCO-2/OCO-3 ISS и был добавлен спутник Программы по наблюдению глобального изменения (Global Change Observation Mission for Water - 1 (GCOM-W1)).

после обнаружения озоновой дыры; затем парниковому эффекту как движущей силе глобального потепления; и наконец, качеству воздуха, поскольку он влияет на условия жизни в биосфере. В зависимости от объекта изучения, аппаратура может быть довольно простой (например, для измерения общего содержания в столбе воздуха одного или нескольких веществ) или очень сложной (например, для вертикальных профилей различных видов веществ).

Следует отметить, что:

a) на метеорологических спутниках датчики для гиперспектрального зондирования в ИК-диапазоне, первоначально предназначенные для зондирования температуры и влажности, на самом деле внесли вклад в наблюдения за химическим составом атмосферы, но их использование для этих целей на данный момент ограничено определением общего содержания в столбе воздуха нескольких парниковых газов. УФ-, ВИД- и БИК-приборы предназначены для измерения озона и других веществ, в том числе CO_2;

b) некоторые космические программы по изучению химического состава атмосферы осуществлялись с помощью многоцелевых спутников (например, Metop, ОПСС), а некоторые — спутников, специально разработанных для изучения химического состава атмосферы.

Nimbus-7 (со стратосферно-мезосферным зондом (СМЗ), инфракрасным монитором стратосферы в зоне горизонта (LIMS), спектрометром для картирования общего количества озона (TOMC), SBUV), запущенный в 1978 г., представлял собой многоцелевой аппарат, осуществлявший сбор данных об озоне, стратосфере, состоянии океана и погоде в мире. Первый комплексный космический аппарат для изучения химического состава атмосферы, UARS, использовал лимбовое зондирование. Когда он был запущен в 1991 г., это был самый большой спутник для наблюдения за Землей из когда-либо запущенных на орбиту (масса при запуске: 6 540 кг). В таблице 4.3 представлен перечень спутников, которые предназначены в основном или полностью для измерения химического состава атмосферы.

4.2.5 **Динамика атмосферы**

Изучение динамики атмосферы осуществляется космическими аппаратами, измеряющими 3-D (пространственное) поле ветра, что является трудной задачей, поскольку ветер сам по себе не имеет отражения в электромагнитном спектре. Тем не менее, предпринимались и предпринимаются попытки решить эту проблему, так как ветер относится к базовым измерениям для целей ЧПП и моделей общей циркуляции атмосферы.

Определение ветра по движению облаков или других атмосферных образований (водяной пар) широко предпринималось на ранних стадиях применения геостационарных спутников. Это все еще является оперативной практикой работы, дающей ежедневно информацию о тысячах значений скорости ветра как вектора. Однако по отслеживанию облачности или структур распределения водяного пара ветер определяется только на одном уровне. Для обширных районов все трассеры имеют тенденцию быть в одном высотном диапазоне, что ограничивает вертикальное разрешение практически одним или двумя уровнями. С будущим появлением новых возможностей в области гиперспектрального зондирования с ГСО можно будет получать на дополнительных высотах профили водяного пара с их моделями распределения, и будет достигнуто большое вертикальное разрешение при ясном небе. Определение ветров по циркуляции атмосферного воздуха над полярными районами также производится с полярно-орбитальных спутников, используя преимущества частого прохождения над исследуемым районом.

Аналогично ГСО, в MISR (Terra, Aqua) используется стереофотограмметрический метод для одновременного получения данных о высоте и поперечном (восток-запад) движении облаков. В основе этого метода лежит использование девяти камер MISR, которые

Таблица 4.3. Спутниковые программы, предназначенные в основном или полностью для исследования химического состава атмосферы

Аббревиатура	*Полное название*	*Ответственная организация*	*Измерения*
EOS-Aura	Earth Observation System – Aura (Система наблюдения за Землей — Аура)	НАСА	Надирные в УФ/ВИД-диапазонах, МкВ лимбовые в МКВ-диапазоне
GOSAT-1, GOSAT-2	Greenhouse Gas Observing Satellite (Спутник для наблюдений за парниковыми газами)	ЯААИ	Надирные в БИК/КВИК/СВИК/ ТИК-диапазонах
Odin	Спутник Odin	ШНКС	Лимбовые в УФ/ВИД/ БИК-диапазонах, лимбовые в МКВ-диапазоне
OCO-2/OCO-3 ISS	Orbiting Carbon Observatory (Орбитальная обсерватория для наблюдений за углеродом)	НАСА	Надирные в БИК/ КВИК-диапазонах
SCISAT	Scientific Satellite (Спутник для научных целей)	ККА	Солнечно-затменные в УФ/ ВИД/БИК и КВИК/СВИК/ ТИК-диапазонах
Sentinel-4	Sentinel 4 on Meteosat Third Generation (Sentinel-4 на Meteosat третьего поколения)	ЕКА, ЕВМЕТСАТ, ЕК	Надирные в УФ/ВИД/ БИК-диапазонах
Sentinel-5P	Sentinel 5 precursor (Предшественник Sentinel-5)	ЕКА, ЕК	Надирные в УФ/ВИД/БИК/ КВИК-диапазонах
Sentinel-5	Sentinel 5 on Metop Second Generation (Sentinel-5 на Metop второго поколения)	ЕКА, ЕВМЕТСАТ, ЕК	Надирные в КВ-диапазоне

Примечание:

БИК = ближний инфракрасный диапазон

ЕК = Европейская комиссия

ЕКА = Европейское космическое агентство

КВИК = коротковолновый инфракрасный (диапазон волн)

ККА = канадское космическое агентство

СВИК = средневолновый инфракрасный диапазон

ТИК = тепловой инфракрасный спектр

ШНКС = Шведский национальный космический совет

Информацию о других организациях см. в примечаниях к предыдущим таблицам в этой главе

обеспечивают высокое разрешение изображения одного участка с разных ракурсов в течение нескольких минут. Автоматический алгоритм сопоставления метеорологических параметров позволяет обнаружить характеристики вершины облаков, которые являются общими для снимков, полученных с помощью камеры MISR, и определить изменение их положения во времени, аналогично подходу на основе последовательного смещения снимаемого участка, который используется для получения спутниковых данных о ветре.

С запуском проекта ЕКА ADM/Aeolus был установлен первый доплеровский лазерный локатор ИК-диапазона, способный осуществлять измерения ветров, наблюдаемых на горизонтальной линии прямой видимости (HLOS), с высоким вертикальным разрешением при чистом воздухе.

Также представляют интерес данные о ветрах в стратосфере и мезосфере, где облачность и водяной пар не имеют характерных особенностей, и где также отсутствуют турбулентные вихри или плотные аэрозоли. Применяемым для этого методом измерений является доплеровское смещение узкополосного спектра молекулы кислорода в области около 760 нм. Этот метод, продемонстрированный UARS, используется аппаратами Программы по изучению энергетики и динамики термосферы, ионосферы, мезосферы (Thermosphere, Ionosphere, Mesosphere Energetics and Dynamics mission (TIMED)) с доплеровским интерферометром TIMED (TIDI) на борту.

4.3 КОСМИЧЕСКИЕ АППАРАТЫ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ МИРОВОГО ОКЕАНА И МОРСКОГО ЛЬДА

Определенные виды наблюдений за океаном и льдом обеспечивались метеорологическими спутниками с самого начала космической эры. Видеоинформация на основе зондирования в видимой области спектра (ВИД), будучи самым первым применением метеорологических спутников, может обеспечить картирование морского льда. Изображения в ИК-диапазоне и изображения, получаемые с помощью РЛС с синтезированной апертурой, дополнили возможности измерения температуры поверхности моря и ледового покрова в любых погодных условиях и дополнили возможности по определению скорости приво́дного ветра. Радиолокационная скаттерометрия началась в 1978 г. Эти наблюдения за температурой поверхности моря, приво́дным ветром и ледовым покровом до сих пор обеспечиваются оперативными метеорологическими спутниками. Дополнительные измерения, такие как альтиметрия, измерение цветности океана, солености и морских волн, проводятся в рамках неметеорологических программ, иногда специально предназначенных для изучения Мирового океана и морского льда.

В таблице 4.4 приводится перечень программ, посвященных изучению Мирового океана и морского льда.

Таблица 4.4. Спутниковые программы, посвященные изучению Мирового океана и морского льда

Аббревиатура	*Полное название*	*Ответственная организация*	*Решаемые океанографические задачи*
COMS	Communication, Oceanography and Meteorology Satellite (Спутник для телесвязи, океанографии и метеорологии)	КИОНТ	Цветность океана по данным ГСО с GOCI
Coriolis	Спутник Coriolis	МО США	Приземный ветер с помощью МКВ поляриметрии
CryoSat-2	Cryosphere Satellite (Спутник для изучения криосферы)	ЕКА	Лед с помощью радиолокационной альтиметрии
CYGNSS	Cyclone Global Navigation Satellite System (Глобальная навигационная спутниковая система наблюдения за циклонами)	НАСА	Наблюдение за приво́дным ветром в тропическом циклоне

Аббревиатура	*Полное название*	*Ответственная организация*	*Решаемые океанографические задачи*
EOS-Aqua	Earth Observation System – Aqua (Система наблюдений за Землей — Аква)	НАСА	Цветность океана
EOS-Terra	Earth Observation System – Terra (Система наблюдений за Землей — Терра)	НАСА	Цветность океана
FY-3	Feng Yun-3	КМА	Цветность океана Приземный ветер с помощью рефлектометра с C- и K_u-диапазонами
GCOM-C	Global Change Observation Mission for Climate (Изучение глобальных изменений для климата)	ЯААИ	Цветность океана
GCOM-W	Global Change Observation Mission for Water (Изучение глобальных изменений для воды)	ЯААИ	Многоцелевое МКВ изображение (большая антенна)
GEO-KOMPSAT-2B	Корейский геостационарный многоцелевой спутник	КИОНТ	Цветность океана по данным ГСО с GOCI-II
HY-1	Hai Yang-1	НСОАС, КАКТ	Цветность океана
HY-2	Hai Yang-2	НСОАС, КАКТ	Радиолокационная альтиметрия Приземный ветер с помощью рефлектометра с K_u-диапазоном
ICESat-2	Ice, Cloud and Land Elevation Satellite (Спутник для изучения льда, облачности и возвышения суши)	НАСА	Лед с помощью лидарной альтиметрии
Серия Jason	Jason - 3	НУОА, ЕВМЕТСАТ, НАСА, КНЕС	Топография океана, Радиолокационная альтиметрия, геоид
JPSS	Joint Polar Satellite System (Совместная система полярных спутников)	НУОА	Цветность океана
Метеор-М/МП № 3	Метеор-М и Метеор-МП, летательные аппараты № 3	Росгидромет	Цветность океана Приземный ветер с помощью рефлектометра с K_u-диапазоном
Metop и Metop-SG	Meteorological Operational satellite (Метеорологический оперативный спутник) и follow-on Metop Second Generation (последующий спутник второго поколения)	ЕВМЕТСАТ	Приземный ветер с помощью рефлектометра с C-диапазоном

Аббревиатура	*Полное название*	*Ответственная организация*	*Решаемые океанографические задачи*
OceanSat	Satellite for the Ocean (Спутник для изучения Мирового океана)	ИСРО	Цветность океана Приземный ветер с помощью рефлектометра с K_u-диапазоном
SARAL	Satellite with Argos and Altika (Спутники с АРГОС и Алтика)	КНЕС, ИОКИ	Радиолокационная альтиметрия
Sentinel-3	Sentinel-3	ЕКА, ЕС, ЕУМ	Цветность океана, Топография океана Радиолокационная альтиметрия
Sentinel-6A/B	Sentinel-6A/B	ЕКА, ЕВМЕТСАТ, ЕК, КНЕС, НАСА, НУОА	Топография океана
SMAP	Soil Moisture Active Passive (Активно-пассивный датчик влажности почвы)	НАСА	Соленость поверхности моря
SMOS	Soil Moisture and Ocean Salinity (Влагосодержание в почве и соленость океана)	ЕКА	Соленость океана (антенна с синтезированной апертурой)
SWOT	Surface Water and Ocean Topography (Топография поверхностных вод и океана)	НАСА, КНЕС, ККА, КАСК	Топография океана и волны
Suomi-NPP	Suomi National Polar-orbiting Partnership (Национальное полярно-орбитальное партнерство)	НУОА, НАСА	Цветность океана

Примечание:

КАКТ = Китайская академия космических технологий

КАСК = Космическое агентство Соединенного Королевства

КИОНТ = Корейский институт океанических наук и технологий

КНЕС = Национальный центр космических исследований (Франция)

МО США = Министерство обороны США НСОАС = Национальное спутниковое прикладное океаническое обслуживание (Китай)

Информацию о других организациях см. в примечаниях к предыдущим таблицам в этой главе

4.3.1 Топография океана

Для наблюдения за высотой уровня моря (ВУМ) или топографией океана используются методы радиолокационной альтиметрии. Разработки начались в середине 1970-х гг., и с тех пор технология радиолокационной альтиметрии совершенствовалась, что позволило добиться повышения точности и улучшения пространственного разрешения колебаний ВУМ. Например, измерение в пространственных масштабах 100 км с периодом обращения 10 суток осуществляется с помощью серии спутников Topex/Poseidon и Jason, тогда как в рамках предстоящей миссии НАСА/КНЕС по изучению топографии поверхностных вод и океана (SWOT — Surface Water and Ocean Topography) будут производиться измерения в пространственных масштабах уже примерно 10 км, но с циклом обращения по-прежнему 10 суток. Наличие нескольких спутников на разных орбитах позволит добиться более высокого пространственного разрешения колебаний ВУМ. Для получения точных долгосрочных климатических данных об изменении уровня моря необходимо определить погрешности измерений с различных спутников. Эти задачи могут быть решены с помощью дублирования спутниковых программ (см. таблицу 4.4).

4.3.2 Цветность океана

Наблюдения за цветностью океана играют важную роль для решения целого ряда прикладных задач и проведения океанографических исследований, поскольку данные о цветности океана содержат информацию о веществах, взвешенных в океанской воде. Эти вещества могут быть как неорганическими, так и органическими, такими как фитопланктон. Глобальные наблюдения за обширными океаническими районами возможны только с помощью средств дистанционного зондирования со спутников. Первые наблюдения за цветностью океана из космоса были проведены в 1978 г. с помощью сканирующего радиометра для получения цветовых изображений прибрежных зон (CZCS — Coastal Zone Color Scanner), разработанного НАСА. С тех пор были запущены и другие приборы. Например, наблюдения за цветностью океана осуществляются с помощью многоцелевых датчиков, таких как спектрорадиометр для получения изображений среднего разрешения (MODIS — Moderate-resolution Imaging Spectroradiometer) НАСА на борту спутников Aqua и Terra, а также сканирующий спектрорадиометр среднего разрешения (MERIS — MEdium Resolution Imaging Spectrometer) ЕКА на борту Envisat и Sentinel-3. Не так давно были запущены другие датчики цветности океана, в том числе индийский радиометр для мониторинга цветности океана (OCM-2 — Ocean Colour Monitor) на борту индийского спутника Oceansat-2, система радиометров видимого инфракрасного изображения (VIIRS — Visible Infrared Imaging Radiometer Suite) на американских спутниках Suomi-NPP и JPSS, а также радиометр для наблюдения за цветностью океана и суши (OLCI — Ocean and Land Colour Instrument) на спутнике Sentinel-3. Корейский геостационарный формирователь цветовых изображений зон океана (GOCI — Korean Geostationary Ocean Color Imager) — это первый прибор для наблюдения за цветностью океана на геостационарной орбите, на смену которому придет усовершенствованный прибор на борту корейского спутника GK-2A. Геостационарная орбита позволяет проводить более частые наблюдения за цветностью океана, благодаря чему становятся возможными наблюдения за краткосрочными изменениями цветности океана, например, связанными с приливными изменениями (см. таблицу 4.4).

4.3.3 Приво́дный ветер

Приво́дный ветер относится к важнейшим видам измерений для целей океанографии, поскольку он оказывает воздействие на атмосферу и тем самым на поверхностные течения, а также интенсивность взаимодействия океана и атмосферы. Конечно он является также важной геофизической переменной для предсказания погоды, позволяющей рассчитать давление на уровне моря, которое не может быть напрямую измерено из космоса. Поэтому несколько приборов для наблюдения за ветром устанавливаются на оперативном метеорологическом космическом аппарате. В таблице 4.4 перечислены программы по изучению приво́дного ветра, которые предоставляют данные измерений

как скорости, так и направления ветра (с помощью радиолокационного скаттерометра либо с C-диапазоном, работающем в режиме постоянного сканирования, при котором сканируется полоса захвата строго вниз, либо с Ku-диапазоном с коническим сканированием; а также с помощью поляриметрических пассивных МКВ радиометров). Другие пассивные МКВ радиометры, которые могут внести вклад в наблюдения за скоростью ветра, упоминаются лишь для многоцелевых МКВ изображений с большими антеннами.

4.3.4 Соленость поверхности моря

Измерение солености является базовым видом измерений для океанографии, поскольку, наряду с температурой, она отвечает за плотность воды, и тем самым за вертикальные движения в термохалинном слое. Кроме того, она регулирует потенциальную способность поглощения из атмосферы ее малых газовых составляющих. Измерение солености из космоса возможно только с помощью низкочастотной МКВ радиометрии (L-полоса около 1,4 Мгц), которая требует использования больших антенн. Космические аппараты, изучающие соленость поверхности моря, имеют либо антенну с синтезированной апертурой, либо антенну с реальной апертурой (см. таблицу 4.4).

4.3.5 Волны

Наблюдения за волнением моря имеют большое значение для проведения океанических работ, как в открытом океане, так и в еще большей степени в прибрежных зонах. Они также очень важны для климатологии прибрежной зоны. К сожалению, это очень затруднительный вид наблюдений из космоса, поскольку прямые измерения с помощью радиолокационного альтиметра позволяют получить данные только о волнах значительной высоты и только вдоль траектории движения спутника. Перечень космических аппаратов с альтиметрами приводится в таблице 4.4.

Двухмерное (2-D) поле волнения моря можно отслеживать с помощью спектрального анализа изображений с РСА. В принципе, любой участок с РСА изображения может быть обработан с целью получения информации о преобладающем направлении и периоде волн, а также как и о направленном частотном энергетическом спектре. На практике участки отбираются с интервалом в течение прохождения спутника по всей орбите и хранятся на борту аппарата, поскольку соответствующая скорость передачи данных довольно низкая. Эту функцию выполняет ASAR на борту спутника Envisat, работающий в волновом режиме.

4.4 КОСМИЧЕСКИЕ АППАРАТЫ ДЛЯ НАБЛЮДЕНИЯ ЗА ПОВЕРХНОСТЬЮ СУШИ

Все программы полетов оперативных метеорологических спутников для получения видеоинформации обеспечивают получение информации о нескольких геофизических переменных, характеризующих поверхность суши. Например:

a) устройства отображения ВИД/ИК-информации: температура поверхности суши, индексы влажности почвы, несколько индексов для растительного покрова, несколько параметров пожаров, радиационные параметры, ледовый и снежный покров;

b) устройства отображения МКВ информации: измерение температуры поверхности суши при любых условиях погоды, влажность поверхности почвы, несколько параметров ледового и снежного покрова;

c) радиолокационные рефлектометры: влажность поверхности почвы, общая биомасса, водный эквивалент величины снежного покрова.

Однако конструкция приборов, устанавливаемых на оперативные метеорологические спутники, определяется их предназначением описывать процессы взаимодействия поверхности суши и атмосферы, что необходимо (и достаточно) для анализа и предсказания погоды, и потребностью в наблюдении пространственно-временных распределений величин, которые должны соответствовать требованиям климатического мониторинга. Настоящий раздел посвящен спутниковым программам, направленным на решение прикладных задач исследования суши в качестве главных целей, а также геофизическим переменным, таким как покров суши и его использование; относительная доля поверхности суши, покрытой растительностью; тип растительного покрова; озера и ледниковый покров; топография; мелкомасштабные параметры влажности почвы и снега, применяемые для гидрологии.

Эти применения требуют пространственного разрешения в масштабе от метров до нескольких десятков метров, что предполагает использование оптического диапазона (особенно ВИД) или радиолокатора для получения изображения (РСА). Другой сферой применения оптического изображения или РСА с очень высоким разрешением является безопасность, включая мониторинг бедствий, контроль соблюдения обязательств в рамках международных протоколов в области охраны окружающей среды и др.

4.4.1 Основные оперативные и почти оперативные космические аппараты

Наблюдение за поверхностью суши было вторым видом применения спутников, после метеорологии, которое дало толчок к развитию оперативных программ. Первый спутник для наблюдения за поверхностью суши, названный вначале ERTS (Технологический спутник для изучения природных ресурсов Земли) и затем переименованный в Landsat-1, был запущен НАСА в июле 1972 г. С тех пор другими космическими агентствами и коммерческими поставщиками были осуществлены программы наблюдений за поверхностью суши, зачастую фактически работавшие в оперативном режиме. В таблице 4.5 перечислены программы, демонстрирующие наследие преемственности или предназначенные для долгосрочных непрерывных наблюдений.

Таблица 4.5. Программы наблюдений поверхности суши, предназначенные для долгосрочных непрерывных наблюдений

Аббревиатура	*Полное название*	*Ответственная организация*	*Цель/характер программы*
Amazônia	Amazônia	ИНПЕ	Мониторинг растительности
ASNARO	Advanced Satellite with New System Architecture for Observation (Усовершенствованный спутник с архитектурой новой системы для наблюдений)	НЕК, ЮНЕФ	Коммерчески ориентированная программа
CartoSat	Satellite for Cartography (Спутник для картографии)	ИСРО	Обновление данных картографии
CBERS	China-Brazil Earth Resources Satellite (Китайско-бразильский спутник для изучения природных ресурсов Земли)	КАКТ, БКА	Изыскания и рациональное использование природных ресурсов Земли
GeoEye	GeoEye	Maxar	Коммерческая программа
КАНОПУС-В	КАНОПУС-Вулкан	Роскосмос	Мониторинг растительного покрова

Аббревиатура	*Полное название*	*Ответственная организация*	*Цель/характер программы*
Серия Landsat	Landsat and Landsat Data Continuity Mission (Landsat и Программа по обеспечению непрерывности получения данных со спутника Landsat)	ГС США, НАСА	Природные ресурсы Земли, земельный покров и изменения в землепользовании
Planet	Группировка различных спутников (Planetscope, RapidEye, Skysat)	Planet.com	Коммерческая съемка Земли
Ресурс-ДК и Ресурс-П	Ресурс-ДК и Ресурс-П	Роскосмос	НОО, большой угол наклонения
Pléiades	Pléiades (Плеяды)	КНЕС	Управление землепользованием и рисками при опасных явлениях
Серия ResourceSat	Satellite for Earth Resources (Спутник для изучения природных ресурсов Земли)	ИСРО	Изыскания и рациональное использование природных ресурсов Земли
Sentinel-2	Sentinel-2	ЕКА, ЕК	Мониторинг растительного покрова
SPOT 4, 5	Satellite Pour l'Observation de la Terre (Спутник для наблюдения Земли)	КНЕС	Изыскания и рациональное использование природных ресурсов Земли
SPOT 6, 7	Satellite Pour l'Observation de la Terre (Спутник для наблюдения Земли)	SpotImage	Коммерчески ориентированная программа
WorldView	WorldView	Maxar	Коммерческая программа

Примечание:
ИНПЕ = Национальный институт космических исследований (Бразилия)
ГС США = Геологическая служба США
НЕК = Японская электротехническая компания
ЮСЕФ = Институт экспериментальных беспилотных автономных космических аппаратов (Япония)
Информацию о других организациях см. в примечаниях к предыдущим таблицам в этой главе

4.4.2 Группировка спутников для мониторинга бедствий

Инициатива создания Группировки спутников для мониторинга бедствий (ГСМБ) изначально исходила от Британского национального космического центра (БНКЦ). Основная идея создания ГСМБ (см. рисунок 4.5) заключается в том, чтобы иметь около пяти спутников на одной орбите, отстоящих друг от друга на расстоянии, покрываемом за 20 мин полета на орбите таким образом, чтобы (узкая) полоса захвата приборов спутника (~600 км) примыкала стык в стык к следующей полосе, обеспечивая тем самым постоянный глобальный охват. Первым спутником ГСМБ был AlSat-1, запущенный в ноябре 2002 г. Группа из трех спутников, UK DMC-1, NigeriaSat-1 и Bilten Satellite, была размещена на орбите одним запуском в сентябре 2003 г. Со временем к группировке присоединились другие партнеры, и аппаратура стала более тщательно продуманной. Таблица 4.6 отображает текущую ситуацию со спутниками, которые, строго говоря, не являются частью ГСМБ, но близки им по цели, структуре и аппаратуре.

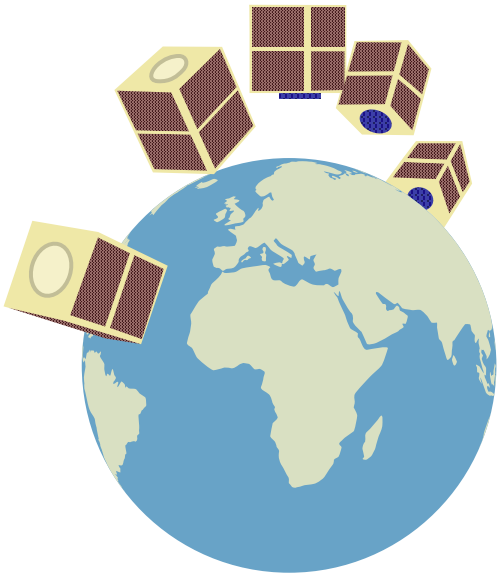


Рисунок 4.5 Концепция ГСМБ, основанная на пяти спутниках со сдвигом по фазе около 20 мин

Таблица 4.6. Спутниковые программы, входящие в ГСМБ и близкие к ней

Аббревиатура	*Полное название*	*Ответственная организация*	*Технические возможности прибора*
AlSat	Спутник Алжира	НЦКТ, Алжир	Многоспектральный и панхроматический
BJ	Beijing	НЦДЗК, Китай	Многоспектральный и панхроматический
Deimos	Deimos	ЦТПР, Испания	Многоспектральный
DubaiSat	Спутник Дубая	ЭИАСТ, Объединенные Арабские Эмираты	Многоспектральный и панхроматический
EnMAP	Программа картирования и анализа состояния окружающей среды	НАКЦ, Германия	Гиперспектральный
FORMOSAT-2	Formosa Satellite-2	НКО, Тайвань, провинция Китая	Многоспектральный и панхроматический
HJ A, B	Huan Jing A и B	КАКТ, Китай	Гиперспектральный и многоспектральный
Ingenio (SEOSat)	Ingenio (Испанский спутник для наблюдений за Землей)	ЦТПР, Испания	Многоспектральный и панхроматический
KOMPSAT	Корейский многоцелевой спутник	КИАИ, Республика Корея	Многоспектральный и панхроматический
NigeriaSat	Nigeria Satellite	НАКИР, Нигерия	Многоспектральный и панхроматический
PRISMA	Precursore IperSpettrale della Missione Applicativa (Предшествующий космический аппарат для гиперспектральных прикладных наблюдений)	ИКА, Италия	Гиперспектральный и многоспектральный

Аббревиатура	*Полное название*	*Ответственная организация*	*Технические возможности прибора*
RapidEye (5 спутников)	Программа RapidEye (5 спутников)	НАКЦ, Германия	Многоспектральный
Rasat	Спутник для наблюдения Земли	Tübitak-Uzay, Турция	Многоспектральный и панхроматический
SSOT	Sistema satelital para observación de la tierra (Спутниковая система наблюдения Земли)	ЧКА, Чили	Многоспектральный и панхроматический
SumbandilaSat	Sumbandila Satellite	ЮАНКА, Южная Африка	Многоспектральный
THEOS	Thailand Earth Observation System (Таиландская система наблюдения Земли)	ГИСТДА, Таиланд	Многоспектральный и панхроматический
TopSat	TopSat	БНКЦ, Соединенное Королевство	Многоспектральный и панхроматический
UK-DMC	UK Disaster Monitoring Constellation (Группировка спутников Соединенного Королевства для мониторинга бедствий)	БНКЦ, Соединенное Королевство	Многоспектральный
X-Sat	X Satellite	НТУ, Сингапур	Многоспектральный

Примечание:

БНКЦ = Британский национальный космический центр

ГИСТДА = Агентство по развитию геоинформационных и космических технологий

ДЛР = Германский авиационно-космический центр

ИКА = Итальянское космическое агентство

КИАИ = Корейский институт аэрокосмических исследований

НАКИР = Национальное агентство космических исследований и развития

НКО = Национальная космическая организация

НТУ = Наньянский технологический университет
НЦДЗК = Национальный центр дистанционного зондирования Китая
НЦКТ = Национальный центр космических технологий
ЦТПР = Центр технологического промышленного развития
ЧКА = Чилийское космическое агентство
ЭИАСТ = Эмиратский институт современной науки и технологии
ЮАНКА = Южноафриканское национальное космическое агентство
Информацию о других организациях см. в примечаниях к предыдущим таблицам в этой главе

4.4.3 Всепогодный мониторинг с высоким разрешением (с помощью РСА)

Все перечисленные выше космические аппараты для наблюдения за поверхностью суши имеют общее ограничение: данные наблюдений недоступны при наличии облачности. В большинстве случаев ночное время также является ограничением, поскольку большинство приборов используют только спектральный диапазон в видимой (ВИД) области спектра. При чрезвычайной ситуации, когда требуется высокое разрешение, весьма важно располагать всепогодной функциональной возможностью проводить измерения, которую может обеспечить только радиолокатор с синтезированной апертурой (РСА). Существует несколько космических аппаратов с РСА, многие из которых управляются с перспективой проведения долгосрочных непрерывных оперативных наблюдений.

Количество РСА на орбите имеет большое значение, поскольку приборы с РСА имеют узкую полосу захвата, в свою очередь их применение для мониторинга бедствий требует частого прохождения над объектом наблюдения. Кроме того, принцип работы РСА заключается в применении одной единственной частоты, в то время как различные характеристики, которые необходимо наблюдать, имеют «характерные признаки» на разных частотах. Радиолокатор с формированием изображения в составе полетной аппаратуры, установленной на Шаттле (РФИ-С/Х-РСА), летавший дважды на космическом челноке США в апреле и сентябре 1994 г., продемонстрировал преимущества получения одновременных изображений РСА в L-, С- и Х-диапазонах (L и С обеспечивались НАСА, Х — Немецким аэрокосмическим центром (НАКЦ) и Итальянским космическим агентством ИКА).

В таблице 4.7 перечислены все работающие на орбите и планируемые к запуску космические аппараты, снабженные РСА, они сгруппированы по частотному диапазону и ответственной организации.

Таблица 4.7. Работающие на орбите и планируемые к запуску программы с РСА

Аббревиатура	*Полное название*	*Ответственная организация*	*Частотный диапазон*
ALOS	Advanced Land Observing Satellite (Усовершенствованный спутник для наблюдений за поверхностью суши)	ЯААИ, Япония	L-диапазон
SAR-L (NISAR)	NASA-ISRO Synthetic Aperture Radar (Радиолокатор с синтезированной апертурой НАСА-ИСРО)	НАСА, ИСРО	L-диапазон
SAOCOM-1	Satélite argentino de observación con microondas – series 1 (Аргентинский спутник для микроволновых наблюдений — серия 1)	КОНАЕ, Аргентина	L-диапазон
SAOCOM-2	Satélite argentino de observación con microondas – series 2 (Аргентинский спутник для микроволновых наблюдений — серия 2)	КОНАЕ, Аргентина	L-диапазон
SMAP	Soil Moisture Active Passive (Активно-пассивный датчик влажности почвы)	НАСА	L-диапазон
HJ-1C	Huan Jing 1C (Хуань Цзин-1С)	КАКТ, Китай	S-диапазон
SAR-S (NISAR)	NASA-ISRO Synthetic Aperture Radar (Радиолокатор с синтезированной апертурой НАСА-ИСРО)	НАСА, ИСРО	S-диапазон
RADARSAT-2	RADARSAT	ККА, Канада	С-диапазон
RCM	RADARSATConstellation Mission (Группировка космических аппаратов РАДАРСАТ)	ККА, Канада	С-диапазон

Аббревиатура	*Полное название*	*Ответственная организация*	*Частотный диапазон*
RISAT-1	Radar Imaging Satellite – 1 (Спутник с радиолокационным формированием изображения-1)	ИСРО, Индия	С-диапазон
Sentinel-1 (A,B,C,D)	Sentinel-1 (A,B,C,D)	ЕКА	С-диапазон
CSG	Constellation of Small Satellites for Mediterranean Basin Observation (COSMO) SkyMed Second Generation (Группировка малых спутников для наблюдений за Средиземноморским бассейном (КОСМО)-СкайМед второе поколение)	ИКА, Италия	Х-диапазон
CSK	COSMO-SkyMed	ИКА, Италия	Х-диапазон
KOMPSAT-5	Korea Multi-purpose Satellite – 5 (Корейский многоцелевой спутник-5)	КИАИ, Республика Корея	Х-диапазон
Метеор М и МП	Метеор-М и Метеор-МП	Росгидромет	Х-диапазон
Paz (SEOSAR)	«Paz» (Испанский спутник с РСА для наблюдений за Землей)	ЦТПР, Испания	Х-диапазон
RISAT-2	Radar Imaging Satellite – 2 (Спутник с радиолокационным формированием изображения-2)	ИСРО, Индия	Х-диапазон
TerraSAR-X	TerraSAR X (ТерраРСА-Х)	НАКЦ, Германия	Х-диапазон
TanDEM-X	TanDEM-X (ТанДЕМ-Х)	НАКЦ, Германия	Х-диапазон

Примечание:
КОНАЕ = Национальная комиссия по космической деятельности (Аргентина)
Информацию о других организациях см. в примечаниях к предыдущим таблицам в этой главе

4.5 КОСМИЧЕСКИЕ АППАРАТЫ ДЛЯ ИЗУЧЕНИЯ ТВЕРДОЙ ОБОЛОЧКИ ЗЕМЛИ

С самого начала космических исследований спутники использовались для реконструкции формы геоида с помощью измерений с различных орбит на различных высотах, наклонениях и эксцентриситетах орбиты. Главная цель была самодостаточной: поддержать анализ осуществления программ для орбитальных спутников. С течением времени и по мере совершенствования технологий цель эволюционировала в направлении изучения самой Земли.

К целям наблюдений со спутников за твердой оболочкой Земли (см. определения на рисунке 4.6) относятся:

a) обеспечение очень точного определения параметров геоида, что является основой для нескольких соответствующих применений, особенно для пересчета измеренной высоты и приведения ее к уровню моря и для топографии океана. Наиболее распространенный метод использует радиолокационную альтиметрию с относительно высоких и высокостабильных орбит;

b) обобщение информации о динамике земной коры, полученной в результате мониторинга положения локальной точки со спутников, расположенных на хорошо известных и стабильных орбитах; стандартным способом является лазерная локация и наземные приемники ГСОМ;

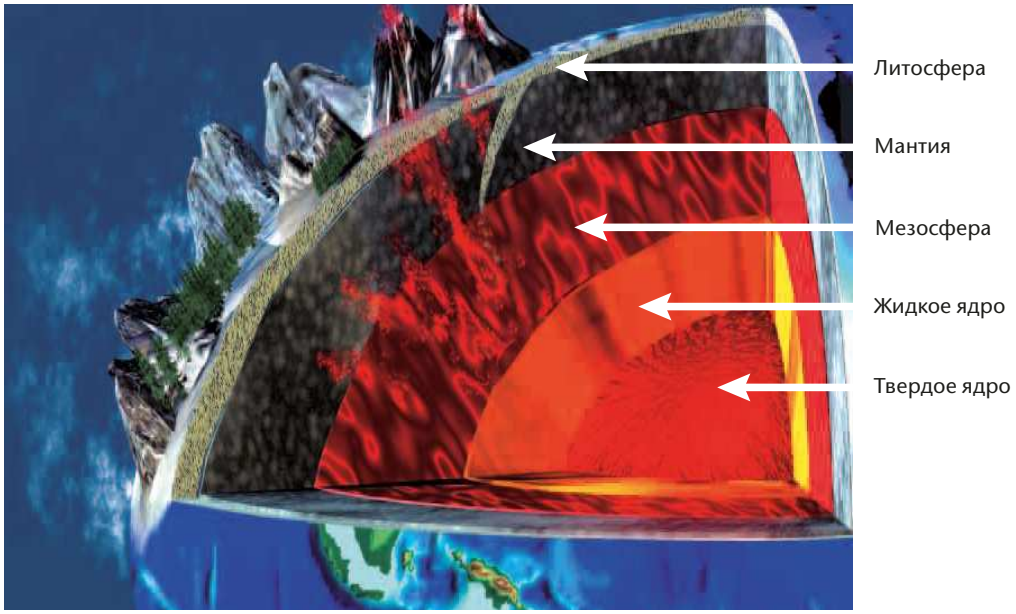


Рисунок 4.6. Стратификация твердой оболочки Земли

c) обобщение информации о динамике внешних слоев земной коры (литосфера, мантия); стандартный метод основан на использовании измерений гравитационного поля и его аномалий с очень низкоорбитальных спутников и сопровождение спутника со спутника;

d) сбор информации о внутренних частях Земли (жидкое ядро, твердое ядро) на основе наблюдений за магнитосферой путем спутниковых измерений магнитных и электрических полей.

В этом разделе рассматриваются два вида космических аппаратов:

a) те, что относятся к изучению геоида и к локации и движению земной коры (космическая геодезия);

b) те, что относятся к литосфере и внутренним слоям (недра Земли).

В таблице 4.8 перечислены специализированные космические аппараты для изучения твердой оболочки Земли в интересах либо геодезии, либо изучения недр.

4.5.1 Космическая геодезия

Основным методом реконструкции геоида (т. е. уровенной поверхности потенциала силы тяжести или поверхности геоида, которая точно совпала бы с осредненной равновесной поверхностью океана, если бы океаны были в состоянии покоя и простирались через континенты) является радиолокационная альтиметрия. Другая информация о геоиде вытекает из определения системами точного местоположения любого спутника. Некоторые из них можно упомянуть:

a) лазерные отражатели для точного измерения расстояния до спутника и скорости изменения расстояния с помощью наземного лазерного источника;

b) бортовой ретранслятор сигналов с наземных приемопередающих станций;

c) двусторонняя и двухчастотная микроволновая система слежения для наземных приемных станций;

Таблица 4.8. Специализированные космические аппараты для изучения твердой оболочки Земли

Аббревиатура	*Полное название*	*Ответственная организация*	*Системы датчиков*
STARLETTE и Stella	Satellite de taille adaptée avec réflecteurs laser pour les études de la terre, and Stella (Модифицированный спутник с лазерными отражателями для изучения Земли и Стелла)	КНЕС	Лазерная локация
LAGEOS 1 и 2	Laser Geodynamics Satellite (Спутник для лазерных измерений геодинамических процессов, 1 и 2)	ИКА, НАСА	Лазерная локация
LARES	Laser Relativity Satellite (Спутник лазерной относительности)	ИКА	Лазерная локация
GRACE (2 спутника)	Gravity Recovery and Climate Experiment (Эксперимент по изучению климата и гравитационных возмущений)	НАСА, НАКЦ, КНЕС	Акселерометр, лазерная локация, локация спутника со спутника
SWARM (3 спутника)	Спутники для исследования магнитного поля Земли и окружающей среды	ЕКА, КНЕС, ККА	Акселерометр, датчик электрического поля, магнитометры

Примечание:
Информацию о других организациях см. в примечаниях к предыдущим таблицам в этой главе

d) глобальные навигационные спутниковые системы (ГНСС);

e) астронавигационные приборы (приборы звездной ориентации), используемые для контроля высоты полета спутника, но также помогающие проводить точную орбитографию (регистрацию местоположения спутника на орбите).

Основной задачей этих систем является оказание содействия точному определению орбиты спутника, что необходимо для определенных приборов, осуществляющих измерения со спутника, наиболее чувствительные из которых являются альтиметры и лимбовые зонды. Преимущество геодезического космического аппарата заключается в статистическом анализе полученных данных. В этом разделе рассматривается только применение с использованием противоположного объекта: определение координат наземной станции при условии, что орбита хорошо известна. С этой целью для решения задач космической геодезии была создана Международная система наземных координат для сбора и анализа данных в ряде координатных центров. Система включает в себя несколько спутников, предназначенных только для задач космической геодезии. Они перечислены в таблице 4.8.

4.5.2 **Недра Земли**

Геометрическое изображение геоида сегодня довольно точное, несмотря на его сложность. С помощью математических моделей, использующих сферические гармоники, на сегодня достигнута точность в пределах 1 см или менее. На рисунке 4.7 представлено современное изображение геоида. На нем можно увидеть, что поверхность Земли вовсе не образует эллипсоид правильной формы, хотя вертикальный диапазон высоты геоида колеблется в пределах 200 м. Правильность формы геоида подвержена волнистости, образуемой различными длинами волн в диапазоне от многих тысяч до нескольких

сотен километров. Одной из задач является выявление связей между этими аномалиями и недрами Земли, прежде всего в литосфере, поскольку она непосредственно связана с вулканической деятельностью и землетрясениями.

Специализированные космические аппараты, предназначенные для изучения недр Земли, используют измерения гравитации и градиента гравитационного поля, представляющие внешние слои (литосфера, мантия и верхняя мезосфера); и магнитного и электрического полей, имеющих большое значение для внутренних слоев (нижние слои мезосферы, жидкое ядро и твердое ядро) (см. рисунок 4.6). В таблице 4.8 перечислены космические аппараты, предназначенные для изучения недр Земли.

4.6 КОСМИЧЕСКИЕ АППАРАТЫ ДЛЯ ИЗУЧЕНИЯ КОСМИЧЕСКОЙ ПОГОДЫ

Хотя термин «космическая погода» появился относительно недавно, соответствующая деятельность берет свое начало на заре космической эры, если не раньше, потому что космическая погода оказывает сильное воздействие на безопасность спутников на орбите и человека в космосе. Информированность и предсказание условий космического пространства сегодня превратились в необходимые предпосылки для осуществления долгосрочной устойчивой космической деятельности. Кроме того, отмечается все большее осознание воздействия космической погоды на технические устройства и аппаратуру на Земле.

Космическая погода характеризуется электромагнитными вспышками в диапазоне от рентгеновского до радиоизлучений, потоками солнечных высокоэнергетических частиц, возмущениями в интенсивности и скорости солнечного ветра, например такими как межпланетный коронарный массовый выброс, распространяющий сгустки плазмы. В частности, модуляция солнечного ветра сжимает и формирует магнитосферу, и это воздействие распространяется на нижерасположенные термосферу и ионосферу. Телесвязь и даже электросети, трубопроводы и другие проводящие сети на поверхности Земли подвержены воздействию (индуцированных геомагнитных токов, к примеру). Быстрые магнитные изменения на поверхности Земли, которые случаются во время геомагнитных бурь и которые связаны с космической погодой, также могут иметь большое значение для такой деятельности, как геофизическое картирование и добыча углеводородов. Обнаружены взаимосвязи между блуждающими ионосферными возмущениями и атмосферными гравитационными волнами в термосфере.

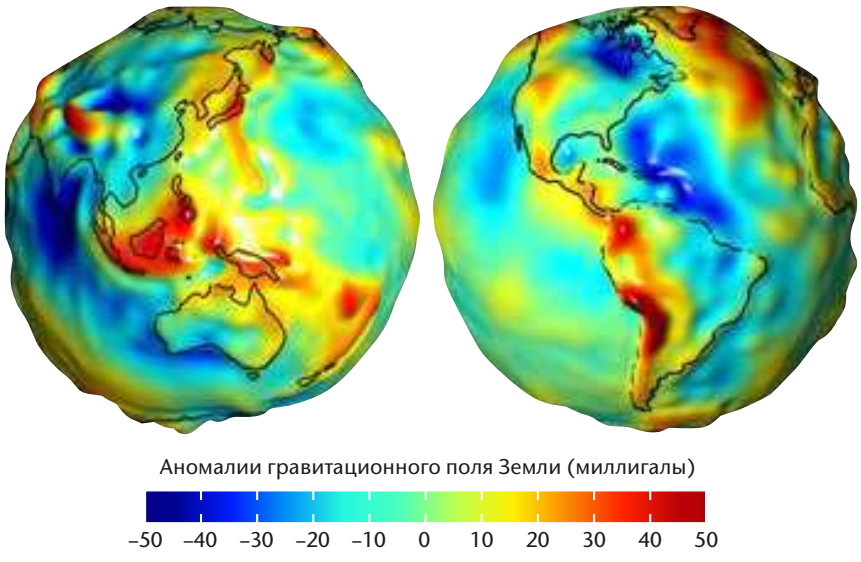


Рисунок 4.7. Трехмерное наглядное представление геоидальных высот. Единицы: мГал (1 Гал = 0,01 м/с² и 1 мГал ≈ 10^{-6} g_0)

Мониторинг космической погоды заключает в себе два главных аспекта: мониторинг электромагнитный и эмиссии солнечных частиц, а также солнечного ветра для описания источника модуляции (солнечная активность), и мониторинг воздействия этой деятельности в магнитосфере и ниже до самой поверхности Земли.

4.6.1 Мониторинг солнечной активности

Полеты космических аппаратов для изучения солнечных физических явлений осуществляются с самых первых дней космической эры либо на орбите в околоземном пространстве, либо на геоцентрической околоземной орбите.

Два «стража» солнечного ветра, совместный НАСА/ЕКА космический аппарат SOHO (обсерватория для наблюдения за Солнцем и проведения гелиосферических исследований) и космический аппарат НАСА под названием ACE (усовершенствованный исследователь состава высокоэнергетических частиц), были запущены соответственно в 1995 г. и 1998 г. SOHO и ACE были размещены на орбите L1 в точке Лагранжа (на расстоянии 1 % от расстояния между Солнцем и Землей со стороны Земли). С этой выигрышной позиции два спутника измеряют солнечный ветер и связанное с ним магнитное поле приблизительно за час до того, как он достигнет Земли. В 2006 г. в сотрудничестве с несколькими европейскими научными институтами НАСА начало программу по изучению солнечной активности (STEREO): два спутника на орбите Земли, движущихся вокруг Солнца, следящих за Солнцем с меняющихся местоположений для получения стереоскопических изображений динамики коронарного массового выброса и, в то же время, для измерения из точки расположения спутника локальных характерных особенностей солнечного ветра.

На нескольких космических аппаратах, размещенных на орбите вокруг Земли, также установлены приборы, предназначенные для непрерывного мониторинга солнечной активности. В таблице 4.9 перечислены спутники, которые отслеживают солнечную активность из положения на орбите в околоземном пространстве, либо на геоцентрической околоземной орбите. Кроме того, некоторые геостационарные метеорологические спутники (серии GOES или FY-4) вносят вклад или будут вносить вклад в солнечный мониторинг.

Таблица 4.9. Специальные космические аппараты для мониторинга солнечной активности

Аббревиатура	*Полное название*	*Ответственная организация*	*Орбита*
ACE	Advanced Composition Explorer (Усовершенствованный исследователь состава высокоэнергетических частиц)	НАСА	Точка Лагранжа L1
Aditya-1	Спутник Aditya-1	ИСРО	НОО, солнечно-синхронная
DSCOVR	Deep Space Climate Observatory (Климатическая обсерватория на орбите в околоземном пространстве)	НУОА, НАСА	Точка Лагранжа L1
Hinode	Hinode (бывшее название: SOLAR-B))	ЯААИ	НОО, солнечно-синхронная
IRIS	Interface Region Imaging Spectrograph (Спектрограф для отображения граничной области)	НАСА	НОО, солнечно-синхронная
Picard	Picard	КНЕС	НОО, солнечно-синхронная

Аббревиатура	*Полное название*	*Ответственная организация*	*Орбита*
PROBA 1 и 2	Project for On-board Autonomy (Проект автономного полета на борту спутников 1 и 2)	ЕКА	НОО, солнечно-синхронная
RHESSI	Reuven Ramaty High Energy Solar Spectroscopic Imager (Спектроскопический регистратор солнечных частиц высокой энергии Ровена Ромати)	НАСА	НОО, с малым углом наклонения
SDO	Solar Dynamics Observatory (Обсерватория солнечной динамики)	НАСА	Геосинхронная, с малым углом наклонения
SOHO	Solar and Heliospheric Observatory (Обсерватория для солнечных и гелиосферических исследований)	ЕКА, НАСА	Точка Лагранжа L1
Solar Orbiter	Solar Orbiter	ЕКА, НАСА	Солнечная орбита
Solar Probe Plus	Solar Probe Plus	НАСА	Солнечная орбита
STEREO (2 спутника)	Solar–Terrestrial Relations Observatory (Обсерватория для изучения солнечно-земных связей)	НАСА	Плоскость эклиптики
TIMED	Thermosphere, Ionosphere, Mesosphere Energetics and Dynamics mission (Программа изучения энергетики и динамики термосферы, ионосферы, мезосферы)	НАСА	НОО, с большим углом наклонения
WIND	Комплексная орбитальная лаборатория для долгосрочных измерений солнечного ветра	НАСА	Точка Лагранжа L1

Примечание:
Информацию о других организациях см. в примечаниях к предыдущим таблицам в этой главе

4.6.2 **Мониторинг магнитосферы и ионосферы**

В расположенных ближе к Земле (см. рисунок 4.8 a) и b)) слоях термосферы и ионосферы космическая погода проявляется более турбулентно. Главной движущей силой ионизированного состояния ионосферы является солнечное электромагнитное излучение (крайняя ультрафиолетовая и ультрафиолетовая области спектра), которая, в свою очередь, модулируется солнечной активностью. Ионосфера подвержена воздействию волн, бурь и блуждающих возмущений. В результате взаимодействия с магнитными бурями могут отмечаться потоки энергетически заряженных частиц и электрические токи, которые влияют на распространение радиоволн. Картирование распределения электронной плотности в ионосферной «е-области» позволяет сделать вывод об ионосферной проводимости и токах. Когда эта информация увязывается с данными о магнитном поле, она позволяет отделить внутренний компонент магнитного поля (из-за твердой оболочки Земли) от внешних компонентов. Мелкомасштабные особенности и вихревые движения в ионосфере могут вызывать рассеяние радиоволн (мерцание), которое оказывает воздействие на надежность прохождения радиосвязи в ионосфере.

4.6.2.1 *Наблюдения за магнитосферой*

Использование космических аппаратов, предназначенных для изучения магнитосферы, имеет проверенные временем традиции. Двумя яркими примерами могут служить Проект по изучению изменения во времени важных явлений и крупномасштабных взаимосвязей в условиях суббурь (THEMIS) и Крупномасштабная программа для изучения магнитосферы Земли (MMS).

THEMIS — это спутниковый проект НАСА, запущенный в 2007 г. Он включает в себя группировку из пяти небольших спутников, расположенных на высокоэксцентрических орбитах, пересекающих магнитосферу на нескольких высотах (см. рисунок 4.9), соответствующих периодам в диапазоне от 0,8 до 4 дней.

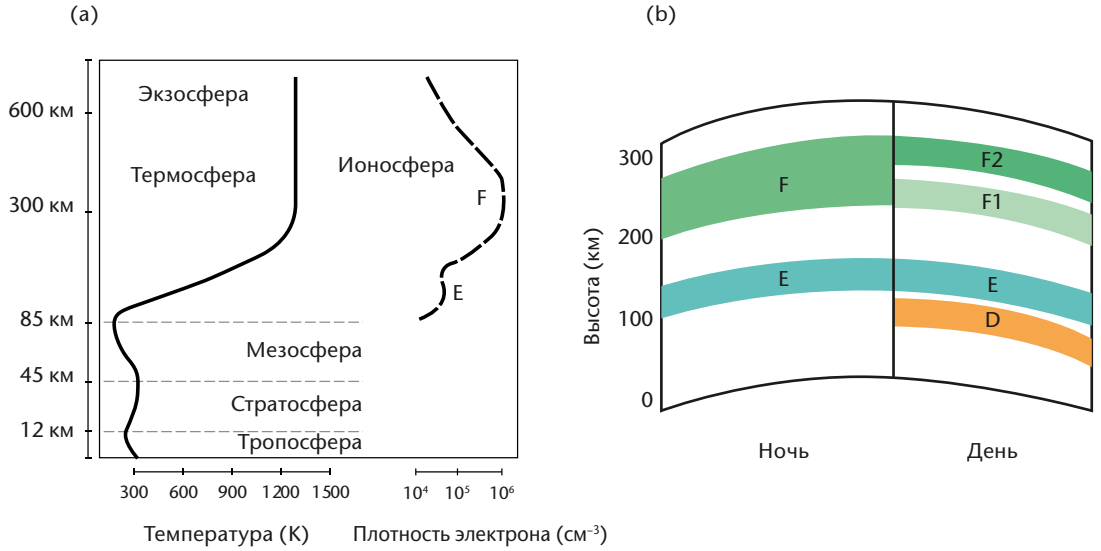


Рисунок 4.8. a) Стратификация атмосферы ниже и выше мезопаузы; b) уровни большей концентрации электронов. Самая высокая концентрация в слое F2, днем и ночью.

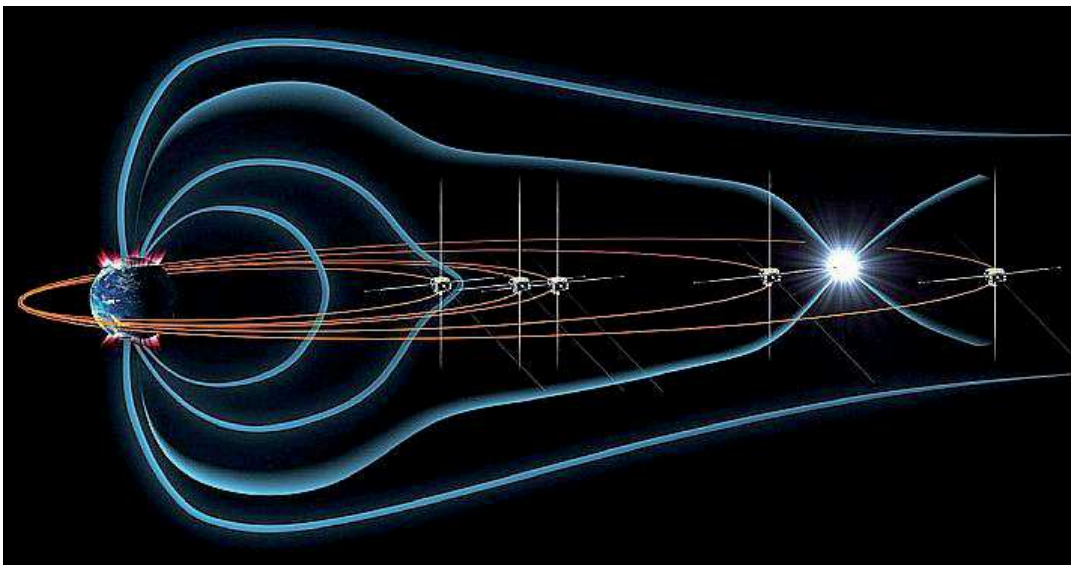


Рисунок 4.9. Орбиты пяти спутников THEMIS в магнитосфере. Белая вспышка показывает высвобождение энергии в результате магнитосферной суббури.

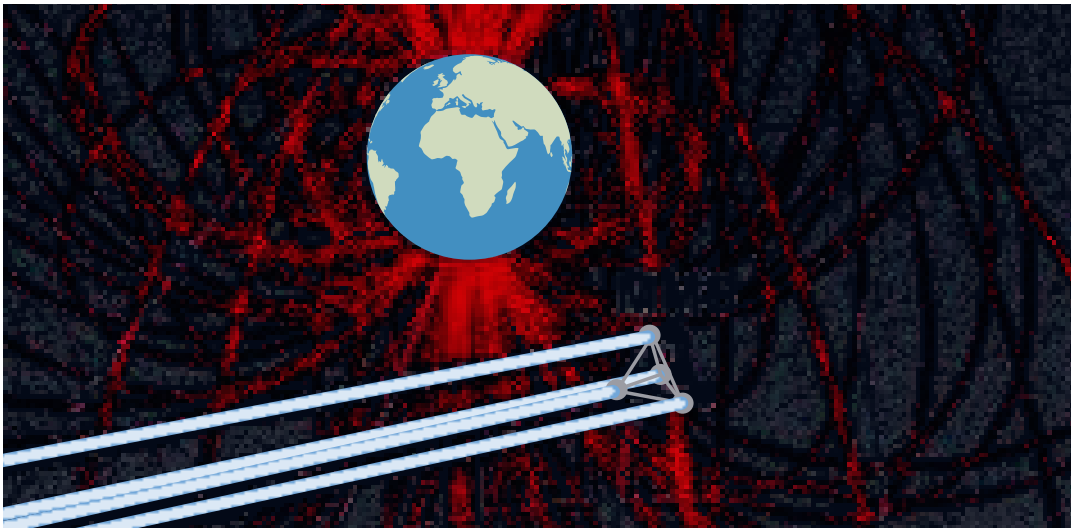


Рисунок 4.10. Четыре спутника MMS, входящих в группировку. Четырехгранная схема для захвата трехмерной (3-D) структуры встречающихся узлов перезамыкания.

THEMIS измеряет напряженность магнитного поля, электрических полей и потоков заряженных частиц для того, чтобы изучать физические процессы в околоземном космосе, которые инициируют бурные всплески полярных сияний, происходящих в период суббурь в магнитосфере Земли. Эта система также включает ряд наземных станций, которые занимаются регистрацией полярных сияний и измерением поверхностной напряженности магнитного поля.

Разработанная НАСА спутниковая программа для изучения магнитосферы Земли (MMS) основывается на группировке из четырех спутников, расположенных подобно THEMIS на высокоэксцентрических орбитах, простирающихся в магнитосфере (см. рисунок 4.10). Плазменные анализаторы, детекторы энергетически заряженных частиц, магнитометры и приборы для измерения электрического поля используются для изучения физики малых частиц перезамыкания магнитных линий, являющихся основной движущей силой космической погоды. В таблице 4.10 перечислены космические аппараты, специально предназначенные для изучения магнитосферы.

Таблица 4.10. Неполный перечень космических аппаратов, расположенных на орбитах в пределах магнитосферы

Аббревиатура	*Полное название*	*Ответственная организация*	*Орбита*
Арктика-М	Арктика-М	Росгидромет	Орбита «Молния»
ARTEMIS	Acceleration, Reconnection, Turbulence, and Electrodynamics of the Moon's Interaction with the Sun (Ускорение, перезамыкание, турбуленция и электродинамика взаимодействия Луны и Солнца)	НАСА	Лунная орбита
C/NOFS	Communication/Navigation Outage Forecasting System (Система прогнозирования перебоев в работе систем связи/навигации)	МО США, НАСА	НОО, с большим углом наклонения

Аббревиатура	*Полное название*	*Ответственная организация*	*Орбита*
CASSIOPE	Cascade SmallSat and Ionospheric Polar Explorer (Каскад малых спутников и спутник для исследования ионосферы над полярными регионами)	KKA	Высокоэллиптическая, с большим углом наклонения, на относительно малой высоте
Cluster (4 спутника)	Cluster	ЕКА, НАСА	Высокоэллиптическая, с полярным углом наклонения, четырехгранная спутниковая группировка
Geotail	Geotail	ЯААИ, НАСА	Экстремальноэллиптическая, с малым углом наклонения, пересекающая орбиту Луны
IBEX	Interstellar Boundary Explorer (Исследователь межзвездных границ)	НАСА	Высокоэллиптическая, с малым углом наклонения
IMAGE (или Explorer 78)	Imager for Magnetopause-to-Aurora Global Exploration (Устройство по формированию изображений для глобального исследования авроральной области и магнитопаузы)	НАСА	С высоким эксцентриситетом, с полярным углом наклонения
Ионозонд (5 спутников)	Ионозонд	Роскосмос	4 спутника на солнечно-синхронной орбите, один на меняющейся орбите
MMS (4 спутника)	Magnetospheric Multiscale mission (Крупномасштабная программа для магнитосферы)	НАСА	Высокоэллиптическая, с малым углом наклонения, четырехгранная спутниковая группировка
SAMPEX (или Explorer 68)	Solar Anomalous and Magnetospheric Particle Explorer (Спутник для исследования солнечных аномалий и магнитосферных частиц)	НАСА	Полярная орбита
THEMIS (5 спутников)	Time History of Events and Macroscale Interactions during Substorms (Изменение во времени важных явлений и крупномасштабных взаимосвязей в условиях суббурь)	НАСА	Высокоэллиптическая, с малым углом наклонения, апогей на 5 различных высотах
TWINS (2 спутника)	Two Wide-angle Imaging Neutral-atom Spectrometers (Два широкоугольных спектрометра для получения изображения с нейтральным атомом)	НАСА, ВВС США	Орбита «Молния»

Аббревиатура	*Полное название*	*Ответственная организация*	*Орбита*
VAP (2 спутника)	Van Allen Probe (Зонд Вана Аллена, бывшая РБСП — программа зондов для изучения радиационного пояса)	НАСА	Высокоэллиптическая, с малым углом наклонения, пересекающая радиационный пояс

Примечание:
Информацию о других организациях см. в примечаниях к предыдущим таблицам в этой главе

В разделе 4.5 описан ряд низкоорбитальных космических аппаратов, на которых также размещены приборы для соответствующих исследований магнитосферы:

a) Ørsted: феррозондовый векторный магнитометр (ФВМ) и скалярный магнитометр Оверхаузера (СМО);

b) SAC-C: прибор для картирования магнитных полей/Ørsted-2 (MMS/Ørsted-2);

c) CHAMP: магнитометрическая приборно-агрегатная система (МИАС);

d) SWARM: абсолютный скалярный магнитометр (АСМ), магнитометр векторного поля (МВП) и прибор для измерения электрического поля (ПЭП).

4.6.2.2 ***Наблюдения за ионосферой***

С появлением радиозатменного зондирования профиль плотности электронов в ионосфере стал наиболее хорошо измеряемой переменной, связанной с космической погодой.

Сигнал от навигационных спутников (ГСОМ, ГЛОНАСС, Compass, Galileo) подвержен воздействию, обусловленному вращением электрического поля, и задержкам, вызванным ионосферой. Для того чтобы скорректировать это воздействие, используются, по крайней мере, две частоты. В настоящее время используются три полосы частот: ~1 180 МГц, ~1 580 МГц и ~1 250 МГц. Путем дифференциации двух или более сигналов получается информация относительно:

a) общего содержания электронов (ОСЭ);

b) профиля плотности электронов.

Следует отметить, что ОСЭ, несмотря на интегрирование вдоль луча замера, измеряется для полных высот; поэтому возможно восстановить вертикальный профиль, используя метод томографии. Несколько приборов для проведения радиозатменных измерений сейчас работают в космосе как на многоцелевых спутниках, так и на специальных платформах (например, группировка COSMIC, COSMIC-2).

Радиолокационные альтиметры также обеспечивают наблюдения за ОСЭ на двух частотах, обычно на ~13,5 ГГц и ~5,3 ГГц. Охват наблюдениями только в надире, а томография невозможна; однако поскольку космические аппараты для альтиметрии часто размещаются на высоких орбитах (например, 1 336 км для аппарата Jason), измерение проводится в нижних слоях плазмосферы (слой над термосферой, на высоте от ~1 000 до ~40 000 км).

Непосредственное измерение ОСЭ также возможно путем анализа фазовой задержки сигналов на двух или трех частотах, передаваемых спутником ГНСС и принимаемых спутником на низкой орбите (НОС). В этом случае ОСЭ измеряется вдоль луча обзора, идущего со спутника ГНСС (высота орбиты ~20 000 км) на спутник НОС (высота

орбиты ~800 км), таким образом, замер производится для середины плазмосферы. Количество имеющихся спутников ГНСС довольно большое: для систем ГСОМ и ГЛОНАСС на каждую по ~24 спутника, ~30 – для Galileo, ~35 — для Compass, составляя в общем количестве до 110 аппаратов с достаточно хорошим глобальным распределением.

4.6.2.3 *Наблюдения за условиями в космическом пространстве с оперативных метеорологических спутников*

Группировки оперативных метеорологических спутников вносят значительный вклад в мониторинг космической погоды. Во многих случаях основное внимание уделяется обнаружению в реальных условиях потоков энергетически заряженных частиц, которые представляют угрозу для электроники, установленной на борту космических аппаратов, и других подсистем, чувствительных к корпускулярному излучению. Во многих случаях также измеряются магнитные и электрические поля, а также солнечная активность. Однако параметры орбит метеорологических спутников не отвечают всем требованиям к проведению мониторинга условий космического пространства: например, диапазон высот орбиты от 90 до 300 км не может быть охвачен или солнечно-синхронные орбиты не могут захватывать суточный цикл, а значит появляется систематическая погрешность замера. Тем не менее, долгосрочное непрерывное наличие большого числа метеорологических спутников представляет собой неоценимый вклад в обеспечение мониторинга космической погоды.

В таблице 4.11 представлена относящаяся к космической погоде информация, получаемая с различных серий оперативных метеорологических спутников. Аппаратура для радиозатменных наблюдений (см. раздел 4.2.2) в таблицу не включена.

Таблица 4.11. Оперативные метеорологические космические аппараты с приборами, проводящими наблюдения за космической погодой

Серии спутников	*Аппаратура для проведения мониторинга in situ космической среды*
GOES с 11 по 15	Space Environment Monitor (SEM) (с англ. — Комплект приборов для мониторинга космической среды): комплект приборов для измерения заряженных частиц, измеритель солнечного рентгеновского излучения и магнитного поля Solar X-ray Imager (SXI) (с англ. — Формирователь изображения Солнца в рентгеновских лучах)
GOES R, S, T, U	Space Environment In Situ Suite (SEISS) (с англ. — Комплект приборов для измерения заряженных частиц в солнечном ветре и космических лучей) Extreme Ultraviolet Sensor/X-Ray Sensor Irradiance Sensors (EXIS) (с англ. — Датчик для измерения экстремального УФ-излучения/датчик рентгеновского излучения и датчики интенсивности излучения Solar Ultraviolet Imager (SUVI) (с англ. — Формирователь изображения солнечного УФ-излучения Magnetometer (MAG) (с англ. — Магнитометр)
Электро-Л Электро-М	ГГАК-Э: Гелиогеофизический инструментальный комплекс для измерений заряженных частиц солнечного ветра и космических лучей.
FY-2	SEM для регистрации заряженных частиц солнечного ветра
FY-4	SEM для регистрации заряженных частиц солнечного ветра Imaging telescope for incoming X-rays and extreme UV from the Sun (Solar X EUV) (с англ. — Телескоп для регистрации приходящих рентгеновских лучей и экстремального УФ-излучения от Солнца)
Himawari-8/9	Space Environment Data Acquisition monitor (SEDA) (с англ. — устройство сбора данных о космической среде) для измерения потока электронов и протонов
NOAA с 15 по 19 Metop A, B	SEM/2 для детектирования протонов средней энергии и результирующей энергии

Серии спутников	*Аппаратура для проведения мониторинга in situ космической среды*
JPSS	SEM для Национальной системы оперативных полярно-орбитальных спутников для наблюдений за окружающей средой (SEM-N), включая спектрометр для осаждающихся электронов и ионов, спектрометр для частиц средней энергии и всенаправленные детекторы для частиц высоких энергий
DMSP с F16 до S20	Special Sensor Ion and Electron Scintillation Monitor (SSIES) (с англ. — Монитор со специальным датчиком для определения флуктуации ионов и электронов) Special Sensor Precipitating Electron and Ion Spectrometer (SSJ5) (с англ. — Датчик для ускорения электронов и ионов) Special Sensor Magnetometer (SSM) (с англ. — Датчик-магнитометр) Special Sensor Ultraviolet Limb Imager (SSULI) (с англ. — Специальное сканирующее устройство в ультрафиолетовом диапазоне для измерения лимба Земли) Special Sensor Ultraviolet Spectrographic Imager (SSUSI) (с англ. — Спектрографический формирователь изображений в УФ диапазоне со специальным датчиком)
Метеор-М	Системный комплекс геофизического мониторинга (СКГМ-М), включая: Многоканальный спектрометр геоактивных корпускулярных излучений (МСГИ-МКА) Система радиационного мониторинга (KGI-4C)
Метеор-МР	Системный комплекс геофизического мониторинга, усовершенствованный после ГГАК-М (ГГАК-МР)
FY-3 A, B	SEM для заряженных частиц солнечного ветра
FY-3 от C до G	Space Environment Suite (SES) (с англ. — комплекс средств для наблюдения за космическим пространством), включая: SEM, такой же как на FY-3A и FY-3B Wide-Field Auroral Imager (WAI) (с англ. — широкопольный формирователь изображений полярного сияния) Ionospheric Photometer (IPM) (с англ. — ионосферный фотометр)

ГЛАВА 5. НАБЛЮДЕНИЯ ЗА ГЕОФИЗИЧЕСКИМИ ПЕРЕМЕННЫМИ ИЗ КОСМОСА

5.1 ВВЕДЕНИЕ

В настоящей главе представлен обзор геофизических переменных, которые можно наблюдать из космоса, и характеристик, которые могут быть рассчитаны для выведения геофизических переменных. Характеристики рассчитываются на основе рассмотрения физического принципа, взятого для каждой методики измерения, и самой современной технологии прибора на момент написания настоящей главы и в обозримом будущем.

Используются допущения для получения метода, обеспечивающего репрезентативную оценку в каждом конкретном случае. Количественные данные не обязательно представляют реальные показатели работы конкретного прибора, но предназначены для иллюстрации относительных показателей различных методов дистанционного зондирования.

5.1.1 Уровни обработки данных

Для целей настоящего Руководства делается акцент на геофизических переменных, которые можно получить путем обработки полученных данных от одного прибора или комплекта взаимодействующих приборов. Для получения продукции могут использоваться сложные алгоритмы, физические или статистические модели и поддерживающая информация из внешних источников, либо дополнительная (необходимая для обработки), либо вспомогательная (для облегчения обработки). Настоящая глава посвящена продукции, которая может быть получена с использованием ограниченного количества информации из внешних источников, когда такая внешняя информация играет незначительную роль по сравнению с данными, полученными со спутникового прибора, и когда используемая модель не привносит значительную систематическую погрешность. Например, моделирование физического явления, управляющего переменной, модели радиационного переноса и модели инверсионного извлечения информации относятся к вопросам, рассматриваемым в этой главе. За рамками настоящей главы остаются, например, вопросы усвоения информации, полученной от слияния данных нескольких измерений, и фоновых полей, которые объединяют физические процессы явления и динамические характеристики модели таким образом, что вклад спутника в выходную продукцию едва различим.

В этой главе будут рассматриваться вопросы продукции уровня 2 и некоторых видов продукции уровней 3 и 4, для выпуска которых существует хорошо отработанная и общепризнанная методология (см. уровни обработки, установленные в таблице 2.11, раздел 2.3.2.6, глава 2 настоящего тома).

5.1.2 Качество продукции

Для полученных со спутника изображений, используемых напрямую для их интерпретации человеком, можно рассмотреть несколько критериев качества; они включают в себя пространственную разрешающую способность, точность геолокации, сохранение точности после калибровки для всех последовательных изображений или, в случае композитного изображения с цветопередачей в формате КЗГ (красный-зеленый-голубой), стабильность цвета в представлении заданных свойств в пределах наблюдаемой области . Эти компоненты качества продукции в формате изображений в дальнейшем не рассматриваются в настоящей главе.

В данной главе мы пытаемся рассмотреть вопросы, относящиеся к качеству количественных видов продукции с числовыми данными, которые могут использоваться в автоматизированных процедурах и численных моделях. Эту оценку затем можно будет сравнить с требованиями, предъявляемыми к тем же видам продукции.

Качество продукции здесь определяется следующими параметрами:

a) атмосферный объем (для вертикальных профилей);

b) горизонтальная разрешающая способность (Δx);

c) вертикальная разрешающая способность (Δz) (для вертикальных профилей);

d) цикл наблюдений (Δt);

e) точность (погрешность);

f) своевременность (δ_t).

5.1.2.1 *Атмосферные объемы (относятся к наблюдениям в трехмерном (3D) измерении)*

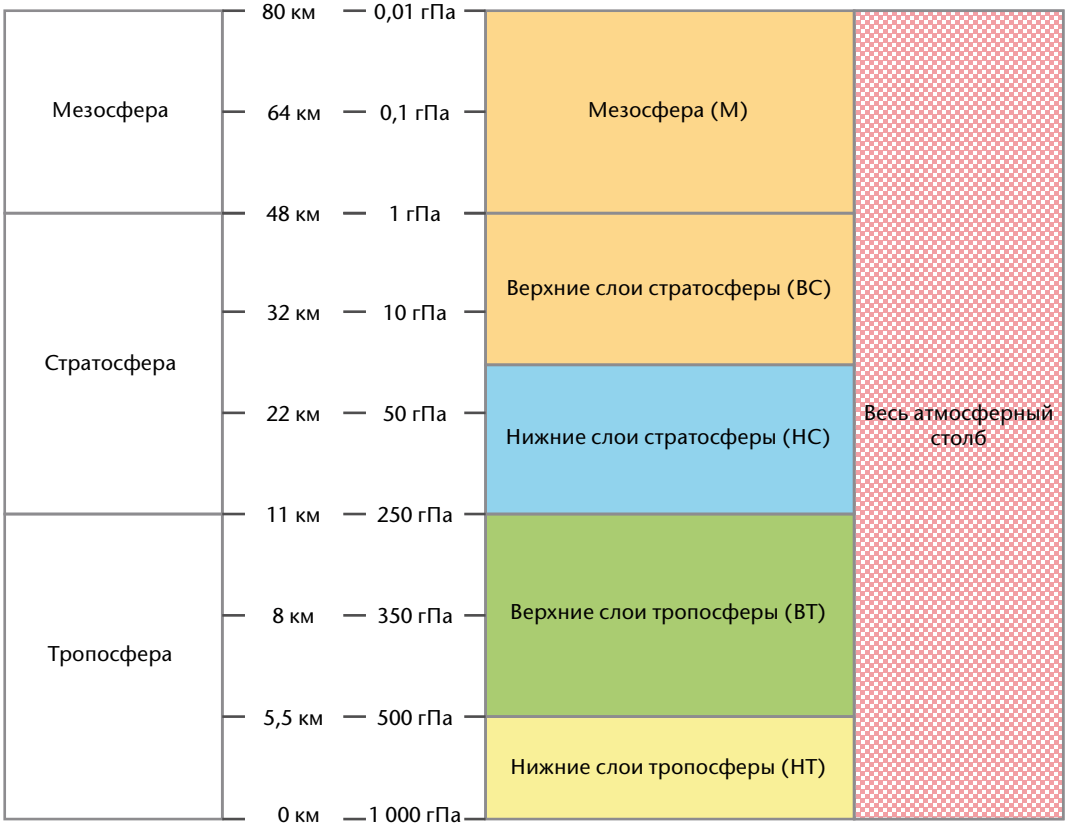
Требования пользователей могут различаться, в зависимости от наблюдаемого слоя атмосферы. На рисунке ниже представлены определения атмосферных объемов, используемых в базе данных ВМО по требованиям к наблюдениям.

В то время как требования пользователей могут меняться скачкообразно, по мере продвижения вдоль вертикали, качество спутниковой продукции меняется с высотой постепенно, в зависимости, главным образом, от вертикального градиента количества, с более точными характеристиками при достижении более высоких градиентов. Шаг изменения происходит тогда, когда невозможно достичь требуемого вертикального разрешения с помощью надирных сканирующих приборов, и становится необходимым использовать лимбовое сканирование. Ради упрощения часто рассматриваются различные характеристики продукции для тропосферы, стратосферы и всего атмосферного столба (в соответствующих случаях). Нередко происходит так, что качество будет постепенно снижаться с увеличением высоты в тропосфере, и то же самое будет происходить в стратосфере. Качество продукции приводится только для высоты свыше 1 км; ниже 1 км точность слишком изменчива и ее трудно оценить.

5.1.2.2 *Горизонтальная разрешающая способность*

Горизонтальная разрешающая способность (Δx) является сверткой обобщенных функций нескольких характеристик (разрешающая способность замера; степень независимости информации, относящейся к ближайшим замерам; аппаратная функция оптического прибора и др.). Для упрощения обычно принимается разрешающая способность замера, соответствующая значению, расположенному между двумя последовательно полученными значениями продукции, несущими в себе независимую информацию.

Горизонтальная разрешающая способность измеряемой геофизической переменной обусловлена характеристиками прибора (в первую очередь IFOV), разрешающей способностью замера или пикселем, и функцией передачи модуляции) и схемой обработки, которая может быть подобрана таким образом, чтобы учитывать эффект интерференции (такого как влияние облачности в IFOV). К примеру, если облачность не дает провести достоверное измерение, может быть, целесообразно обработать множество пикселей с целью экстраполяции менее искаженных измерений в ячейке размером Δx. Число пикселей, которые подлежат одновременной обработке, зависит от спектрального диапазона, используемого для проведения измерения (вплоть до единицы для всепогодных микроволновых радиоизлучений, к примеру),



Атмосферные объемы в соответствии с определениями пользователей. Верхние слои стратосферы и мезосфера (ВС и М) объединены. Высоты и давление выражены в качественной форме и относятся к средним широтам/среднегодовое значение. Планетарный пограничный слой является частью нижних слоев тропосферы.

и от имеющейся спектральной информации (когда имеется больше спектральных каналов, необходимо брать меньшее скопление пикселей). Экстремальным является случай, когда требуется большое количество пикселей (32 x 32, к примеру) для описания геофизической переменной (примером является возмущающее воздействие векторов циркуляции атмосферы от замещения пикселей высоко коррелированных облачных массивов на двух изображениях, полученных в разное время).

Для таких параметров, как «облачный покров» или «снежный покров», необходимо достичь достаточного числа замеров (пикселей) в ячейке размером $\Delta x \cdot \Delta x$ с целью получения нужной точности. Для приземных измерений медленно изменяющихся переменных (таких как снег) при наличии облачности может понадобиться применить динамический анализ, что предполагает исчезновение облачности из сектора обзора (это уже будет продукция уровня 3). Обычно в процессе производства продукции можно выбрать, с определенными ограничениями, оптимальное соотношение горизонтального разрешения и точности. Часто горизонтальная разрешающая способность продукции выше одного пикселя для того, чтобы улучшить ОСШ и удовлетворить требования к точности продукции.

Для надирных сканирующих приборов IFOV прибора или размер пикселя получаются больше подспутниковой точки в направлении к краям полосы захвата; характеристика горизонтального разрешения продукции должна быть поэтому усреднена по всей ширине полосы захвата прибора.

Для конических сканеров разрешающая способность в направлении луча сканирования остается неизменной, но разрешающая способность поперечного сканирования ухудшается на величину функции косинуса азимутального угла (IFOV имеет форму, близкую к эллипсу). Обязательно необходимо принимать во внимание среднее

квадратическое отклонение для поперечного и продольного направлений сканирования, и принимать в расчет вытянутость IFOV вдоль направления сканирования, обусловленную перемещением линии сканирования в течение времени интегрирования результатов измерения. Если используется одна антенна для нескольких частот, из-за дифракции разрешающая способность будет меняться в зависимости от частоты.

Для лимбового зондирования горизонтальная разрешающая способность определяется геометрией сектора обзора. Траектория сканирования в атмосфере может физически простираться на несколько тысяч километров, но эффективная траектория (которая учитывает более высокую атмосферную плотность вокруг высоты по касательной) составляет около 300 км в направлении сканирования. Поперек сектора обзора, несмотря на то, что IFOV может быть значительно более узким (десятки километров), разрешающая способность продукции определяется числом азимутальных обзоров (в большинстве случаев только один, в направлении вперед или назад). Ради упрощения мы принимаем 300 км в качестве обычной разрешающей способности по горизонтали для лимбовых измерений.

5.1.2.3 ***Вертикальная разрешающая способность***

Вертикальная разрешающая способность (Δz) также определяется путем выбора разрешающей способности замера, соответствующей значению, расположенному между двумя последовательно полученными значениями продукции, несущими в себе независимую информацию.

Вертикальная разрешающая способность продукции зависит от принципа работы измерительного датчика, спектрального диапазона прибора и числа каналов или спектральной разрешающей способности. Весовая функция может быть более или менее расширенной по вертикали в зависимости от спектральной разрешающей способности и диапазона (хуже в МКВ) и лучше в оптическом диапазонах). Кроме того, спектральные каналы могут быть достаточно узкими для различения отдельных линий поглощения/эмиссии газа, или нескольких линий или полос линий. Если несколько линий входят в канал, весовая функция будет расширена, поскольку она будет усреднять поверхностную эмиссию между линиями (образуя максимумы в нижних слоях атмосферы) и атмосферную эмиссию в линиях (образуя максимумы на больших высотах). В целом, разрешающая способность $\lambda/\Delta\lambda \approx 100$ позволяет извлекать вертикальные профили температуры с вертикальным разрешением около 2 км; $\lambda/\Delta\lambda \approx 1\,000$ позволяет получить более высокую разрешающую способность около 1 км по вертикали для профиля температуры, наряду с получением данных о малых газовых составляющих атмосферы по всему атмосферному столбу в целом; $\lambda/\Delta\lambda \approx 10\,000$ требуется для построения профиля распределения малых газовых составляющих атмосферы. Плотность газа оказывает влияние на достижимую вертикальную разрешающую способность, поскольку с возрастанием высоты вертикальная разрешающая способность измерения ухудшается.

Следует отметить, что весовая функция смещается к большим высотам по мере того, как угол обзора прибора смещается от надира к краю полосы обзора. Это происходит из-за более протяженного сканирующего луча, проходящего сквозь атмосферу с увеличивающимся углом обзора. Коэффициент пропускания есть экспоненциальная функция (степенная зависимость) числа поглощающих молекул на пути испускаемого излучения; более острый угол обзора влечет за собой большую вероятность столкновения на пути с большим числом молекул в верхних слоях атмосферы и, таким образом, весовая функция движется вверх с высотой.

Вертикальная разрешающая способность зависит от чувствительности длины волны к температуре. Чувствительность инфракрасных (ИК) волн к температуре выше в СДИК (примерно 3–6 мкм), поэтому весовые функции более узкие в нижних слоях тропосферы и очень широкие в верхних слоях тропосферы и стратосфере. Короткие волны менее чувствительны к температуре, поэтому вертикальная разрешающая способность остается

относительно однородной с увеличением высоты. В соответствии со спектральной формулой Планка МКВ относительно более чувствительны к низким температурам и вертикальная разрешающая способность относительно хорошая в стратосфере.

В стратосфере и выше вертикальная разрешающая способность, достигаемая при надирном сканировании неудовлетворительная. Лимбовое сканирование предлагает более высокую вертикальную разрешающую способность; она определяется механическим сканированием вдоль вертикали (угловой IFOV в сочетании со скоростью сканирования) и находится в диапазоне от 1 до 3 км (что недостижимо при надирном сканировании). Вертикальная разрешающая способность, достигаемая при лимбовом зондировании, ухудшается с высотой, поскольку отношение ОСШ ухудшается по мере уменьшения концентрации газа. Приборы для затменных наблюдений (включая радиозатменные) имеют вертикальную разрешающую способность, определяемую скоростью проведения замеров в течение фазы затмения. Во время обработки данных на земле алгоритм расчета выполняет вычисление интеграла для того, чтобы найти компромиссное решение в отношении точности продукции.

5.1.2.4 ***Цикл наблюдений***

Цикл наблюдений (Δt) определяется как время, необходимое для достижения глобального охвата (для НОС) или полного охвата диска (для ГСО). Он тесно связан с потенциальными сканирующими возможностями прибора и особенностями орбиты. Связь между циклом наблюдений и механизмом сканирования подробно рассмотрена в глава 3, 3.1.1, настоящего тома. Однако цикл наблюдений прибора может не совпадать с циклом наблюдений для продукции, поскольку не все измерения, совершенные во время цикла наблюдений прибора, могут быть использованы для подготовки нужной продукции. Например, отображенная продукция для ясного неба может демонстрировать слишком много пробелов из-за измерений, подверженных воздействию облачности. Таким образом, эффективный цикл наблюдений для продукции является компромиссом между минимальным теоретически возможным циклом наблюдений, который может иметь много пробелов, и динамическим анализом, ухудшающим цикл наблюдений для продукции, но продуцирующим более правильное поле продукции (образованное процессом уровня 3). Компромиссное решение учитывает чувствительность спектрального диапазона к дестабилизирующему фактору и характерную временную изменчивость измеряемого геофизического параметра (которая может не позволять задержки, обусловленные динамическим анализом). В другом примере динамический анализ может быть необходим для улавливания достаточного сигнала, когда возникает проблема с достижением требуемой точности продукции.

Для большинства метеорологических переменных требуемый цикл наблюдений не допускает динамического анализа. Решение находится на системном уровне, за счет достижения определенного числа спутников, осуществляющих измерения геофизических переменных. Глобальный цикл наблюдений короче, чем 12 ч (для измерений в ИК и МКВ диапазонах) или 24 ч (для измерений с использованием КВ), требует большего числа спутников, расположенных на орбите на равном расстоянии друг от друга. Для 3-х часового цикла необходимо иметь четыре спутника при условии, что полоса захвата прибора такая обширная как максимальная разность углов обзора (например, изображения в ВИД/ИК частях спектра). Для приборов с ограниченной полосой захвата (таких как МКВ-радиометры на космических аппаратах Программы глобальных измерений осадков) 3-х часовой цикл требует использования восьми спутников.

Цикл наблюдений может быть сокращен за счет глобального охвата с использованием орбиты с малым углом наклонения. Пределом является $\Delta t <$ одного орбитального периода для движения по квази-экваториальной орбите с востока на запад. Широты, расположенные за пределами полосы захвата прибора, не будут охвачены наблюдениями.

Для спутников на ГСО цикл наблюдений зависит от цикла обновления прибора. Это могут быть минуты, если измерения не подвержены воздействию облачности, в противном случае может потребоваться динамический анализ. Группировка из шести спутников,

расположенных на геостационарной орбите на равном удалении друг от друга, обеспечивает покрытие всех широт ниже 55°, возрастая до 70° и выше на долготах, близких к местоположению шести спутников на ГСО.

Приборы только с надирным обзором (не сканирующие) обеспечивают нечастый глобальный охват. Приборы с лимбовым сканированием, включая радиозатменные, имеют тот же недостаток (см. 3.1.1, глава 3 настоящего тома). Для таких приборов трудно определить цикл наблюдений.

5.1.2.5 ***Точность (неопределенность)***

Точность определяется как «близость к соответствию между измеренным количественным значением и фактическим количественным значением измеряемой величины» (*Международный словарь метрологии — Базовые и общие концепции и соответствующие понятия (МСМТ)*, Объединенный комитет по руководствам в метрологии (ОКРМ) 200: 2012). По сути, точность представляет собой качественное понятие, тогда как количественное выражение, соответствующее точности, является неопределенностью (см. том I, глава 1, 1.6.2). Это общий результат нескольких характеристик прибора: случайной ошибки, систематической погрешности, чувствительности, повторяемости и т. п. В настоящем томе (наблюдения из космоса) неопределенность в целом характеризуется диапазоном среднеквадратической ошибки (СКО), а именно разницы СКО (измеренное — фактическое значения) измерения. Неопределенность полученного со спутника результата измерения геофизической переменной обусловлена физическим принципом, связывающим спутниковое измерение с наблюдаемой переменной, и особенно чувствительностью измерения к изменчивости этой переменной. При проведении космических наблюдений точность обычно выражается количественно как среднеквадратическое отклонение, но не учитывает конкретное статистическое распределение различий относительно истинных значений, прослеживаемых до Международной системы единиц (СИ). Особое внимание следует уделить методам, используемым для определения любого значения неопределенности, всем задействованным составляющим общей оценки погрешности измерения, выбранному доверительному интервалу (обычно 68 % вместо необходимых 95 %; см. п. 1.6.2, глава 1, том I) и способам обеспечения прослеживаемости до СИ.

Всегда присутствует компромисс между пространственным, радиометрическим и спектральным разрешением. Высокое пространственное разрешение означает низкий IFOV и низкое радиометрическое разрешение. Для получения относительно высокого пространственного разрешения и высокого радиометрического разрешения необходимо снизить спектральное разрешение. Таким образом, радиометрическая разрешающая способность является основным фактором неопределенности, поскольку от нее зависит сила как сигнала, так и шума наблюдения. Эти величины определяют эквивалент шума, соответствующий разности температуры или отношение сигнал-шум либо спектральную плотность энергетической яркости, эквивалентную шуму, с учетом определения, приведенного в п. 3.1.4, глава 3 настоящего тома. Однако неопределенность продукции также подвержена сильному воздействию со стороны алгоритма вычисления и компромисса в отношении других характеристик качества (Δx, Δz и Δt). Более того, характер исследуемой цели (интенсивность излученного или рассеянного сигнала), чувствительность метода зондирования к геофизической переменной и эффективность отфильтровывания дестабилизирующих факторов (таких как облака) имеют ярко выраженное воздействие на итоговую неопределенность продукции.

Для нового прибора необходимо проводить исследования чувствительности на основе сложного численного моделирования для получения оценки неопределенности.

В этом настоящем томе неопределенность продукции оценивается на основе имеющихся данных о прошлых и современных приборах, а также численного моделирования запланированных к использованию приборов. Проверка точности продукции, полученной

с помощью спутников (рассматривается в главе 6 настоящего тома), является составной частью оценки неопределенности для прошлых и современных приборов; для будущих приборов проводятся теоретические расчеты.

5.1.2.6 ***Своевременность***

Своевременность (δ_t) определяется как время, прошедшее от момента осуществления измерения до получения продукции, при условии штатного режима деятельности. Своевременность зависит от средств спутниковой связи, наличия станций усвоения данных, времени обработки данных, необходимого для подготовки продукции, и общей системы управления данными.

В настоящем Руководстве не проводится оценка своевременности δ_t различной продукции, потому что это системная характеристика, которая не определяется только конкретным прибором.

5.1.3 **Оценка качества спутниковой продукции**

В настоящей главе представлен обзор спутниковой продукции, которая потенциально может быть извлечена в результате применения имеющихся или планируемых к использованию приборов для измерения геофизических переменных в следующих восьми тематических разделах:

a) основные атмосферные (3D и 2D измерения)

b) облака и атмосферные осадки

c) аэрозоли и радиация

d) океан и морской лед

e) поверхность суши (включая снег)

f) твердая оболочка Земли

g) химический состав атмосферы

h) космическая погода

Этот перечень продукции, полученной в результате наблюдений, ограничен «первичными» геофизическими переменными, и не включает в себя продукцию, которая может быть извлечена из другой продукции.

Для каждого вида спутниковой продукции указываются применяемые методы дистанционного зондирования наряду с условиями наблюдений или ограничениями. В приложении к настоящей главе приводится оценка достижимого качества продукции в отношении среднеквадратической ошибки[1] (СКО), Δx, Δz и Δt, основанная на характеристиках самых современных приборов, разрабатываемых на момент написания данного Руководства, и которые, как ожидается, начнут оперативно использоваться к 2020 г.

---

[1] Необходимо отметить, что среднеквадратическая ошибка (СКО), используемая в этом томе Руководства, соответствует приблизительно расширенной неопределенности с коэффициентом покрытия $k = 1$, в то время как в остальных разделах настоящего Руководства обычно применяется коэффициент покрытия $k = 2$ (см. том I, глава 1, 1.6.3.3 и *Оценка данных измерений — Руководство для представления погрешности измерений* (ОКРМ 100:2008)). Использование k = 2 объясняется в томе I, глава 1, п. 1.6.2. Оно соответствует международным стандартам, утвержденным Международным комитетом мер и весов (МКМВ), см. *Наставление по Интегрированной глобальной системе наблюдений ВМО* (ВМО-№ 1160), п. 2.3.1.3.

5.2 ОСНОВНЫЕ АТМОСФЕРНЫЕ ПЕРЕМЕННЫЕ, НАБЛЮДАЕМЫЕ В ДВУХ- И ТРЕХМЕРНОМ ИЗМЕРЕНИЯХ (2D И 3D)

В таблице 5.1 перечислены основные атмосферные переменные для использования при подготовке прогноза погоды, включая ЧПП, которые могут наблюдаться из космоса.

Другие основные переменные, такие как атмосферное давление, температура и влажность на поверхности; а также вертикальный компонент ветра не включены в таблицу, потому что они не могут быть надежно измерены из космоса с помощью современных технологий.

Таблица 5.1. Геофизические переменные, рассматриваемые в тематическом разделе «Основные атмосферные (3D и 2D) переменные»

Температура атмосферного воздуха	Ветер и профиль ветра (горизонтальные компоненты вектора ветра)	Высота верхней границы планетарного пограничного слоя	Высота тропопаузы
Удельная влажность воздуха	Ветер как вектор над поверхностью (горизонтальный)	Температура тропопаузы	

5.2.1 Температура атмосферного воздуха

Определение: трехмерное поле температуры воздуха в атмосфере — требуется измерение от поверхности до верхней границы атмосферы (ВГА) (слои атмосферы: НТ, ВТ, НС, ВС и М) — физическая единица измерения: кельвин (К) — единица неопределенности: К.

Метод 1: ИК-спектрометрия — принцип: измерение ИК-излучения от различных слоев атмосферы, определяемого с помощью использования спектральных интервалов различной внутриполосной интенсивности поглощения CO_2 (~4,3 мкм и ~15 мкм). Применяется как на НОС, так и на ГСО.

Метод 2: МКВ/субмиллиметровая радиометрия — принцип: измерение МКВ и субмиллиметрового излучения волн от различных слоев атмосферы, определяемого с помощью использования спектральных интервалов различной внутриполосной интенсивности поглощения O_2 (~54, 118 и потенциально 425 ГГц). Применяется как на НОО, так и потенциально на ГСО.

Метод 3: ГНСС (состоящая из ГСОМ и Российской навигационной спутниковой системы ГЛОНАСС — принцип: измерение рефракции в атмосфере сигналов частот L-диапазона от Глобальной навигационной спутниковой системы, принимаемых спутниками на НОО во время фазы затмения. Применяется только на НОС.

Метод 4: лимбовое зондирование — принцип: измерение излучения линиями поглощения (в ИК- и МКВ-диапазонах) или увеличения линий (в КВ) согласно наблюдениям с помощью спектрометров с высокой разрешающей способностью, предназначенных для изучения химического состава атмосферы при наблюдении края диска Земли. Применяется только на НОС.

5.2.2 Удельная влажность воздуха

Определение: трехмерное поле удельной влажности воздуха (т.е. отношение массы водяного пара к массе влажного воздуха) в атмосфере — требуется измерение от поверхности до ВГА (слои атмосферы: НТ, ВТ, НС, ВС и М) + весь атмосферный столб — физическая единица измерения: г/кг для слоев, кг/м^2 для всего столба — единица неопределенности: % для слоев, кг/м^2 для всего столба.

Метод 1: ИК спектроскопия — принцип: измерение ИК-излучения от различных слоев атмосферы, определяемого с помощью использования спектральных интервалов различной внутриполосной интенсивности поглощения H_2O (~6 мкм и потенциально ~18 мкм) с поддержкой измерений CO_2. Применяется как на НОС, так и на ГСО.

Метод 2: МКВ/субмиллиметровая радиометрия — принцип: измерение МКВ и субмиллиметрового излучения волн от различных слоев атмосферы, определяемого с помощью использования спектральных интервалов различной внутриполосной интенсивности поглощения H_2O (183 и потенциально 324, 380 ГГц и другие на более высоких частотах) с необходимой поддержкой O_2 (~54, 118 и потенциально 425 ГГц). Применяется на НОС и потенциально на ГСО.

Метод 3: радиозатменные измерения с помощью ГНСС — принцип: измерение рефракции в атмосфере сигналов частот L-диапазона от ГНСС, принимаемых спутниками на НОО во время фазы затмения. Применяется только на НОС.

Метод 4: ЛДП — принцип: измерение рассеянного обратного излучения в БИК диапазоне поглощения водяного пара (к примеру ~935 нм) и боковом окне с помощью ЛДП. Применяется только на НОС.

Метод 5: лимбовое зондирование — принцип: излучение (в ИК или МКВ/субмиллиметровом диапазонах), поглощение (КВ-диапазон при солнечном или звездном затмении) или рассеяние (в КВ-диапазоне) линиями поглощения, наблюдаемое с помощью спектрометров с высокой разрешающей способностью, предназначенных для изучения химического состава атмосферы при наблюдении края диска Земли. Применяется только на НОС.

Метод 6: ИК разделенное окно — принцип: получение побочного продукта извлечения температур на поверхности из ИК-изображений (разделенные окна, такие как 11 и 12 мкм). Применяется только для всего атмосферного столба. Применяется как на НОС, так и на ГСО.

Метод 7: формирование МКВ-изображений (23 ГГц) — принцип: измерение МКВ-излучения в диапазоне слабого излучения H_2O (~23 ГГц), связанном с близлежащим окном (19 или 37 ГГц). Метод пригодный только для всего атмосферного столба над морем. Применяется как на НОС, так и потенциально на ГСО.

Метод 8: формирование БИК-изображений (935 нм) — принцип: измерение дифференциальной отражательной способности между БИК полосой поглощения водяного пара (к примеру ~935 нм) и боковым окном узкополосными радиометрами. Пригодный только для всего атмосферного столба. Применяется как на НОС, так и на ГСО.

5.2.3 Профиль ветра (горизонтальные компоненты вектора ветра — U и V)

Определение: глобальные профили ветра горизонтальных векторных компонент (2D) вектора ветра в 3D — требуется измерение от поверхности до ВГА (слои атмосферы: НТ, ВТ, НС, ВС и М) — физическая единица измерения: м/с — единица неопределенности: м/с.

Метод 1: доплеровский лидар — принцип: прямые измерения горизонтальных профилей ветра с помощью лазерных импульсов, отражаемых молекулами воздуха, а также аэрозольных и облачных частиц, отслеживаемых с помощью доплеровского эффекта рассеянного света вдоль линии прямой видимости лазерного луча. Применяется только на НОС.

Метод 2: ВИД/ИК последовательности изображений — принцип: векторы атмосферного движения (ВАД) извлекаются из ИК/ВИД спутниковых изображений посредством отслеживания особенностей облачности и распределения водяного пара в идущих друг за другом последовательностях изображений. Применяется как на НОС, так и на ГСО.

Метод 3: ИК зонд — принцип: трехмерные профили ветра извлекаются из движения, обнаруженного в полях влажности и озона, получаемых с помощью приборов ИК зонда. Применяется как на НОС, так и на ГСО.

Метод 4: ВИД/ИК изображения с изменяющейся геометрией — принцип: для определения высоты атмосферных особенностей с помощью нескольких изображений используется параллакс. Дополнительно учитывается небольшая разница во времени, чтобы сделать вывод о смещении. Особенности могут быть обусловлены облаками и аэрозолями, распознаваемыми и отслеживаемыми на последовательно полученных изображениях в ВИД/ИК-диапазонах. Применяется как на НОС, так и на ГСО.

Метод 5: лимбовое зондирование — принцип: измерение доплеровского смещения и увеличения спектральных линий поглощения O_2, O_3, OH^-, наблюдаемых с помощью ВИД спектрометров с высокой разрешающей способностью при наблюдении края диска Земли в ВС и М. Применяется только на НОС.

5.2.4 Ветер как вектор над поверхностью (горизонтальный)

Определение: горизонтальные векторные компоненты (2D) трехмерного вектора ветра, обычно измеряемые на высоте 10 м — требуется измерение над поверхностью моря или суши (все указанные ниже методы применяются над морем). Физическая единица измерения: м/с — единица неопределенности: м/с.

Метод 1: радиолокационная скаттерометрия — принцип: измерение радиации обратного рассеяния от капиллярных волн среднечастотным радиолокатором (примерно от 1 до 15 ГГц). Используются более широкие углы обзора для определения направления. Применяется только над морем. Применяется только на НОС.

Метод 2: поляриметрическая МКВ радиометрия — принцип: измерение излученной и рассеянной МКВ-радиации в атмосферных окнах на нескольких частотах (например 10, 19, 37 ГГц). Три параметра Стокса должны измеряться (например, минимум четыре поляризации), по возможности четыре повышения (требующих шесть поляризаций). Применяется только над морем. Направление ветра только выше 8 м/с. Применяется только на НОС.

Метод 3: формирование МКВ-изображений — принцип: измерение излученной и рассеянной МКВ-радиации в атмосферных окнах на нескольких частотах (таких как 1,4, 10, 19, 37 ГГц). Необходимо, по крайней мере, две поляризации. Применяется только над морем. Измеряется только скорость. Применяется только на НОС.

Метод 4: радиолокационная альтиметрия — принцип: измерение обратной рассеянной радиации от поверхности моря с помощью среднечастотного радиолокатора (~13 ГГц). Скорость ветра связана с отраженными волнами, рассеянными от капиллярных волн. Применяется только над морем. Измеряется только скорость. Только в надире. Применяется только на НОС.

Метод 5: ГНСС-Р — принцип: отраженные сигналы возможности от спутников ГНСС, которые далее рассеиваются от поверхности моря, выражают местную скорость ветра в зеркальной точке. Применяется только над морем. Измеряется только скорость. Применяется только на НОС.

5.2.5 Высота верхней границы планетарного пограничного слоя

Определение: высота поверхности, разделяющей планетарный пограничный слой от свободной атмосферы — физическая единица измерения: км — единица неопределенности: км.

Метод 1: лидар обратного рассеяния — принцип: измерение радиации обратного рассеяния в УФ или ВИД-или БИК-диапазонах спектра с помощью лидара. Применяется только на НОС.

Метод 2: от ИК зондирования — принцип: производная от ИК зондирования температуры и влажности. Применяется как на НОС, так и на ГСО.

Метод 3: от зондирования ГНСС — принцип: производная от ГНСС радиозатменого зондирования температуры и влажности. Применяется только на НОС.

5.2.6 Высота тропопаузы

Определение: высота поверхности, разделяющей тропосферу от стратосферы — физическая единица измерения: км — единица неопределенности: км.

Метод 1: лидар обратного рассеяния — принцип: измерение радиации обратного рассеяния в ультрафиолетовом (УФ) или ВИД- или БИК-диапазонах с помощью лидара. Предпочтительно измерения проводить на двух длинах волн. Применяется только на НОС.

Метод 2: от ИК зондирования — принцип: производная от ИК зондирования температуры и влажности. Применяется как на НОС, так и на ГСО.

Метод 3: от зондирования ГНСС — принцип: производная от ГНСС радиозатменного зондирования температуры. Применяется только на НОС.

5.2.7 Температура тропопаузы

Определение: температура воздуха в атмосфере на высоте поверхности, разделяющей тропосферу от стратосферы — физическая единица измерения: К — единица неопределенности: К.

Метод 1: от ИК зондирования — принцип: производная от ИК зондирования температуры. Применяется как на НОС, так и на ГСО.

Метод 2: от зондирования ГНСС — принцип: производная от ГНСС радиозатменного зондирования температуры. Применяется только на НОС.

Метод 3: от лимбового зондирования — принцип: производная от лимбового зондирования температуры. Применяется только на НОС.

5.3 ПЕРЕМЕННЫЕ ОБЛАКОВ И АТМОСФЕРНЫХ ОСАДКОВ

Этот тематический раздел включает в себя переменные, наблюдаемые из космоса для целей текущего анализа метеорологических условий, краткосрочного предсказания погоды и прогнозирования текущей погоды, а также для целей гидрологии. В таблице 5.2 перечислены эти переменные.

Таблица 5.2. Геофизические переменные, рассматриваемые в тематическом разделе «Переменные облаков и атмосферных осадков»

Температура вершины облака	Высота нижней границы облака	Лед в облаке	Атмосферные осадки (в жидкой или твердой фазе)
Высота вершины облака Вертикальная протяженность облака	Оптическая глубина облака	Эффективный радиус льда в облаке	Интенсивность осадков на поверхности (в жидкой или твердой фазе)
Вид облака	Вода в жидкой фазе в облаке	Высота нулевой изотермы в облаке	Суммарные осадки (за 24 часа или с другой периодичностью менее суток)
Облачный покров	Эффективный радиус капель воды в облаке	Толщина слоя таяния льда в облачности	Обнаружение молний

5.3.1 Температура вершины облака

Определение: температура верхней поверхности облака — физическая единица измерения: K — единица неопределенности: K.

Метод 1: ИК радиометрия — принцип: производная от формирования ИК-изображения на ряде каналов, включая «окна» и другие каналы (на полосах поглощения водяного пара), необходима для оценки излучающей способности облака. Применяется как на НОС, так и на ГСО.

Метод 2: от ИК зондирования — принцип: производная от измерений спектрального ИК излучения. Измерение излучений (радиояркостных температур) на различных длинах волн позволяет извлечь температуру верхнего слоя облачности в пределах наблюдаемого IFOV. Применяется как на НОС, так и на ГСО.

5.3.2 Высота вершины облака

Определение: высота верхней поверхности облака — физическая единица измерения: км — единица неопределенности: км.

Метод 1: ИК радиометрия — принцип: производная от спектральных излучений (обычно от изображений, использующих спектральные каналы на 11 и 13,4 или 6,7 мкм). Методы называются слоированием в канале CO_2 или методом перехвата водяного пара. Значение давления на уровне вершины облака или его высота выводятся с помощью профиля прогнозируемой температуры. Применяется как на НОС, так и на ГСО.

Метод 2: от ИК зондирования — принцип: величина, полученная как побочный продукт от зондирования температуры/влажности, извлекаемый из ИК спектроскопии. Различный перенос энергии излучением на различных длинах волн позволяет извлечь высоту вершины облака в пределах IFOV зондирования. Применяется как на НОС, так и на ГСО.

Метод 3: лидар обратного рассеяния — принцип: измерение радиации обратного рассеяния в УФ- или ВИД- или БИК-диапазонах с помощью лидара. Предпочтительно измерения проводить на двух длинах волн. Применяется только на НОС.

Метод 4: радиолокатор для изучения облачности — принцип: измерение радиации обратного рассеяния в МКВ диапазоне (~94 ГГц) с помощью радиолокатора. Применяется только на НОС.

Метод 5: спектроскопия диапазона A — принцип: измерение колоннообразного O_2 (протяженность поглощения) над вершиной облака с помощью спектроскопии диапазона A на волне 760 нм и вблизи «окна». Применяется как на НОС, так и на ГСО.

Метод 6: стерео — принцип: изображения облаков, сделанные практически одновременно с нескольких углов, позволяют оценить высоту облаков над поверхностью за счет использования параллакса. В принципе метод применим к любому спектральному наблюдению и любому сочетанию НОС и ГСО.

5.3.3 Вертикальная протяженность облака

Определение: вертикальная протяженность, выраженная как температура, высота или давление верхней поверхности облака — физическая единица измерения: км, К или или гПа — единица неопределенности: км, К или гПа. Примечание: следует учитывать, что геометрическая толщина облака, вычисленная по данным пассивного дистанционного зондирования со спутников, не очень точна.

Метод 1: ИК радиометрия — принцип: производная от формирования ИК-изображения на ряде каналов, включая «окна» и другие каналы (на полосах поглощения водяного пара), необходима для оценки излучающей способности облака. Измеряемым свойством может быть температура, высота или давление. Применяется как на НОС, так и на ГСО.

Метод 2: ИК-радиометрия — принцип: производная от многочисленных наблюдений в ИК диапазоне в полосах поглощения CO_2 или H_2O. Обычно называется методом слоирования или перехвата. Измеряемым свойством может быть температура, высота или давление. Применяется как на НОС, так и на ГСО.

Метод 3: от ИК зондирования — принцип: величина, рассчитанная как побочный продукт от зондирования температуры/влажности, извлекаемый из ИК спектроскопии. Различный перенос энергии излучением на различных длинах волн позволяет извлечь высоту вершины облака в пределах IFOV зондирования. Применяется как на НОС, так и на ГСО.

Метод 4: лидар обратного рассеяния — принцип: измерение радиации обратного рассеяния в УФ-, ВИД- или БИК-диапазонах с помощью лидара. Предпочтительно проводить измерения на двух длинах волн. Применяется только на НОС.

Метод 5: радиолокатор для изучения облачности — принцип: измерение радиации обратного рассеяния в МКВ диапазоне (~94 ГГц) с помощью радиолокатора. Применяется только на НОС.

Метод 6: спектроскопия диапазона A — принцип: измерение колоннообразного недостатка O_2 над вершиной облака с помощью спектроскопии диапазона A на волне 760 нм и вблизи «окна». Применяется как на НОС, так и на ГСО.

Метод 7: Стерео — принцип: изображения облаков, сделанные под несколькими углами практически одновременно, позволяют оценить высоту облаков над поверхностью за счет использования параллакса. Применим к любому спектральному наблюдению и любому сочетанию НОС и ГСО.

5.3.4 Вид облаков

Определение: комплексные характеристики наблюдаемого облака. Перечень интересуемых видов определяется заранее — неопределенность выражается как число дискриминантных видов (классов).

Метод 1: радиометрия ВИД/ИК-диапазонов — принцип: проведение мультиспектрального анализа отражающей способности облака, температуры поверхности его вершины, оптической глубины, излучающей способности, яркостных температур облака и их

пространственно-временных характеристик позволяет классифицировать облака по видам в зависимости от их фазы, размера капель, на различном фоне, измеренных на нескольких дискретных каналах в относительно широком частотном диапазоне (5—10 $см^{-1}$). Позволяет получить информацию о распределении льда/воды, непрозрачности и вертикальной структуре (однослойная/многослойная). Применяется как на НОС, так и на ГСО.

Метод 2: производные свойства облаков по данным ВИД/ИК радиометрии — принцип: анализ непрозрачности, микрофизики, вертикальной протяженности и пространственной текстуры облака позволяет оценивать традиционные метеорологические виды облаков, такие как слоистые, кучевые и перистые. Применяется как на НОС, так и на ГСО.

5.3.5 Облачный покров

Определение: трехмерное поле части неба, в которой определяется облачность. Требуется построение трехмерного поля в тропосфере (ограничение по высоте: 12 км) и также единого слоя (весь атмосферный столб) для обеспечения определения общего облачного покрова — физическая единица измерения: % — единица неопределенности: %.

Метод 1: радиометрия ВИД/ИК-диапазонов — принцип: производная от изображений облачности, полученных с использованием нескольких дискретных каналов, подобранных специально для определения всех видов облаков. Доля облачного покрова соответствует числу пикселей облачности в заданном множестве пикселей. Применяется как на НОС, так и на ГСО.

Метод 2: от ИК зондирования — принцип: величина, полученная как побочный продукт от зондирования температуры/влажности, извлекаемый из ИК спектроскопии. Различный перенос энергии излучением на различных длинах волн позволяет извлечь долю облачности, умноженную на излучательную способность облака, в пределах IFOV зондирования. Применяется как на НОС, так и на ГСО.

Метод 3: радиолокатор обнаружения облачности — принцип: измерение радиации обратного рассеяния от капель в облаке в МКВ диапазоне (~94 ГГц) с помощью высокочастотного радиолокатора. Применяется только на НОС.

5.3.6 Высота нижней границы облаков

Определение: высота нижней поверхности облака — физическая единица измерения: км — единица неопределенности: км.

Метод 1: радиолокатор обнаружения облачности — принцип: производная величина, определяемая как значение нижнего уровня радиации обратного рассеяния от капель в облаке, измеренная с помощью высокочастотного радиолокатора (~94 ГГц). Применяется только на НОС.

5.3.7 Оптическая глубина облака

Определение: эффективная глубина облака (англ. OD = depth of the cloud) с точки зрения проникновения излучения. Определяется как $OD = e^{-K\Delta z}$, где K — коэффициент затухания ($км^{-1}$), Δz — путь оптического луча (км) между основанием и вершиной облака. Она зависит от длины волны, но обычно соотносится с излучением в видимой части спектра. Физическая единица измерения: безразмерная — единица неопределенности: безразмерная.

Метод 1: лидар обратного рассеяния — принцип: измерение радиации обратного рассеяния в УФ-, ВИД- или БИК-диапазонах с помощью лидара. Предпочтительно измерения проводить на двух длинах волн. Применяется только на НОС.

Метод 2: КВ поляриметрия — принцип: измерение рассеянной солнечной радиации на нескольких узкополосных каналах в УФ-, ВИД-, БИК-диапазонах и КВИК диапазоне, некоторые с поляриметрическими измерениями для определения трех параметров Стокса. Применяется только на НОС.

Метод 3: коротковолновая/тепловая инфракрасная (КВ/ТИК) радиометрия — принцип: измерение рассеянной солнечной радиации на нескольких узкополосных каналах в УФ-, ВИД-, БИК- и КВИК-диапазонах, и испускаемого излучения на нескольких каналах ТИК-диапазона в окнах. Применяется как на НОС, так и на ГСО.

5.3.8 Вода в жидкой фазе в облаке

Определение: трехмерное поле содержания воды в атмосфере в жидкой фазе (выпадающей в виде осадков или не выпадающей). Требуется измерение в тропосфере (ограничение по высоте: 12 км) и также для всего атмосферного столба — физическая единица измерения: г/кг для слоев, г/м^2 для всего атмосферного столба — единица неопределенности: % для слоев, г/м^2 для всего атмосферного столба.

Метод 1: радиолокатор обнаружения облачности — принцип: измерение уровня излучения обратного рассеяния от капель в облаке с помощью высокочастотного радиолокатора (~94 ГГц). Применяется только на НОС.

Метод 2: радиолокатор для изучения осадков — принцип: измерение уровня излучения обратного рассеяния от капель в облаке с помощью среднечастотного радиолокатора (предпочтительно на двух частотах, 14 и 35 ГГц). Применяется только на НОС.

Метод 3: МКВ/субмиллиметровое зондирование — принцип: измерение МКВ и субмиллиметрового излучений в окне замера на каналах (обычно на частотах (~10, 19, 37, 90, 150 ГГц) с двойной поляризацией и в полосах поглощения (обычно ~54, 118, 183 ГГц). Применяется как на НОС, так и потенциально на ГСО.

5.3.9 Эффективный радиус капель воды в облаке

Определение: трехмерное поле распределения по размеру мелких капелек воды в жидкой фазе, слившихся в сферы того же объема. Требуется измерение в тропосфере (ограничение по высоте: 12 км) и также на поверхности вершины облака — физическая единица измерения: мкм — единица неопределенности: мкм.

Метод 1: радиолокатор обнаружения облачности — принцип: измерение уровня радиации обратного рассеяния от капель в облаке с помощью высокочастотного радиолокатора (~94 ГГц). Применяется только на НОС.

Метод 2: радиолокатор для изучения осадков — принцип: измерение уровня радиации обратного рассеяния от капель в облаке с помощью среднечастотного радиолокатора (предпочтительно на двух частотах, 14 и 35 ГГц). Применяется только на НОС.

Метод 3: МКВ/субмиллиметровое зондирование — принцип: измерение МКВ и субмиллиметрового излучений в окне замера на каналах (обычно на частотах ~10, 19, 37, 90, 150 ГГц) с двойной поляризацией, и полосах поглощения (обычно ~54, 118, 183 ГГц). На практике профиль распределения эффективного радиуса капель воды в облаке получается с помощью соответствующих моделей ЧПП, по возможности, с разрешающей способностью для определения облачности. Применяется как на НОС, так и потенциально на ГСО.

Метод 4: лидар обратного рассеяния — принцип: измерение радиации обратного рассеяния в УФ-, ВИД- или БИК-диапазонах с помощью лидара. Практические ограничения — до вершины облака. Применяется только на НОС.

Метод 5: КВ поляриметрия — принцип: измерение рассеянной солнечной радиации на нескольких узкополосных каналах в УФ-, ВИД-, БИК- и КВИК-диапазонах, некоторые с поляриметрическими измерениями для определения трех параметров Стокса. Практические ограничения — до вершины облака. Применяется только на НОС.

Метод 6: ВИД/ИК радиометрия — принцип: измерение рассеянной солнечной радиации на нескольких узкополосных каналах в ВИД-, БИК-, КВИК- и СВИК-диапазонах. Также измеряется дифференциальное излучение на нескольких каналах в тепловом инфракрасном диапазоне (ТИК, для перистых облаков). Практические ограничения — до вершины облака. Применяется как на НОС, так и на ГСО.

5.3.10 **Лед в облаке**

Определение: трехмерное поле распределения в атмосфере воды в твердой фазе (выпадающей в виде осадков или не выпадающей). Требуется измерение в тропосфере (ограничение по высоте: 12 км) и также для всего столба — физическая единица измерения: г/кг для слоев, г/м^2 для всего атмосферного столба — единица неопределенности: % для слоев, г/м^2 для всего атмосферного столба.

Метод 1: радиолокатор для изучения облачности — принцип: измерение уровня радиации обратного рассеяния от частичек льда в облаке с помощью высокочастотного радиолокатора (~94 ГГц). Применяется только на НОС.

Метод 2: радиолокатор для изучения осадков — принцип: измерение уровня радиации обратного рассеяния от частичек льда в облаке с помощью среднечастотного радиолокатора (предпочтительно на двух частотах, 14 и 35 ГГц). Применяется только на НОС.

Метод 3: МКВ/субмиллиметровое зондирование — принцип: измерение МКВ и субмиллиметрового излучений в окне замера на каналах (обычно на частотах ~37, 90, 150 ГГц) с двойной поляризацией, и полосах поглощения (обычно ~54, 118, 183 и потенциально 380, 425 ГГц). На практике профиль распределения эффективного радиуса капель воды в облаке получается с помощью соответствующих моделей ЧПП, по возможности, с разрешающей способностью для определения облачности. Применяется как на НОС, так и потенциально на ГСО.

Метод 4: формирование изображений в субмиллиметровом диапазоне — принцип: измерение излученной и рассеянной радиации в окнах МКВ-диапазона (243, 664, 874 ГГц) с двойной поляризацией, поддерживаемой каналами на спектральной полосе поглощения H_2O (183, 325, 448 ГГц). Применим только для всего атмосферного столба. Применяется только на НОС.

Метод 5: формирование изображений в дальней ИК области спектра — принцип: измерение излученной и рассеянной радиации в атмосферных окнах на нескольких частотах дальней ИК области спектра (18,2; 24,4; 52, 87 мкм) по сравнению с ТИК (8,7; 11; 12 мкм). Применим только для всего атмосферного столба. Применяется только на НОС.

5.3.11 **Эффективный радиус льда в облаке**

Определение: трехмерное поле распределения по размеру частичек льда, слившихся в сферы того же объема. Требуется измерение в тропосфере (ограничение по высоте: 12 км) и также на поверхности вершины облака — физическая единица измерения: мкм — единица неопределенности: мкм.

Метод 1: радиолокатор для изучения облачности — принцип: измерение уровня радиации обратного рассеяния от частичек льда в облаке с помощью высокочастотного радиолокатора (~94 ГГц). Применяется только на НОС.

Метод 2: радиолокатор для изучения осадков — принцип: измерение уровня радиации обратного рассеяния от частичек льда в облаке с помощью среднечастотного радиолокатора (предпочтительно на двух частотах, 14 и 35 ГГц). Применяется только на НОС.

Метод 3: МКВ/субмиллиметровое зондирование — принцип: измерение МКВ и субмиллиметрового излучений в окне замера на каналах (обычно на частотах ~10, 19, 37, 90, 150 ГГц) с двойной поляризацией, и полосах поглощения (обычно ~54, 118, 183 ГГц). На практике профиль распределения эффективного радиуса капель воды в облаке получается с помощью соответствующих моделей ЧПП, по возможности, с разрешающей способностью для определения облачности. Применяется как на НОС, так и потенциально на ГСО.

Метод 4: лидар обратного рассеяния — принцип: измерение излучения обратного рассеяния в УФ-, ВИД- или БИК-диапазонах с помощью лидара. Практические ограничения — до вершины облака. Применяется только на НОС.

Метод 5: КВ поляриметрия — принцип: измерение рассеянной солнечной радиации на нескольких узкополосных каналах в УФ-, ВИД-, БИК- и КВИК-диапазонах, некоторые с поляриметрическими измерениями для определения трех параметров Стокса. Практические ограничения — до вершины облака. Применяется только на НОС.

Метод 6: ВИД/ИК радиометрия — принцип: измерение рассеянной солнечной радиации на нескольких узкополосных каналах в ВИД-, БИК-, КВИК- и СВИК-диапазонах. Также измеряется дифференциальное излучение на нескольких каналах в ТИК-диапазоне (для перистых облаков). Практические ограничения — до вершины облака. Применяется как на НОС, так и на ГСО.

5.3.12 Высота нулевой изотермы в облаке

Определение: высота расположения атмосферного слоя в облаке, на которой происходит трансформация воды из жидкой в твердую фазу и наоборот — физическая единица измерения: км — единица неопределенности: км.

Метод 1: радиолокатор для изучения осадков — принцип: измерение уровня радиации обратного рассеяния от капель в облаке с помощью среднечастотного радиолокатора (предпочтительно на двух частотах, 14 и 35 ГГц). Применяется только на НОС.

Метод 2: МКВ/субмиллиметровое зондирование — принцип: производная величина от зондирования температуры на частотах МКВ и субмиллиметрового диапазонов. Применяется на НОС и потенциально на ГСО.

5.3.13 Толщина слоя таяния льда в облаке

Определение: толщина атмосферного слоя в облаке, в котором происходит трансформация воды из жидкой в твердую фазу и наоборот — физическая единица измерения: км — единица неопределенности: км.

Метод 1: радиолокатор для изучения осадков — принцип: измерение уровня радиации обратного рассеяния от капель в облаке с помощью среднечастотного радиолокатора (предпочтительно на двух частотах, 14 и 35 ГГц). Применяется только на НОС.

Метод 2: МКВ/субмиллиметровое зондирование — принцип: производная величина от зондирования температуры на частотах МКВ и субмиллиметрового диапазонов. Применяется на НОС и потенциально на ГСО.

5.3.14 **Атмосферные осадки (в жидкой или твердой фазе)**

Определение: трехмерное поле распределения вертикальных потоков выпадающей водяной массы. Требуется измерение в тропосфере (ограничение по высоте: 12 км) — физическая единица измерения: $г \cdot с^{-1} \cdot м^{-2}$ (вертикальный поток выпадающей водяной массы) — единица неопределенности: %.

Метод 1: радиолокатор для изучения осадков — принцип: измерение уровня радиации обратного рассеяния от капель в облаке с помощью среднечастотного радиолокатора (предпочтительно на двух частотах, 14 и 35 ГГц). Также полезен доплеровский метод измерения. Применяется только на НОС.

Метод 2: МКВ/субмиллиметровое зондирование — принцип: измерение МКВ и субмиллиметровой радиации в окне замера на каналах (обычно на частотах ~10, 19, 37, 90, 150 ГГц) с двойной поляризацией, и полосах поглощения (обычно ~54, 118, 183, 380, 425 ГГц). На практике профиль распределения эффективного радиуса капель воды в облаке получается с помощью соответствующих моделей ЧПП, по возможности, с разрешающей способностью для определения облачности. Применяется на НОС и потенциально на ГСО.

5.3.15 **Интенсивность осадков на поверхности (в жидкой и твердой фазе)**

Определение: интенсивность атмосферных осадков, достигающих поверхности земли — физическая единица измерения: мм/ч (если осадки в твердой фазе, то мм/ч воды, образовавшейся после таяния снега или льда) — единица неопределенности: мм/ч. Поскольку неопределенность меняется с изменением интенсивности, необходимо уточнить контрольное значение интенсивности. Ограничение по интенсивности: 5 мм/ч.

Метод 1: радиолокатор для изучения осадков — принцип: измерение уровня радиации обратного рассеяния от капель в облаке с помощью среднечастотного радиолокатора (предпочтительно на двух частотах, 14 и 35 ГГц). Также полезен доплеровский метод измерения. Применяется только на НОС.

Метод 2: МКВ/субмиллиметровое зондирование — принцип: измерение МКВ и субмиллиметровой радиации в окне замера на каналах (обычно на частотах ~10, 19, 37, 90, 150 ГГц) с двойной поляризацией, и полосах поглощения (обычно ~54, 118, 183, 380, 425 ГГц). На практике профиль распределения эффективного радиуса капель воды в облаке получается с помощью соответствующих моделей ЧПП, по возможности, с разрешающей способностью для определения облачности. Применяется на НОС и потенциально на ГСО.

Метод 3: ВИД/ИК радиометрия — принцип: значение определяется по полученным изображениям облачности на нескольких дискретных каналах, подобранных таким образом, чтобы определять все виды облаков при помощи концептуальных моделей, как правило, лучше реагирующих на конвективные дождевые осадки.

Метод 4: сочетание методов МКВ зондирования с НОС и ИК зондирования с ГСО — принцип: продукция на основе объединения данных, полученных с НОС в МКВ-диапазоне с помощью надежных/нечастых измерений, с данными на основе часто получаемых ИК-изображений с ГЕО, используемых либо для «калибровки» МКВ измерениями, либо для предоставления возможности проведения динамической интерполяции между данными об осадках, полученными методом МКВ зондирования. Требуются как НОС, так и ГСО.

5.3.16 Суммарные осадки (за 24 часа или с другой периодичностью менее суток)

Определение: интегрирование интенсивности атмосферных осадков, достигающих поверхности земли. Базовым требованием является интеграция за 24 часа — физическая единица измерения: мм — единица неопределенности: мм.

Метод 1: от сочетания методов МКВ зондирования с НОС и ИК зондирования с ГСО — принцип: производная от интеграции по времени часто измеряемой скорости выпадения осадков путем слияния данных о скорости выпадения осадков, полученных с помощью МКВ зондирования с НОС, с данными на основе ИК-изображений с ГСО. Требуются как НОС, так и ГСО.

5.3.17 Обнаружение молний

Определение: картирование явлений молнии в виде числа вспышек в заданный интервал времени над заданным районом — физическая единица измерения: число - неопределенность выражена в виде ударной скорости (УС) и уровня ложной тревоги (УЛТ).

Метод 1: картирование молний — принцип: обнаружение вспышек с помощью полупроводниковой камеры на приборах с зарядовой связью (ПЗС) в очень узкополосном спектре на БИК-полосе поглощения кислорода (обычно на волне 777,4 нм) для возможности использования также и в дневное время. Число вспышек в заданный интервал времени над заданным районом и их интенсивность связаны с развитостью конвективных процессов в облаке. Применяется как на НОС, так и потенциально на ГСО.

5.4 АЭРОЗОЛИ И РАДИАЦИЯ

Этот тематический раздел охватывает переменные, оказывающие воздействие на радиационный баланс Земли в сопоставлении с космосом, взаимодействие облачности и радиации, образование облачности, качество воздуха и несколько факторов, характеризующих климат и его изменение. В таблице 5.3 перечислены переменные, наблюдаемые из космоса.

Таблица 5.3. Геофизические переменные, рассматриваемые в тематическом разделе «Аэрозоли и радиация»

Оптическая плотность аэрозоля	Восходящий поток спектральной плотности излучения на ВГА	Альбедо поверхности Земли
Концентрация аэрозолей	Восходящий поток ДВ-излучения на ВГА	Двунаправленное отражение КВ радиации от поверхности Земли
Эффективный радиус аэрозоля	Восходящий поток КВ-излучения на ВГА	Восходящий поток ДВ-излучения на поверхности Земли
Тип аэрозоля	Отражение коротковолнового излучения от облаков	Длинноволновое излучение поверхности Земли
Вулканический пепел	Нисходящий поток ДВ-излучения на поверхности Земли	Активная радиация фотосинтеза (АРФ)
Нисходящий поток солнечного излучения на ВГА	Нисходящий поток КВ-излучения на поверхности Земли	Доля поглощаемой АРФ

Дополнительные переменные, такие как оптическая плотность поглощения аэрозолем, коэффициент аэрозольного ослабления, альбедо однократного рассеяния аэрозолем и фазовая функция аэрозоля, здесь не рассматриваются, поскольку они тесно связаны с отобранными для этого тематического раздела переменными (оптическая плотность, концентрация, эффективный радиус и тип), которые доступнее для понимания обычными пользователями.

5.4.1 Оптическая плотность аэрозоля

Определение: эффективная плотность столба аэрозолей в атмосфере с точки зрения проникновения излучения. Определяется как $OD = \exp(-K\,\Delta z)$, где K — коэффициент затухания (км$^{-1}$), Δz — путь оптического луча (км) между земной поверхностью и ВГА. Она зависит от длины волны — физическая единица измерения: безразмерная — единица неопределенности: безразмерная.

Метод 1: лидар обратного рассеяния — принцип: измерение радиации обратного рассеяния в УФ-, ВИД- или БИК-диапазонах с помощью лидара. Применяется только на НОС.

Метод 2: КВ поляриметрия — принцип: измерение рассеянной солнечной радиации на нескольких узкополосных каналах в УФ-, ВИД-, БИК- и КВИК-диапазонах, некоторые с поляриметрическими измерениями для определения трех параметров Стокса. Также используется многократный обзор с разным углом падения. Применяется только на НОС.

Метод 3: КВ спектроскопия (надирная) — принцип: измеряется рассеянная радиация в УФ-, ВИД-, БИК- и КВИК-диапазонах при надирном наблюдении с высокой спектральной разрешающей способностью. Применяется как на НОС, так и на ГСО.

Метод 4: ВИД/ИК радиометрия — принцип: измерение рассеянной солнечной радиации на нескольких каналах в ВИД-, БИК- и КВИК-диапазонах. Некоторая информация, относящаяся к поглощающим аэрозолям, также доступна при измерении в окнах ТИК-диапазона. Применяется как на НОС, так и на ГСО.

5.4.2 Концентрация аэрозолей

Определение: трехмерное поле отношений концентраций компонентов смеси конденсированных частиц в атмосфере (кроме воды) — требуется измерение от поверхности до ВГА (слои атмосферы: НТ, ВТ, НС, ВС и М) + весь атмосферный столб — физическая единица измерения: г/кг для слоев, г/м^2 для всего атмосферного столба — единица неопределенности: % для слоев, г/м^2 для всего атмосферного столба.

Метод 1: лидар обратного рассеяния — принцип: измерение излучения обратного рассеяния в УФ-, ВИД- или БИК-диапазонах с помощью лидара. Применяется только на НОС.

Метод 2: КВ поляриметрия — принцип: измерение рассеянной солнечной радиации на нескольких узкополосных каналах в УФ-, ВИД-, БИК- и КВИК-диапазонах, некоторые с поляриметрическими измерениями для определения трех параметров Стокса. Также используется многократный обзор с разным углом падения. Применяется только на НОС.

Метод 3: КВ спектроскопия (надирная) — принцип: измеряется рассеянная радиация в УФ-, ВИД-, БИК- и КВИК-диапазонах при надирном наблюдении с высокой спектральной разрешающей способностью. Применяется как на НОС, так и на ГСО.

Метод 4: КВ спектроскопия (лимбовая) — принцип: измеряется рассеянная радиация в УФ, ВИД, БИК и КВИК диапазонах в режиме лимбовых наблюдений с высокой спектральной разрешающей способностью. Также используются наблюдения за поглощенной радиацией от солнца и звезд во время затмения. Применяется только на НОС.

Метод 5: ВИД/ИК радиометрия — принцип: измерение рассеянной солнечной радиации на нескольких каналах в ВИД-, БИК- и КВИК-диапазонах. Некоторая информация, относящаяся к поглощающим аэрозолям, также доступна при измерении в окнах ТИК-диапазона. Подходит только для всего атмосферного столба. Применяется как на НОС, так и на ГСО.

5.4.3 Эффективный радиус аэрозоля

Определение: трехмерное поле аэрозольных частиц среднего размера, слившихся в сферы того же объема. Требуется измерение в тропосфере (ограничение по высоте: 12 км) и получение осредненного значения по всему атмосферному столбу — физическая единица измерения: мкм — единица неопределенности: мкм.

Метод 1: лидар обратного рассеяния — принцип: измерение радиации обратного рассеяния в УФ-, ВИД- или БИК-диапазонах с помощью лидара. Применяется только на НОС.

Метод 2: КВ поляриметрия — принцип: измерение рассеянной солнечной радиации на нескольких узкополосных каналах в УФ-, ВИД-, БИК- и КВИК-диапазонах, некоторые с поляриметрическими измерениями для определения трех параметров Стокса. Также используется многократный обзор с разным углом падения. Необходимо использование априорной информации и интенсивного моделирования. Применяется только на НОС.

Метод 3: КВ спектроскопия (надирная) — принцип: измеряется рассеянная радиация в УФ-, ВИД-, БИК- и КВИК диапазонах при наблюдениях в надир с высокой спектральной разрешающей способностью. Необходимо использование априорной информации и интенсивного моделирования. Применяется как на НОС, так и на ГСО.

5.4.4 Тип аэрозоля

Определение: трехмерное поле. Комплексные характеристики наблюдаемых аэрозолей. Перечень интересуемых типов определяется заранее — требуется измерение в тропосфере (ограничение по высоте: 12 км) и получение осредненного значения по всему атмосферному столбу — неопределенность обычно определяется с точки зрения достоверности, с которой аэрозоль может быть отнесен к тому или иному типу. Например, с какой достоверностью можно определить наличие пыли в данном пикселе (0 %-100 %). Точность указывается в виде вероятности правильного обнаружения. Обратите внимание, что в стратосфере можно обнаружить вулканический пепел и даже иногда дымовой аэрозоль (ситуация с пирооблаками).

Метод 1: лидар обратного рассеяния — принцип: измерение радиации обратного рассеяния в УФ-, ВИД- или БИК-диапазонах с помощью лидара. Применяется только на НОС.

Метод 2: КВ поляриметрия — принцип: измерение рассеянной солнечной радиации на нескольких узкополосных каналах в УФ-, ВИД-, БИК- и КВИК-диапазонах, некоторые с поляриметрическими измерениями для определения трех параметров Стокса. Также используется многократный обзор с разным углом падения. Совершенно необходимо использование априорной информации и интенсивного аэрозольного моделирования. Применяется только на НОС.

Метод 3: КВ спектроскопия (надирная) — принцип: измеряется рассеянная радиация в УФ-, ВИД-, БИК- и КВИК-диапазонах при наблюдениях в надир с высокой спектральной разрешающей способностью. Необходимо использование априорной информации и интенсивного моделирования. Применяется как на НОС, так и на ГСО.

Метод 4: ВИД/ИК радиометрия — принцип: измерение рассеянной солнечной радиации на нескольких каналах в ВИД-, БИК- и КВИК-диапазонах. Некоторая информация,

относящаяся к поглощающим аэрозолям, также доступна при измерении в окнах ТИК-диапазона. Необходимо использование априорной информации и интенсивного моделирования. Подходит только для всего атмосферного столба. Применяется как на НОС, так и на ГСО.

5.4.5 Вулканический пепел

Определение: трехмерное поле концентрации вулканического пепла — требуется измерение от поверхности до ВГА (слои атмосферы: НТ, ВТ, НС, ВС и М) + весь атмосферный столб — физическая единица измерения: мг/м^3 или г/кг для слоев, г/м^2 для всего атмосферного столба — единица неопределенности: % для слоев, г/м^2 для всего столба.

Метод 1: лидар обратного рассеяния — принцип: измерение радиации обратного рассеяния в УФ-, ВИД- или БИК-диапазонах с помощью лидара. Применяется только на НОС.

Метод 2: КВ поляриметрия — принцип: измерение рассеянной солнечной радиации на нескольких узкополосных каналах в УФ-, ВИД-, БИК- и КВИК-диапазонах, некоторые с поляриметрическими измерениями для определения трех параметров Стокса. Также используется многократный обзор с разным углом падения. Применяется только на НОС.

Метод 3: КВ спектроскопия (надирная) — принцип: измеряется рассеянная радиация в УФ-, ВИД-, БИК- и КВИК-диапазонах при наблюдениях в надир с высокой спектральной разрешающей способностью. Применяется как на НОС, так и на ГСО.

Метод 4: КВ спектроскопия (лимбовая) — принцип: измеряется рассеянная радиация в УФ-, ВИД-, БИК- и КВИК-диапазонах в режиме лимбовых наблюдений с высокой спектральной разрешающей способностью. Также используются наблюдения за поглощенной радиацией от солнца и звезд во время затмения. Применяется только на НОС.

Метод 5: ВИД/ИК радиометрия — принцип: измерение рассеянной солнечной радиации на нескольких каналах в ВИД-, БИК- и КВИК-диапазонах.

Метод 6: Пассивные ИК-измерения являются основным методом дистанционного зондирования вулканического пепла. Другие методы считаются подходами с добавленной стоимостью. Используемый метод представляет собой дифференциальное поглощение в ИК-окнах. Кроме того, для определения минерального состава золы, что очень важно, используются гиперспектральные ИК-измерения. Применяется как на НОС, так и на ГСО.

5.4.6 Нисходящий поток солнечного излучения на верхней границе атмосферы

Определение: плотность потока солнечного излучения на верхней границе атмосферы — физическая единица измерения: Вт/м^2 — единица неопределенности: Вт/м^2.

Метод 1: резонансный радиометр — принцип: измерение захваченного общего нисходящего потока солнечной радиации на высоте спутника с помощью прибора, такого как активного резонансного радиометра. Абсолютный метод измерения. Применяется на НОС, ГСО или орбитах в открытом космосе, в точке Лагранжа L1 (точка либрации), к примеру.

5.4.7 Восходящий поток спектральной плотности излучения на верхней границе атмосферы

Определение: мощность восходящего излучения, измеренная в верхней части атмосферы на единицу площади, на телесный угол и на интервал длины волны. Спектральный диапазон 0,2–200 мкм. Разрешающая способность $\lambda/\Delta\lambda = 1\,000$. Неопределенность выражена как отношение сигнал–шум.

Метод 1: широкополосная спектроскопия — принцип: измерение излучения в интервале 0,2–200 мкм, излучаемого системой Земля-атмосфера в направлении космоса. Необходимо несколько спектрометров для охвата КВ- и ДВ- диапазонов. Целью исследований является мониторинг изменения климата с использованием спектра как абсолютного показателя («сигнатуры»). Применяется только на НОС.

5.4.8 Восходящий поток длинноволнового излучения на верхней границе атмосферы

Определение: плотность потока инфракрасного земного излучения в космос поверхностью Земли, атмосферой и облаками на верхней границе атмосферы — физическая единица измерения: Вт/м^2 — единица неопределенности: Вт/м^2.

Метод 1: широкополосная радиометрия — принцип: измерение излучения в интервале 4–200 мкм, излучаемого системой Земля-атмосфера в направлении космоса, с помощью детекторов, имеющих как можно более плоскую характеристику в интервале измерения. Применяется как на НОС, так и на ГСО.

5.4.9 Восходящий поток коротковолнового излучения на верхней границе атмосферы

Определение: плотность потока земного излучения в космос поверхностью Земли, атмосферой и облаками на верхней границе атмосферы — физическая единица измерения: Вт/м^2 — единица неопределенности: Вт/м^2.

Метод 1: Широкополосная радиометрия — принцип: измерение излучения в интервале 0,2–4.0 мкм, отражаемого системой Земля-атмосфера в направлении космоса, с помощью детекторов, имеющих как можно более плоскую характеристику в интервале измерения. Информация о двунаправленном отражении и моделировании требуется для того, чтобы конвертировать энергетическую яркость излучения в плотность интенсивности падающего излучения. Применяется как на НОС, так и на ГСО.

Метод 2: коротковолновая радиометрия — принцип: измерение излучения, отражаемого системой Земля-атмосфера в нескольких узких ВИД и БИК диапазонах. Для преобразования узкополосных излучений в коротковолновое излучение необходимо использовать модели углового распределения (двунаправленное отражение) и спектральные преобразования.

5.4.10 Отражение коротковолнового излучения от облаков

Определение: отражение солнечного излучения от облаков — физическая единица измерения: % — единица неопределенности: %.

Метод 1: КВ радиометрия — принцип: измерение солнечного излучения обратного рассеяния на нескольких каналах в ВИД-, БИК- или КВИК-диапазонах. Рекомендуется использовать конфигурацию с разными углами обзора. Применяется как на НОС, так и на ГСО.

5.4.11 Нисходящий поток длинноволнового излучения на поверхности Земли

Определение: плотность потока длинноволнового излучения от солнца, атмосферы и облаков к поверхности Земли — физическая единица измерения: Вт/м^2 — единица неопределенности: Вт/м^2.

Метод 1: от ИК/МКВ зондирования — принцип: продукция высокого уровня, получаемая как производная от профилей температуры воздуха и водяного пара в атмосфере. Необходимо учитывать информацию об облачном покрове и высоте нижней границы облачности. Необходимо применять атмосферное моделирование. Применяется как на НОС, так и на ГСО.

5.4.12 Нисходящий поток коротковолнового излучения на поверхности Земли

Определение: плотность потока коротковолнового излучения от солнца, атмосферы и облаков к поверхности Земли — физическая единица измерения: Вт/м^2 — единица неопределенности: Вт/м^2. В таких областях применения, как солнечная энергия, используется единица измерения МДж м$^{-2}$.

Метод 1: КВ радиометрия — принцип: продукция высокого уровня, получаемая как производная от измерений рассеянного солнечного излучения на нескольких узкополосных (и широкополосных) каналах в ВИД-, БИК- и КВИК-диапазонах для оценки затухания от облаков и аэрозолей. Помогает использование разных углов обзора и мультиполяризация. Применяется как на НОС, так и на ГСО. Следует отметить, что нисходящее коротковолновое излучение на поверхности и отражаемое широкополосное излучение на ВГА тесно связаны, что способствует получению информации.

5.4.13 Альбедо поверхности Земли

Определение: интегрированное в масштабе полушария отражение от поверхности Земли излучения в диапазоне 0,4–0,7 мкм (или в других определенных коротковолновых диапазонах) — физическая единица измерения: % — единица неопределенности: %.

Метод 1: КВ радиометрия с разными углами обзора — принцип: продукция высокого уровня, получаемая после измерений рассеянного солнечного излучения на нескольких каналах ВИД-диапазона под несколькими углами обзора и при разной высоте солнца для оценки эффекта анизотропии и улучшения расчетов радиационных потоков. Используются также каналы для определения атмосферных поправок. Применяется только на НОС и ГСО.

Метод 2: ВИД радиометрия — принцип: измерение рассеянного солнечного излучения на нескольких каналах ВИД-диапазона, в том числе на каналах для определения атмосферных поправок. Эффект анизотропии для интегрирования в масштабе полушария рассчитывается с помощью моделирования. Применяется как на НОС, так и на ГСО.

5.4.14 Двунаправленное отражение коротковолнового излучения от поверхности Земли

Определение: отражение от поверхности Земли как функция угла обзора и условий освещенности в диапазоне 0,4–0,7 мкм (или в других специальных коротковолновых диапазонах) — физическая единица измерения: % — единица неопределенности: %.

Метод 1: КВ радиометрия — принцип: измерение рассеянного солнечного излучения на нескольких каналах ВИД-, БИК- и КВИК-диапазонов под несколькими углами обзора

и при разной высоте солнца для оценки эффекта анизотропии и улучшения расчетов радиационных потоков. Используются также каналы для определения атмосферных поправок. Применяется только на НОС.

5.4.15 Восходящий поток длинноволнового излучения на поверхности Земли

Определение: плотность потока длинноволнового излучения, исходящего от поверхности Земли — физическая единица измерения: Вт/м^2 — единица неопределенности: Вт/м^2.

Метод 1: широкополосная радиометрия — принцип: измерение излучения в интервале 4–200 мкм, испускаемого поверхностью Земли в направлении атмосферы и, в конечном итоге, в космос. Нужны детекторные приемники с максимально возможной плоской характеристикой в интервале измерений. Необходимо применять атмосферные поправки, главным образом, на водяной пар и облачность. Применяется как на НОС, так и на ГСО.

5.4.16 Длинноволновое излучение поверхности Земли

Определение: излучение поверхности Земли в тепловом ИК-диапазоне как функция длины волны — физическая единица измерения: % — единица неопределенности: %.

Метод 1: ИК радиометрия — принцип: измерение испускаемого излучения в нескольких относительно узкополосных ИК каналах обзора для определения эквивалентных температур абсолютно черного тела на нескольких длинах волн. Применяется как на НОС, так и на ГСО.

Метод 2: ИК спектроскопия — принцип: множественное определение эквивалентных температур абсолютно черного тела в наибольшем числе узких окон обзора по всему ИК-диапазону спектра. Применяется как на НОС, так и на ГСО.

5.4.17 Активная радиация фотосинтеза

Определение: плотность потока нисходящих фотонов с длиной волны 0,4–0,7 мкм на поверхности — физическая единица измерения: μ эйнштейн $\cdot$ м$^{-2}$ $\cdot$ с$^{-1}$ (1 эйнштейн = 6 $\cdot$ 10^{23} фотонов); наиболее используемая: Вт/м^2 — единица неопределенности: Вт/м^2.

Метод 1: ВИД радиометрия — принцип: продукция высокого уровня, подобная «нисходящему потоку коротковолнового излучения на поверхности Земли» за исключением того, что она относится к интервалу 0,4–0,7 мкм, используемому растительностью для фотосинтеза. Применяется как на НОС, так и на ГСО.

5.4.18 Доля поглощаемой активной радиации фотосинтеза

Определение: доля активной радиации фотосинтеза, поглощаемой растительностью (наземной и морской), для поддержания процессов фотосинтеза (обычно вокруг «красного» участка спектра) — физическая единица измерения: % — единица неопределенности: %.

Метод 1: ВИД радиометрия — принцип: рассчитывается на основе измеренной активной радиации фотосинтеза и одного измерения в районе «красного» участка спектра (~670 нм). Применяется как на НОС, так и на ГСО.

5.5 ОКЕАН И МОРСКОЙ ЛЕД

Этот тематический раздел состоит из переменных, характеризующих состояние поверхности океана, включая волны и морской лед. В таблице 5.4 перечислены переменные, наблюдаемые из космоса.

Таблица 5.4. Геофизические переменные, рассматриваемые в тематическом разделе «Океан и морской лед»

Концентрация хлорофилла в океане	Температура поверхности моря	Преимущественное направление волн	Вид морского льда
Цветность растворенных органических веществ	Соленость поверхности моря	Доминантный период волн	Температура поверхности льда
Концентрация взвешенных наносов в океане	Динамическая карта поверхности океана	Частотный спектр направленной энергии волн	Движение/дрейф льда
Коэффициент диффузионного ослабления в океане (ДОО)	Уровень моря в прибрежных районах (приливы и отливы)	Покров/сплоченность морского льда	
Площадь нефтяных разливов	Высота значительных волн	Толщина морского льда	

Многие переменные здесь не рассмотрены: профили температуры и солености в поверхностном слое океана (невозможно измерить из космоса), течения (производная продукция от карты поверхности океана в отношении геострофического компонента, невозможно измерить или в ином случае слишком неточные данные), протяженность или высота айсберга (особый случай для определения ледового покрова и толщины льда), дрейф льда (продукция динамического анализа).

5.5.1 Концентрация хлорофилла в океане

Определение: индикатор живой биомассы фитопланктона, получаемый из наблюдений за цветностью океана. Требуется определять как для районов открытого океана, так и для прибрежной зоны — физическая единица измерения: мг/м^3 — единица неопределенности: мг/м^3 при определенной концентрации (например 1 мг/м^3).

Метод 1: ВИД радиометрия — принцип: измерение отраженной солнечной радиации на нескольких каналах (наиболее значительные: 442,5 нм, 490 нм, 560 нм, 665 нм, 681,25 нм). Спектральная разрешающая способность порядка 2 %. Применяется как на НОС, так и на ГСО.

5.5.2 Цветность растворенных органических веществ (ЦРОВ)

Определение: прежнее название «спектральная поглощательная способность желтого вещества». Значение переменной получают из наблюдений за цветностью океана. Показывает уровень живой биомассы, разлагающейся в процессе фотосинтеза. Требуется определять как для районов открытого океана, так и для прибрежной зоны — физическая единица измерения: м$^{-1}$ — единица неопределенности: м$^{-1}$ при определенной концентрации (такой как 1 м$^{-1}$).

Метод 1: ВИД радиометрия — принцип: измерение отраженной солнечной радиации на нескольких каналах (наиболее значительный: 412,5 нм). Спектральная разрешающая способность порядка 2 %. Применяется как на НОС, так и на ГСО.

5.5.3 Концентрация взвешенных наносов в океане

Определение: переменная величина извлекается из наблюдений за цветностью океана. Показывает речной сток, наносы или загрязнения веществами небиологического происхождения. Требуется определять как для районов открытого океана, так и для прибрежной зоны — физическая единица измерения: г/м^3 — единица неопределенности: г/м^3 при определенной концентрации (такой как 2 мг/м^3).

Метод 1: ВИД радиометрия — принцип: измерение отраженной солнечной радиации на нескольких каналах (наиболее значительные: 510 нм, 560 нм, 620 нм). Спектральная разрешающая способность порядка 2 %. Применяется как на НОС, так и на ГСО.

5.5.4 Коэффициент диффузионного ослабления в океане

Определение: бывшее название: «прозрачность воды». Индикатор мутности воды и вертикальных процессов в океане, извлекается из наблюдений за цветностью океана. Требуется определять как для районов открытого океана, так и для прибрежной зоны — физическая единица измерения: м$^{-1}$ — единица неопределенности: м$^{-1}$.

Метод 1: ВИД радиометрия — принцип: измерение отраженной солнечной радиации на нескольких каналах в диапазоне 400–700 нм. Спектральная разрешающая способность порядка 2 %. Применяется как на НОС, так и на ГСО.

5.5.5 Площадь нефтяных разливов

Определение: доля района океана, загрязненная углеводородами в результате антропогенной деятельности случайно или преднамеренно (например, при сбросе с морских судов, трубопроводов). Разливы нефти оказывают воздействие на процессы взаимодействия океана и атмосферы. Требуется определять как для районов открытого океана, так и для прибрежной зоны — физическая единица измерения: % — единица неопределенности: %.

Метод 1: ВИД/БИК радиометрия — принцип: измерение отраженной солнечной радиации на нескольких каналах в диапазоне 400–1 000 нм. Спектральная разрешающая способность порядка 2 %. Применяется как на НОС, так и на ГСО.

Метод 2: КВ поляриметрия — принцип: измерение рассеянной солнечной радиации на нескольких узкополосных каналах в ВИД-, БИК- и КВИК-диапазонах, некоторые с двойной поляризацией. Применяется только на НОС.

Метод 3: оптические изображения высокого разрешения — принцип: измерение отраженной солнечной радиации в ВИД/БИК/КВИК-диапазонах, наблюдаемой на нескольких дискретных каналах относительно узких полос частот пропускания (1 %–5 %). Применяется только на НОС.

Метод 4: изображения, полученные с помощью РСА — принцип: измерение МКВ-излучения обратного рассеяния на частотах 1,3, 5 или 11 ГГц с помощью РСА. Полезно использовать поляриметрические возможности измерения. Применяется только на НОС.

5.5.6 Температура поверхности моря

Определение: температура воды на поверхности моря. Температура «на глубине» обычно означает измерения с дрейфующих (~0,2 м) и заякоренных (~1 м) буев. Температура «поверхностной пленки» относится к проводящему слою, характеристики которого определяются диффузией, глубиной ~10-20 мкм (слой, к которому чувствительно ИК-излучение). Температура «подповерхностного слоя» означает температуру у основания

проводящего ламинарного подслоя поверхности океана, обычно на уровне ~1 мм (слой, к которому чувствительно МКВ излучение). Физическая единица измерения: K — единица неопределенности: K.

Метод 1: ИК радиометрия — принцип: производная от ИК изображений, обычно с использованием нескольких диапазонов- «окон», каждый из которых чувствителен к температуре поверхности моря и приповерхностной атмосфере, но по-своему (так называемый метод дифференциального поглощения). Применяется как на НОС, так и на ГСО.

Метод 2: ИК спектроскопия — принцип: производная от большого количества очень узконаправленных каналов по всему ИК-диапазону спектра, связанных с другими каналами, предоставляющими информацию, необходимую для определения атмосферной поправки. Применяется как на НОС, так и на ГСО.

Метод 3: МКВ радиометрия — принцип: измерение излученной и рассеянной МКВ-радиации в атмосферных окнах в диапазоне малых значений средних частот (в частности 5 ГГц и 10 ГГц). Требуется проводить больше поляризационных измерений для поправки на эффект шероховатости. Применяется только на НОС.

5.5.7 Соленость поверхности моря

Определение: соленость морской воды в поверхностном слое, который подвергается воздействию турбулентных движений, вызванных давлением ветра, волнами и циклом суточного нагревания. (Это слой толщиной в несколько метров, но микроволновые измерения репрезентативны только для верхнего слоя ~1 м). Для районов открытого океана правильно использовать термин «хлореность» для того, чтобы указать на самый распространенный анион хлора — физическая единица измерения: безразмерная, выражается по практической шкале солености (PSS-78), близкая к 1 ‰ или 1 г соли на 1 литр раствора — единица неопределенности: безразмерная.

Метод 1: МКВ радиометрия — принцип: измерение излученной и рассеянной МКВ радиации в низкочастотном диапазоне (например, 1,4 ГГц). Требуется проводить больше поляризационных измерений для поправки на эффект шероховатости. Желательно использовать больше каналов для поправки на температуру. Применяется только на НОС.

5.5.8 Динамическая карта поверхности океана

Определение: отклонение уровня моря от геоида в результате воздействия океанских течений (после внесения поправок на воздействие прилива/отлива и атмосферного давления) — физическая единица измерения: см — единица неопределенности: см.

Метод 1: радиолокационная альтиметрия — принцип: измерение излучения обратного рассеяния от поверхности моря с помощью среднечастотного радиолокатора (предпочтительно использовать двойную частоту, 13 ГГц и 3 ГГц или 5 ГГц). Необходимо использовать пассивную МКВ радиометрию на ассоциированных двух или трех каналах (23 ГГц и 37 ГГц и/или 13 ГГц и 3 ГГц или 5 ГГц) для поправки на путь луча в тропосфере с учетом водяного пара и обусловленного ионосферой завихрения. Карта поверхности океана получается путем фильтрования колебаний высоты волн из ряда данных, полученных в результате измерений на дальности от спутника до поверхности моря. Применяется только на НОС.

5.5.9 **Уровень моря в прибрежных районах (приливы и отливы)**

Определение: отклонение уровня моря от местного нулевого уровня в прибрежной зоне в результате воздействия местных течений и приливов/отливов (астрономического и ветрового происхождения) — физическая единица измерения: см — единица неопределенности: см.

Метод 1: радиолокационная альтиметрия — принцип: измерение излучения обратного рассеяния от поверхности моря с помощью среднечастотного радиолокатора (предпочтительно использовать двойную частоту, 13 ГГц и 3 ГГц или 5 ГГц). Необходимо использовать пассивную МКВ радиометрию на ассоциированных двух или трех каналах (23 ГГц и 37 ГГц и/или 19 ГГц) для поправки на путь луча в тропосфере с учетом водяного пара и обусловленного ионосферой завихрения. Уровень моря получается путем фильтрования колебаний высоты волн из ряда данных, полученных в результате измерений на дальности от спутника до поверхности моря. Применяется только на НОС.

5.5.10 **Высота значительных волн**

Определение: средняя амплитуда 30 самых высоких из 100 волн — физическая единица измерения: м — единица неопределенности: м.

Метод 1: радиолокационная альтиметрия — принцип: измерение излучения обратного рассеяния от поверхности моря с помощью среднечастотного радиолокатора (предпочтительно использовать двойную частоту, 13 ГГц и 3 ГГц или 5 ГГц). Высота волны связана с многообразием диапазонов измерений. Применяется только на НОС.

Метод 2: от спектральных характеристик РСА — принцип: производная от спектрального анализа изображений, полученных с помощью РСА, на частотах 1,3 ГГц или 5 ГГц, путем обработки данных о спектральной плотности, длине волны и направлении излучения с использованием граничных условий. Применяется только на НОС.

5.5.11 **Преимущественное направление волн**

Определение: одна из особенностей спектральной характеристики океанских волн. Это направление волны с самой большой энергией в спектре — физическая единица измерения: градусы — единица неопределенности: градусы.

Метод 1: от спектральных характеристик РСА — принцип: производная от спектрального анализа изображений, полученных с помощью РСА, на частотах 1,3; 5 или 11 ГГц. Применяется только на НОС.

5.5.12 **Преимущественный период волн**

Определение: одна из особенностей спектральной характеристики океанских волн. Это период волны с самой большой энергией в спектре — физическая единица измерения: с — единица неопределенности: с.

Метод 1: от спектральных характеристик РСА — принцип: производная от спектрального анализа изображений, полученных с помощью РСА, на частотах 1,3; 5 или 11 ГГц. Применяется только на НОС.

5.5.13 Частотный спектр направленной энергии волн

Определение: двухмерная переменная, иначе называемая «волновой спектр». Описывает энергию волны, распространяющейся в каждом направлении и полосе частот (таких как 24 дискретных азимутальных секторов по 15° каждый и 25 частотных полос) — физическая единица измерения: $м^2 \cdot Гц^{-1} \cdot рад^{-1}$ — единица неопределенности: $м^2 \cdot Гц^{-1} \cdot рад^{-1}$.

Метод 1: от спектральных характеристик РСА — принцип: производная от спектрального анализа изображений, полученных с помощью РСА, на частотах 1,3; 5 или 11 ГГц. Применяется только на НОС.

5.5.14 Покров/сплоченность морского льда

Определение: доля района океана, где обнаружен лед — физическая единица измерения: % — единица неопределенности: %.

Метод 1: ВИД/ИК радиометрия — принцип: измерение отраженной солнечной радиации или излученной радиации в СДИК/ИК-диапазонах наблюдений на нескольких дискретных каналах относительно большой полосы пропускания (5–10 %). Относительная площадь ледового покрова определяется числом пикселей, классифицированных как «лед», в заданном массиве пикселей. Применяется как на НОС, так и на ГСО.

Метод 2: МКВ радиометрия — принцип: измерение излученной и рассеянной МКВ радиации в атмосферных окнах на среднем диапазоне высоких частот (таких как 37 ГГц, 90 ГГц). Требуется проводить больше поляризационных измерений (сигнал, отраженный от поверхности моря, сильно поляризован). Относительная площадь ледового покрова определяется числом пикселей, классифицированных как «лед», в заданном массиве пикселей. Применяется только на НОС.

Метод 3: оптические изображения высокого разрешения — принцип: измерение отраженной солнечной радиации в ВИД/БИК/КВИК-диапазонах наблюдений на нескольких дискретных каналах. Высокая разрешающая способность достигается за счет цикла наблюдений. Применяется только на НОС.

Метод 4: изображения, полученные с помощью РСА — принцип: измерение МКВ излучения обратного рассеяния на частотах 1,3; 5 или 11 ГГц с помощью радиолокатора с синтезированной апертурой. Относительная площадь ледового покрова определяется числом пикселей, классифицированных как «лед», в заданном массиве пикселей. Применяется только на НОС.

5.5.15 Толщина морского льда

Определение: толщина ледового покрова. Она относится к высоте поверхности морского льда над уровнем моря и к плотности льда — физическая единица измерения: см — единица неопределенности: см.

Метод 1: радиолокационная альтиметрия — принцип: измерение излучения обратного рассеяния от поверхности моря с помощью среднечастотного радиолокатора (предпочтительно использовать двойную частоту, 13 ГГц и 3 ГГц или 5 ГГц). Необходимо использовать пассивную МКВ радиометрию на ассоциированных двух каналах (23 и 37 ГГц) для поправки на путь луча в тропосфере с учетом водяного пара. Применяется только на НОС.

Метод 2: лидарная альтиметрия — принцип: измерение ВИД/БИК-излучения обратного рассеяния с помощью лидара. Предпочтительно использовать две длины волны, такие как 532 и 1 064 нм. Применяется только на НОС.

Метод 3: радиолокационная (РСА) интерферометрия — принцип: измерение МКВ излучения обратного рассеяния на частотах 1,3; 5 или 11 ГГц с помощью радиолокатора с синтезированной апертурой. Высота наблюдаемой поверхности определяется методом интерферометрии между изображениями, полученными от нескольких пролетов спутника над районом. Применяется только на НОС.

Метод 4: ВИД/ИК радиометрия — принцип: измерение отраженной солнечной радиации в ВИД/БИК/КВИК-диапазонах и излученной радиации в ИК-спектре на нескольких дискретных каналах относительно широкой полосы пропускания дает оценки альбедо поверхности и температуры поверхностной пленки океана. Они используются для решения модели поверхностного энергетического баланса для льда при определении толщины льда.

Метод 5: пассивный МКВ L-диапазон — принцип: поверхностная излучательная способность морского льда в L-диапазоне (1,4 ГГц), которая является функцией от частичной проницаемости излучательной способности подстилающей морской воды, толщины морского льда и солености морского льда, с учетом высоты снежного покрова на поверхности морского льда. Независимое измерение температуры поверхности льда улучшает получение информации. Желательно провести многочисленные поляризационные измерения. Применяется только на НОС.

5.5.16 **Вид морского льда**

Определение: комплексные характеристики (возраст, неровность рельефа, плотность и др.) наблюдаемого морского льда. Перечень интересуемых видов льда определяется заранее — неопределенность выражается в виде числа дискриминантных видов (классов).

Метод 1: радиолокационная скаттерометрия — принцип: измерение излучения обратного рассеяния с помощью скаттерометрии на основе среднечастотного радиолокатора (около 5 или 11 ГГц). Коэффициент отражения калиброванного радиолокатора зависит от неровности рельефа и проводимости поверхности (связана с возрастом льда). Применяется только на НОС.

Метод 2: МКВ радиометрия — принцип: измерение излученной и рассеянной МКВ-радиации в атмосферных окнах на средних частотах (таких как 19 и 37 ГГц). Желательно определение трех параметров Стокса (т. е., по крайней мере, четыре поляризации). Применяется только на НОС.

Метод 3: радиолокационные (РСА) изображения — принцип: измерение МКВ-излучения обратного рассеяния на частотах 1,3; 5 или 11 ГГц с помощью РСА. Применяется только на НОС.

5.5.17 **Температура поверхности льда**

Определение: излучаемая температура или температура поверхностной пленки морского льда. Поверхность может представлять собой бесснежный лед или иметь снежный покров — физическая единица измерения: К — единица неопределенности: К.

Метод 1: ИК радиометрия — принцип: производная от ИК изображений на многих каналах, включая «окна» и другие каналы (на спектральных частотах поглощения водяного пара), необходимые для оценки атмосферного ослабления. Применяется как на НОС, так и на ГСО.

Метод 2: МКВ радиометрия — принцип: производная от низкочастотных МКВ каналов, включая «окна» и другие чувствительные каналы, необходимые для оценки атмосферного ослабления. Применяется как на НОС, так и на ГСО.

5.5.18 Движение/дрейф льда

Определение: движение морского ледяного покрова — физическая единица измерения: м/с и градусы или м/с для УФ компонентов — единица неопределенности: м/с и градусы.

Метод 1: ВИД/ИК радиометрия — принцип: измерение излученной радиации в ИК-диапазоне на нескольких дискретных каналах относительно большой полосы пропускания. Движение льда означает скорость и направление дрейфа морского льда. Применяется как на НОС, так и на ГСО.

Метод 2: МКВ радиометрия — принцип: измерение излученной и рассеянной МКВ радиации в атмосферных окнах на среднем диапазоне высоких частот (таких как 37 ГГц, 90 ГГц). Движение льда означает скорость и направление дрейфа морского льда. Применяется только на НОС.

Метод 3: изображения, полученные с помощью РСА — принцип: измерение МКВ излучения обратного рассеяния на частотах 1,3; 5 или 11 ГГц с помощью РСА. Движение льда означает скорость и направление дрейфа морского льда. Применяется только на НОС.

5.6 ПОВЕРХНОСТЬ СУШИ (ВКЛЮЧАЯ СНЕГ)

Этот тематический раздел состоит из переменных, характеризующих поверхность суши, включая растительность, пожары, ледники и снег. В таблице 5.5 перечислены переменные, наблюдаемые из космоса.

Таблица 5.5. Геофизические переменные, рассматриваемые в тематическом разделе «Поверхность суши, включая снег»

Температура поверхности суши	Индекс листовой поверхности	Состояние снега (влажный/сухой)	Топография поверхности суши
Влажность почвы на поверхности	Приведенный разностный индекс растительности	Снежный покров	Ледниковый покров
Влажность почвы (в корнеобитаемом слое почвы)	Долевая часть покрова, охваченная пожаром	Водный эквивалент снега	Топография ледников
Доля поверхности суши, покрытая растительностью	Температура пожара	Тип почвы	
Тип растительности	Энергия излучения от пожара	Почвенно-растительный покров	

Несколько переменных здесь не рассмотрены, в частности, грунтовые воды (учитываются при рассмотрении влажности почвы, снега, ледников и одного вида почвенно-растительного покрова), расход воды в реке (продукция слишком высокого уровня), профиль температуры внутри почвенного слоя (невозможно измерить из космоса), температура поверхности снега и озера, вечная мерзлота (частные случаи наблюдений за температурой поверхности), береговая линия (слишком очевидно), биомасса (слишком обобщенная величина).

5.6.1 Температура поверхности суши

Определение: температура видимой поверхности суши (оголенная почва или растительность) — физическая единица измерения: K — единица неопределенности: K.

Метод 1: ИК радиометрия — принцип: производная от ИК изображений на многих каналах, включая «окна» и другие при необходимости оценить излучательную способность и атмосферное ослабление (на спектральных частотах поглощения водяного пара). Двойной обзор сокращает неопределенность атмосферной поправки. Применяется как на НОС, так и на ГСО.

Метод 2: ИК спектроскопия — принцип: производная от большого количества очень узконаправленных каналов по всему ИК-диапазону спектра, связанных с другими каналами, предоставляющими всю информацию, необходимую для определения атмосферной поправки. Это позволяет оценить излучательную способность. Применяется как на НОС, так и на ГСО.

Метод 3: МКВ радиометрия — принцип: измерение излученной и рассеянной МКВ-радиации в атмосферных окнах в диапазоне малых значений средних частот (таких как 5 ГГц, 10 ГГц, 36 ГГц). Требуется проводить больше поляризационных измерений для поправки на эффекты влажности. Применяется только на НОС.

5.6.2 Влажность почвы на поверхности

Определение: относительное содержание воды в объеме влажной почвы. Поверхностный слой (верхние несколько сантиметров) — физическая единица измерения: $м^3/м^3$ — единица неопределенности: $м^3/м^3$.

Метод 1: МКВ радиометрия — принцип: измерение излученной и рассеянной МКВ радиации в низкочастотном диапазоне (1,4 и 2,7 ГГц, к примеру). Требуется проводить многочисленные поляризационные измерения для поправки на эффект шероховатости. Желательно использовать больше каналов для поправки на температуру. Целесообразно использовать более высокие частоты (5 ГГц, 10 ГГц), особенно для оголенной почвы. Применяется только на НОС.

Метод 2: радиолокационная скаттерометрия — принцип: измерение МКВ-излучения обратного рассеяния на относительно низких частотах (таких как 5 ГГц). Используется множество углов обзора для оценки поправки на неровность рельефа. Применяется только на НОС.

Метод 3: радиолокационные (РСА) изображения — принцип: измерение МКВ-излучения обратного рассеяния на частотах 1,3; 5 или 11 ГГц с помощью РСА. Применяется только на НОС.

Метод 4: ВИД/ИК радиометрия — принцип: возможно использование нескольких индикаторов. Примеры: затухание коэффициента отражения от ВИД/БИК к КВИК диапазону; производная от очевидной тепловой инерции, получаемой путем измерения задержки в повышении температуры суши под воздействием приходящей солнечной радиации (применимо к оголенной почве). Применяется как на НОС, так и на ГСО.

5.6.3 Влажность почвы (в корнеобитаемом слое почвы)

Определение: трехмерное поле относительного содержания воды в объеме влажной почвы в подпочвенном слое. Требуемое измерение в слое от поверхности вглубь почвы до ~3 м — физическая единица измерения: $м^3/м^3$ — единица неопределенности: $м^3/м^3$.

Метод 1: МКВ радиометрия в L-диапазоне — принцип: измерение испускаемой МКВ-радиации в низкочастотном диапазоне (таком как 1,4 ГГц). Требуется проводить многочисленные поляризационные измерения для поправки на эффект шероховатости. Применяется только на НОС.

Метод 2: радиолокационные (РСА) изображения в L-диапазоне — принцип: измерение МКВ излучения обратного рассеяния на низкой частоте (обычно 1,3 ГГц) с помощью радиолокатора с синтезированной апертурой. Можно использовать P-диапазон (~400 МГц) и S-диапазон (~2,7 ГГц). Применяется только на НОС.

5.6.4 Доля поверхности суши, покрытая растительностью

Определение: доля области суши, на которой имеется растительность — физическая единица измерения: % — единица неопределенности: %.

Метод 1: оптические изображения высокого разрешения — принцип: измерение отраженной солнечной радиации в ВИД/БИК/КВИК-диапазонах спектра на нескольких дискретных каналах относительно узкой полосы пропускания (1–5 %). Возможно гиперспектральное (несколько сотен каналов). Применяется на НОС и потенциально на ГСО.

Метод 2: изображения, полученные с помощью РСА — принцип: измерение МКВ-излучения обратного рассеяния на частотах 1,3; 5 или 11 ГГц с помощью РСА. Применяется только на НОС.

5.6.5 Тип растительности

Определение: наблюдаемые виды или семейства растительности. Перечень интересуемых типов растительности определяется заранее — неопределенность выражается числом определенных типов (классов).

Метод 1: оптические изображения высокого разрешения — принцип: измерение отраженной солнечной радиации в ВИД/БИК/КВИК-диапазонах на нескольких дискретных каналах относительно узкой полосы пропускания (1–5 %). Возможно гиперспектральное (несколько сотен каналов). Применяется на НОС и потенциально на ГСО.

Метод 2: изображения, полученные с помощью РСА — принцип: измерение МКВ-излучения обратного рассеяния на частотах 1,3; 5 или 11 ГГц с помощью РСА. Применяется только на НОС.

5.6.6 Индекс листовой поверхности

Определение: половина общей предполагаемой относительной доли области с зелеными листьями в листовом пологе растений в пределах заданной области. Индикатор общей биомассы и здоровья растений — физическая единица измерения: % — единица неопределенности: %.

Метод 1: КВ радиометрия — принцип: измерение рассеянного солнечного излучения на каналах ВИД/БИК и особенно КВИК-диапазонов (до 2,4 мкм). Необходимо измерять на нескольких каналах, относительно узкая полоса пропускания (2–3 %). Применяется как на НОС, так и на ГСО.

Метод 2: радиолокационная скаттерометрия — принцип: измерение излучения обратного рассеяния с помощью скаттерометрии на основе среднечастотного радиолокатора (около 5 или 11 ГГц). Коэффициент отражения калиброванного радиолокатора зависит от проводимости поверхности (связана с биомассой). Применяется только на НОС.

Метод 3: оптические изображения высокого разрешения — принцип: измерение отраженной солнечной радиации в ВИД/БИК/КВИК-диапазонах на нескольких дискретных каналах относительно узкой полосы пропускания (1–5 %). Возможно гиперспектральное (несколько сотен каналов). Применяется на НОС и потенциально на ГСО.

5.6.7 Приведенный разностный индекс растительности

Определение: разница между максимальной (в БИК-диапазоне) и минимальной (в районе «красной» области спектра) отражающей способностью растительности, приведенная к суммированию. Является репрезентативной величиной для общей биомассы и вспомогательной величиной для расчета индекса листовой поверхности, если он не измеряется напрямую — физическая единица измерения: % — единица неопределенности: %.

Метод 1: ВИД/БИК радиометрия — принцип: измерение рассеянной солнечной радиации в ВИД-диапазоне («красная» область спектра, минимальная отражающая способность от растительного покрова) и БИК-диапазоне (обычно 865 нм, высокая отражательная способность). Применяется как на НОС, так и на ГСО.

Метод 2: оптические изображения высокого разрешения — принцип: измерение рассеянной солнечной радиации в ВИД-диапазоне («красная» область спектра, минимальная отражающая способность от растительного покрова) и БИК-диапазоне (обычно 865 нм, высокая отражательная способность). Применяется как на НОС, так и на ГСО.

5.6.8 Долевая часть покрова, охваченная пожаром

Определение: доля области суши, охваченная пожаром — физическая единица измерения: % — единица неопределенности: %.

Метод 1: ВИД/БИК радиометрия — принцип: измерение отраженной солнечной радиации в ВИД/БИК/КВИК-диапазонах или излученной радиации в СВИК/ИК-диапазонах спектра на нескольких дискретных каналах относительно большой полосы пропускания (5–10 %). Долевая часть покрова определяется числом пикселей, классифицированных как «пожар», в заданном массиве пикселей. Применяется как на НОС, так и на ГСО.

Метод 2: оптические изображения высокого разрешения — принцип: измерение отраженной солнечной радиации в ВИД/БИК/КВИК-диапазонах спектра на нескольких дискретных каналах. Целесообразно использовать для оценки нанесенного ущерба после пожара. Высокая разрешающая способность достигается за счет наблюдательного цикла. Применяется только на НОС.

Метод 3: изображения, полученные с помощью РСА — принцип: измерение МКВ излучения обратного рассеяния на частотах 1,3; 5 или 11 ГГц с помощью РСА. Долевая часть покрова определяется числом пикселей, классифицированных как «пожар», в заданном массиве пикселей. Целесообразно использовать для оценки нанесенного ущерба после пожара. Применяется только на НОС.

5.6.9 Температура пожара

Определение: температура пожара в пределах области, охваченной пожаром — физическая единица измерения: К — единица неопределенности: К.

Метод 1: ИК радиометрия — принцип: производная от ИК изображений на ряде каналов в «окнах» обзора. СВИК (3,7 мкм) является самым чувствительным диапазоном спектра. Применяется как на НОС, так и на ГСО.

5.6.10 Энергия излучения от пожара

Определение: энергия, излученная пожаром в пределах области его распространения — физическая единица измерения: кВт · м$^{-2}$ — единица неопределенности: кВт · м$^{-2}$.

Метод 1: ИК радиометрия — принцип: производная от ИК изображений на ряде каналов в «окнах» обзора. СВИК (3,7 мкм) является самым чувствительным диапазоном спектра. Применяется как на НОС, так и на ГСО.

5.6.11 Состояние снега (влажный/сухой)

Определение: двоичная продукция (сухой или тающий снег), выражающая наличие воды в жидкой фазе в слое снега — неопределенность выражена в виде УС и УЛТ при классификации состояния снега как влажного или сухого.

Метод 1: МКВ радиометрия — принцип: измерение излученной или рассеянной МКВ-радиации в атмосферных окнах в диапазоне средних значений высоких частот (таких как 37 ГГц, 90 ГГц). Необходимы многочисленные поляризационные измерения. Поскольку влажный снег можно спутать с почвой, расположенной под этим снегом, необходимо предварительно определять (с помощью маски представления) наличие снега. Применяется только на НОС.

Метод 2: радиолокационные (РСА) изображения — принцип: измерение МКВ излучения обратного рассеяния с помощью РСА на относительно высоких частотах, таких как ~10 ГГц (X-диапазон), возможно ~19 ГГц (K-диапазон), поскольку сухой снег имеет тенденцию быть прозрачным для РСА. Лучше использовать для измерений при смене цикла таяния на цикл замерзания и наоборот. Применяется только на НОС.

5.6.12 Снежный покров

Определение: доля наблюдаемой области суши, покрытая снегом — физическая единица измерения: % — единица неопределенности: %.

Метод 1: ВИД/ИК радиометрия — принцип: измерение отраженной солнечной радиации в ВИД/БИК/КВИК-диапазонах или излученной радиации в СВИК/ИК-диапазонах на нескольких дискретных каналах относительно широкой полосы пропускания (5–10 %). Долевая часть покрова определяется числом пикселей, классифицированных как «снег», в заданном массиве пикселей. В качестве альтернативного метода, можно извлечь информацию по данным об уровне пикселя за счет использования «дефектов» яркости, обусловленных смешением в пикселе наличия/отсутствия снега («эффективный снежный покров»). Применяется как на НОС, так и на ГСО.

Метод 2: МКВ радиометрия — принцип: измерение излученной и рассеянной МКВ радиации в атмосферных окнах в среднем диапазоне высоких частот (таких как 37 ГГц, 90 ГГц). Требуется проводить больше поляризационных измерений. Относительная площадь снежного покрова определяется числом пикселей, классифицированных как «снег», в заданном массиве пикселей. Также определяется состояние поверхности снега (сухой или влажный). Применяется только на НОС.

Метод 3: оптические изображения высокого разрешения — принцип: измерение отраженной солнечной радиации в ВИД/БИК/КВИК-диапазонах на нескольких дискретных каналах. Высокая разрешающая способность достигается за счет наблюдательного цикла. Применяется только на НОС.

5.6.13 **Водный эквивалент снега**

Определение: вертикальная глубина слоя воды, которая была бы получена в результате таяния слоя снега. Глубина слоя снега может быть получена из вспомогательной информации о плотности слоя снега — физическая единица измерения: мм — единица неопределенности: мм.

Метод 1: МКВ радиометрия — принцип: измерение излученной и рассеянной МКВ радиации в атмосферных окнах в среднем диапазоне высоких частот (таких как 37 ГГц, 90 ГГц), предпочтительно измерять, потому что для низкочастотного излучения сухой снег прозрачен. Требуется проводить больше поляризационных измерений. Применяется только на НОС.

Метод 2: Радиолокационная скаттерометрия — принцип: измерение МКВ-излучения обратного рассеяния в диапазоне малых значений средних частот (5 ГГц, 13 ГГц). Предпочтительно использовать более высокую частоту для измерений над сухим снегом. Используются многочисленные углы обзора для определения поправки на эффект шероховатости. Применяется только на НОС.

Метод 3: радиолокационные (РСА) изображения — принцип: измерение МКВ-излучения обратного рассеяния с помощью радиолокатора с синтезированной апертурой на относительно высоких частотах (сухой снег прозрачен для РСА). Оптимально использование частоты ~19 ГГц (Ku-диапазон). Более низкие частоты можно использовать для мониторинга изменений методом интерферометрии. Применяется только на НОС.

5.6.14 **Тип почвы**

Определение: наблюдаемый состав или структура почвы (кислотная, щелочная, крупнокомковатая и т. п.). Перечень интересуемых типов определяется заранее — неопределенность выражается как число дискриминантных типов (классов).

Метод 1: оптические изображения высокого разрешения — принцип: измерение отраженной солнечной радиации в ВИД/БИК/КВИК-диапазонах наблюдений на нескольких дискретных каналах относительно узкой полосы пропускания (1–5 %). Возможно гиперспектральное (несколько сотен каналов). Применяется на НОС и потенциально на ГСО.

Метод 2: радиолокационные (РСА) изображения — принцип: измерение МКВ-излучения обратного рассеяния на частотах 1,3; 5 или 11 ГГц с помощью радиолокатора с синтезированной апертурой. Применяется только на НОС.

5.6.15 **Почвенно-растительный покров**

Определение: наблюдаемое использование земли (городская застройка, культивируемая почва, пустынные почвы и др.). Перечень интересуемых типов использования земли определяется заранее — неопределенность выражается как число определенных типов (классов).

Метод 1: оптические изображения высокого разрешения — принцип: измерение отраженной солнечной радиации в ВИД/БИК/КВИК-диапазонах наблюдений на нескольких дискретных каналах относительно узкой полосы пропускания (1–5 %). Возможно гиперспектральное (несколько сотен каналов). Применяется на НОС и потенциально на ГСО.

Метод 2: радиолокационные (РСА) изображения — принцип: измерение МКВ-излучения обратного рассеяния на частотах 1,3; 5 или 11 ГГц с помощью радиолокатора с синтезированной апертурой. Применяется только на НОС.

5.6.16 Топография поверхности суши

Определение: карта высот поверхности суши — физическая единица измерения: м — единица неопределенности: м.

Метод 1: ВИД стереоскопия высокого разрешения — принцип: измерение отраженной солнечной радиации в ВИД-диапазоне на одном или более каналах относительно узкой полосы пропускания (1–5 %), по крайней мере, с двух направлений обзора, обычно с последовательно расположенных орбит, для того чтобы получить эффект стереоскопии. Применяется только на НОС.

Метод 2: радиолокационная (РСА) интерферометрия — принцип: измерение МКВ-излучения обратного рассеяния на частотах 1,3; 5 или 11 ГГц с помощью РСА. Интерферометрия между изображениями с последовательных орбитальных проходов спутника над районом. Применяется только на НОС.

Метод 3: радиолокационная альтиметрия — принцип: измерение излучения обратного рассеяния от поверхности суши с помощью среднечастотного радиолокатора (предпочтительно использовать двойную частоту, 13 ГГц и 3 ГГц или 5 ГГц). Необходимо использовать пассивную МКВ радиометрию на ассоциированных двух или трех каналах (23 ГГц и 37 ГГц и/или 19 ГГц) для получения поправки на путь луча в тропосфере с учетом водяного пара и обусловленного ионосферой завихрения. Для получения приемлемой разрешающей способности необходима обработка сигнала в направлении движения РСА. Только в режиме наблюдений в надир. Применяется только на НОС.

Метод 4: лидарная альтиметрия — принцип: измерение ВИД/БИК-излучения обратного рассеяния с помощью лидара. Предпочтительно использовать две длины волны, такие как 532 и 1 064 нм. Применяется только на НОС.

5.6.17 Ледниковый покров

Определение: доля области суши, покрытая длительно существующим льдом — физическая единица измерения: % — единица неопределенности: %.

Метод 1: ВИД стереоскопия высокого разрешения — принцип: измерение отраженной солнечной радиации в ВИД/БИК/КВИК-диапазонах спектра на нескольких дискретных каналах относительно узкой полосы пропускания (1–5 %). Применяется на НОС и потенциально на ГСО.

Метод 2: радиолокационные (РСА) изображения — принцип: измерение МКВ-излучения обратного рассеяния на частотах 1,3; 5 или 11 ГГц с помощью РСА. Интерферометрия используется для обнаружения изменений. Применяется только на НОС.

5.6.18 Топография ледников

Определение: карта высот поверхности ледника — физическая единица измерения: см — единица неопределенности: см.

Метод 1: радиолокационная (РСА) интерферометрия — принцип: измерение МКВ-излучения обратного рассеяния на частотах 1,3; 5 или 11 ГГц с помощью РСА. Интерферометрия между изображениями с последовательных орбитальных проходов спутника над районом. Применяется только на НОС.

5.7 ТВЕРДАЯ ОБОЛОЧКА ЗЕМЛИ

Этот тематический раздел состоит из переменных, характеризующих твердую оболочку Земли. В таблице 5.6 перечислены переменные, наблюдаемые из космоса.

Таблица 5.6. Геофизические переменные, рассматриваемые в тематическом разделе «Твердая оболочка Земли»

Геоид	Определение местоположения плит земной коры	Движение земной коры (горизонтальное и вертикальное)	Гравитационное поле	Гравитационные градиенты

5.7.1 Геоид

Определение: уровенная поверхность потенциала силы тяжести (поверхность геоида), которая точно совпала бы с осредненной поверхностью океана Земли, если бы океаны были в равновесии, в состоянии покоя и простирались бы через континенты (так чтобы между ними были очень узкие каналы) — физическая единица измерения: см — единица неопределенности: см.

Метод 1: радиолокационная альтиметрия — принцип: измерение излучения обратного рассеяния от поверхности моря с помощью среднечастотного радиолокатора (предпочтительно использовать двойную частоту, 13 ГГц и 3 ГГц или 5 ГГц). Необходимо использовать пассивную МКВ радиометрию на ассоциированных двух или трех каналах (23 ГГц и 37 ГГц и/или 19 ГГц) для получения поправки на путь луча в тропосфере с учетом водяного пара и обусловленного ионосферой завихрения. Необходимо обеспечить очень стабильные орбиты (относительно большая высота, наклонение орбиты 50°–70° и точно повторяемый цикл). Проводится многоорбитальный анализ, позволяющий отфильтровать кратковременные возмущения от волн, океанских течений и приливов/отливов. Применяется только на НОС.

Метод 2: наблюдение гравитационного поля — принцип: измерение гравитационного поля на высоте орбиты спутника датчиками ускорения, градиометрами, отслеживанием спутника с другого спутника (спаренными спутниками или спутниками ГСОМ). Используются низкоорбитальные спутники, меняющие орбиту во время выполнения задачи полета. Применяется только на НОС.

5.7.2 Определение местоположения плит земной коры

Определение: основа мониторинга эволюции динамики литосферы — физическая единица измерения: см — единица неопределенности: см.

Метод 1: лазерное измерение дальности — принцип: точное измерение расстояние между спутником и землей с помощью наведения на спутник наземного лазера, принимающего свет, отраженный зеркалами из уголков куба, которыми покрыта поверхность спутника. Глобальная сеть позволяет обеспечивать как прецизионную орбитографию, так и определение положения плит земной коры, а также поддерживает станции лазерного измерения дальности. Применяется только на НОС.

Метод 2: приемник ГСОМ — принцип: статистический анализ местоположения приемника ГСОМ наземного базирования, локализированного с помощью группировки навигационных спутников (ГСОМ, ГЛОНАСС, Компасс, Галилео). Применяется только на НОС.

5.7.3 Движение земной коры (горизонтальное и вертикальное)

Определение: изменения в динамике по времени местоположения плит Земли. Свидетельствует о динамике литосферы, поэтому может использоваться для предсказания землетрясения — физическая единица измерения: мм/год — единица неопределенности: мм/год.

Метод 1: лазерное измерение дальности — принцип: анализ изменений местоположения плит земной коры, точно измеренного по расстоянию между спутником и землей с помощью наведения на спутник наземного лазера, принимающего свет, отраженный зеркалами из уголков куба, которыми покрыта поверхность спутника. Глобальная сеть лазерного измерения дальности позволяет проводить такой анализ. Применяется только на НОС.

Метод 2: приемник ГСОМ — принцип: анализ изменения местоположения плиты земной коры, точно измеренного приемниками ГСОМ наземного базирования, локализированными с помощью группировки навигационных спутников (ГСОМ, ГЛОНАСС, Компасс, Галилео). Применяется только на НОС.

5.7.4 Гравитационное поле

Определение: трехмерное поле, фактически измеренное в естественных условиях на высоте орбиты спутника. Свидетельствует о статике и динамике литосферы и мантии Земли — физическая единица измерения: мГал (1 Гал = 0,01 м/с^2, т. е. 1 мГал ≈ 10^{-6} g_0. «Гал» означает Галилео) — единица неопределенности: мГал.

Метод 1: градиентометрия — принцип: измерения с помощью соответствующей сети датчиков ускорения, чувствительных к аномалиям гравитационного поля, пересекаемого спутником во время его движения по орбите. Применяется только на НОС.

Метод 2: отслеживание спутника с другого спутника — принцип: непрерывный мониторинг расстояния между спутниками, расположенными на скоординированных орбитах, с помощью, например, радиолокатора K-диапазона или лидара. Применяется только на НОС.

5.7.5 Гравитационные градиенты

Определение: трехмерное поле, фактически измеренное в естественных условиях на высоте орбиты спутника. Свидетельствует о мельчайших нюансах статики и динамики литосферы и мантии Земли — физическая единица измерения: Э, Этвеш (1 Э = 1 мГал/10 км) — единица неопределенности: Э.

Метод 1: градиентометрия — принцип: измерения с помощью соответствующей сети датчиков ускорения, чувствительных к аномалиям гравитационного поля, пересекаемого спутником во время его движения по орбите. Применяется только на НОС.

Метод 2: отслеживание спутника с другого спутника — принцип: непрерывный мониторинг расстояния между спутниками, расположенными на скоординированных орбитах, с помощью, например, радиолокатора K-диапазона или лидара. Применяется только на НОС.

5.8 ХИМИЧЕСКИЙ СОСТАВ АТМОСФЕРЫ

В этом тематическом разделе рассматриваются вещества, оказывающие воздействие на цикл озона, и/или провоцирующие парниковый эффект и/или влияющие на качество воздуха. В таблице 5.7 перечислены вещества, наблюдаемые из космоса и пока являющиеся предметом регулирования.

Таблица 5.7. Геофизические переменные, рассматриваемые в тематическом разделе «Химический состав атмосферы»

O_3	C_2H_2	CFC–11	CH_2O	ClO	CO	COS	HCl	HNO_3	N_2O_5	NO_2	Пероксиацетил-нитрат	SF_6
BrO	C_2H_6	CFC–12	CH_4	$ClONO_2$	CO_2	H_2O	HDO	N_2O	NO	OH	Явление полярного стратосферного облака	SO_2

Различные космические программы направлены на измерение состава атмосферы, и некоторые из них описаны в главе 3 настоящего тома («Приборы дистанционного зондирования»). В рамках КЕОС перед Виртуальной группировкой для состава атмосферы (ВГ-СА) поставлена задача собрать и предоставить данные для улучшения мониторинга, оценки и прогнозирования изменений озонового слоя, качества воздуха и климатического воздействия, связанных с изменениями в окружающей среде. Это достигается путем координирования существующих и будущих международных космических средств. В частности, речь идет о спутниковых группировках для измерения CO_2 и качества воздуха с ГСО. Веб-страница ВГ-СА КЕОС будет полезна читателям, желающим узнать больше об измерении состава атмосферы из космоса: http://ceos.org/ourwork/virtual-constellations/acc/.

Обратите внимание, что в приложении к этой главе содержится описание всех переменных и требований к ним, а также ссылка на сайт OSCAR, где изложены способы измерения этих переменных.

5.9 КОСМИЧЕСКАЯ ПОГОДА

Этот тематический раздел состоит из переменных, которые характеризуют космическую погоду. Переменные, относящиеся к настоящему разделу, классифицированы ниже на три категории:

a) мониторинг процессов, происходящих на Солнце (таблица 5.8);

b) межпланетное космическое пространство между Солнцем и Землей, подверженное воздействию солнечного ветра (таблица 5.9);

c) околоземное пространство: магнитосфера и ионосфера (таблица 5.10).

Таблица 5.8. Спутниковые наблюдения, относящиеся к мониторингу Солнца

Переменная	*Описание*	*Физическая единица*
Солнечные гамма-лучи, рентгеновские лучи, ЭУФ, УФ, ВИД	Плотность интегрированного потока Спектр потока Отображение потока	$Вт \cdot м^{-2}$ $Вт \cdot м^{-2} \cdot нм^{-1}$ $Вт \cdot м^{-2} \cdot арксеканс^{-2}$
Ca II-K изображение солнца	K-линия Ca-II (393,4 нм)	$Вт \cdot м^{-2} \cdot арксеканс^{-2}$
H-alpha изображение солнца	Водородный alpha переход (656,3 нм)	$Вт \cdot м^{-2} \cdot арксеканс^{-2}$

Переменная	*Описание*	*Физическая единица*
Lyman-alpha изображение солнца	Водородный Lyman-alpha переход (121,6 нм)	Вт·м$^{-2}$·арксеканс$^{-2}$
Солнечный Lyman-alpha поток	Водородный Lyman-alpha переход (121,6 нм)	Вт·м$^{-2}$·нм$^{-1}$
Солнечное магнитное поле	Магнитное поле на поверхности Солнца (фотосфера)	нТл
Спектр солнечных потоков радиоволн	Радиопоток, интегрированный по всему солнечному диску	Вт·м$^{-2}$·Гц$^{-1}$
Изображение солнечных радиопотоков	Радиопоток, полученный от солнечного диска	Вт·м$^{-2}$·Гц$^{-1}$·арксеканс$^{-2}$
Солнечные поля скорости	Трехмерная карта скорости плазмы в фотосфере	м·с$^{-1}$·арксеканс$^{-2}$
Солнечное электрическое поле	Карта электрического поля в фотосфере	мВ·м$^{-1}$·арксеканс$^{-2}$
Изображение солнечной короны	Изображение короны вокруг Солнца	Вт·м$^{-2}$·арксеканс$^{-2}$

Таблица 5.9. Спутниковые наблюдения, относящиеся к межпланетному пространству между Солнцем и Землей и к солнечному ветру

Переменная	*Описание*	*Физическая единица*
Электроны, протоны, нейтроны, альфа-частицы	Плотность интегрированного потока Дифференциальный направленный поток Интегральный направленный поток	частиц·м$^{-2}$·с$^{-1}$ частиц·м$^{-2}$·с$^{-1}$·ср$^{-1}$·эВ$^{-1}$ частиц·м$^{-2}$·с$^{-1}$·ср$^{-1}$
Тяжелые ионы [2(He) < Z ≤ 26(Fe)]	Энергия углового потока и масс-спектр Интегральный направленный поток	частиц·м$^{-2}$·с$^{-1}$·ср$^{-1}$ (МэВ/нуклон)$^{-1}$ частиц·м$^{-2}$·с$^{-1}$·ср$^{-1}$
Космические лучи	Поток нейтронов	нейтронов·м$^{-2}$·с$^{-1}$
Гамма-лучи, рентгеновские лучи, ЭУФ, УФ, ВИД, БИК, КВИК излучение	Поток Спектр потока Изображение неба	Вт·м$^{-2}$ Вт·м$^{-2}$·нм$^{-1}$ Вт·м$^{-2}$·арксеканс$^{-2}$
Радиоволны	Плотность интегрированного потока	Вт·м$^{-2}$·Гц$^{-1}$
Изображение гелиосферы	Изображение среды солнечного ветра	Вт·м$^{-2}$·арксеканс$^{-2}$
Межпланетное магнитное поле	Магнитное поле в солнечном ветре	нТл
Плотность солнечного ветра	Плотность плазмы солнечного ветра	частиц·см$^{-3}$
Температура солнечного ветра	Температура плазмы солнечного ветра	K
Скорость солнечного ветра	Скорость плазмы солнечного ветра	км·с$^{-1}$

Таблица 5.10. Спутниковые наблюдения, характерные для изучения магнитосферы и ионосферы

Переменная	*Описание*	*Физическая единица*
Скорость ионосферной плазмы	Скорость объемной плазмы или электронов, функция высоты	км·с$^{-1}$
Ионосферное мерцание	Случайные флуктуации радиоволн и коэффициента преломления	безразмерная
Общее содержание электронов в ионосфере (ОСЭ)	Количество электронов между двумя точками	TECU
Плотность электронов	Трехмерное распределение плотности электронов в ионосфере	электронов·м$^{-3}$
Магнитное поле	Магнитное поле в околоземном пространстве (в магнитосфере)	нТл
Электрическое поле	Величина и направление электрического поля Земли	мВ·м
Электростатический заряд	Накопленный электирческий заряд на спутниковой платформе	пА·см$^{-2}$
Уровень радиационной дозы	Трехмерное поле мощности дозы излучения заряженных частиц	мЗв·ч$^{-1}$

В следующих разделах приводится некоторые сведения только для нескольких переменных, относящихся к ионосфере и магнитосфере.

5.9.1 Общее содержание электронов в ионосфере

Определение: количество электронов на пути зондирующего луча между двумя точками. Измеряется под разными углами обзора таким образом, чтобы получить вертикальные профили методом томографии. Требуются измерения в ионосфере и плазмосфере — физическая единица измерения: электрон/м^2, практическая единица: TECU = 10^{16} электрон/м^2 — единица неопределенности %.

Метод 1: радиозатменные измерения с помощью ГНСС — принцип: измерение дифференциальной рефракции между двумя частотами (~1,2 и ~1,6 ГГц), передаваемыми навигационным спутником и принимаемыми спутником на НОО во время фазы затмения. Измеряемое содержание электронов интегрируется вдоль пути прохождения луча на меняющихся высотах по касательной. Применяется только на НОС.

Метод 2: радиолокационная альтиметрия — принцип: измерение задержки дифференциальной фазы между сигналами от радиолокационных альтиметров с двойной частотой (~13 ГГц и ~3 ГГц или 5 ГГц). Для получения общего содержания электронов в атмосферном столбе также используется измерение чередования фаз, необходимое, главным образом, для поправки на рабочий диапазон измерения радиолокатора-высотомера. Применяется только на НОС.

Метод 3: задержка по фазе сигнала ГСОМ-НОС — принцип: измерение задержки дифференциальной фазы между сигналами от передатчиков ГСОМ с двойной частотой (~1,2 и ~1,6 ГГц) и приемником на НОС, использующим ГСОМ для навигации. В принципе, подходит любой спутник, оборудованный навигационной системой ГСОМ. Информация относится к изучению верхних слоев ионосферы и плазмосферы, т. е. к слою между высотой расположения на орбите спутника и высотой спутника ГСОМ (~20 000 км). Применяется только на НОС.

5.9.2 **Плотность электронов**

Определение: трехмерное распределение плотности электронов. Требуются измерения в ионосфере и плазмосфере — физическая единица измерения: электроны/м^3 — единица неопределенности %.

Метод 1: радиозатменные измерения с помощью ГНСС — принцип: измерение дифференциальной рефракции между двумя частотами (~1,2 и ~1,6 ГГц), передаваемыми навигационным спутником и принимаемыми спутником на НОО во время фазы затмения. Данные извлекаются с помощью метода томографии общего содержания электронов. Применяется только на НОС.

5.9.3 **Магнитное поле**

Определение: величина и направление магнитного поля Земли. Показатель степени геомагнитного возмущения в магнитосфере, а также в околоземном космическом пространстве. Требуются измерения в магнитосфере — физическая единица измерения: нТл (1 тесла = 104 гаусс) — единица неопределенности нТл.

Метод 1: магнитометрия — принцип: измерение как можно большим числом магнитометров в реальных условиях на орбите по мере движения спутника по орбите. Применяется на спутниках, расположенных на НОО, ГСО и на сильно вытянутой эллиптической орбите.

5.9.4 **Электрическое поле**

Определение: величина и направление электрического поля Земли. Требуются измерения в ионосфере — физическая единица измерения: мВ $\cdot$ м$^{-1}$ — единица неопределенности мВ $\cdot$ м$^{-1}$.

Метод 1: метод дрейфа ионов — принцип: измерение величины и направления приходящего потока ионов. Электрическое поле вычисляется как производная величина от соотношения между электрическим полем, измеренной скоростью дрейфа ионов и измеренной силой магнитного поля. Измерения *in situ* по мере движения спутника по орбите. Применяется на спутниках, расположенных на НОО и на сильно вытянутой эллиптической орбите.

ПРИЛОЖЕНИЕ. ПОТРЕБНОСТИ ПОЛЬЗОВАТЕЛЕЙ В КОСМИЧЕСКИХ НАБЛЮДЕНИЯХ

База данных OSCAR/Потребности является официальным пунктом хранения данных о потребностях в наблюдении физических переменных в поддержку осуществления программ ВМО и совместно спонсируемых программ. Эти требования поддерживаются координаторами, назначаемыми для каждой области применения. База данных служит основой процесса регулярного обзора потребностей (РОП), который контролируется Объединенной экспертной группой по проектированию и эволюции систем наблюдений за Землей (ОЭГ-ПЭСН3) Комиссии ВМО по наблюдениям, инфраструктуре и информационным системам (ИНФКОМ).

Потребности рассматриваются на регулярной основе группами экспертов, назначаемых этими организациями и программами. В ВМО этот процесс осуществляется МПЭГ-ПЭСН и ее назначенными координаторами по каждой из областей применений.

Тематические направления предлагают дополнительный, сквозной взгляд на переменные и требования.

Эта оценка сделана в отношении каждого применяемого принципа дистанционного зондирования для геофизических переменных из восьми следующих тематических разделов:

1) основные атмосферные переменные, наблюдаемые в двух- и трехмерном измерениях (3D и 2D)

2) переменные облаков и атмосферных осадков

3) аэрозоли и радиация

4) океан и морской лед

5) поверхность суши (включая снег)

6) твердая оболочка Земли

7) химический состав атмосферы

8) космическая погода

Потребности выражаются для геофизических переменных с точки зрения шести критериев: неопределенности, горизонтального разрешения, вертикального разрешения, цикла наблюдений, своевременности и стабильности (в соответствующих случаях). Для каждого из этих критериев в таблице указаны три значения, определенных экспертами:

– «пороговое» — минимальное требование, которое должно быть выполнено для того, чтобы данные обеспечивали полезную информацию;

– «целевое» — оптимальное требуемое значение, выше которого дальнейшие улучшения не требуются;

– «перспективное» — промежуточный уровень между пороговым и целевым значением, достижение которого приведет к значительному улучшению в целевом

применении. Перспективное значение можно считать оптимальным требованием с точки зрения соотношения затрат и результатов при планировании или проектировании систем наблюдения.

Термин «неопределенность» характеризует расчетный диапазон ошибок наблюдений по данной переменной с доверительным интервалом 68 % (1σ).

1. Основные атмосферные переменные, наблюдаемые в двух- и трехмерном измерениях (2D и 3D)

ID	*Переменная (ссылка на OSCAR/Потребности)*	*Определение*
13	Температура атмосферного воздуха	Трехмерное поле температуры воздуха в атмосфере.
161	Удельная влажность	Трехмерное поле удельной влажности атмосферы. Удельная влажность представляет собой отношение массы водяного пара к массе влажного воздуха.
179	Ветер (горизонтальный)	Трехмерное поле горизонтального векторного компонента (2D) вектора ветра в 3D. Точность обозначается как векторная ошибка, то есть модуль векторной разницы между наблюденным вектором и фактическим вектором.
183	Ветер как вектор над поверхностью (горизонтальный)	Горизонтальный векторный компонент (2D) трехмерного вектора ветра, обычно измеряемый на высоте 10 м. Точность обозначается как векторная ошибка, то есть модуль векторной разницы между наблюденным вектором и фактическим вектором.
80	Высота верхней границы планетарного пограничного слоя (ППС)	Высота поверхности, разделяющей ППС от свободной атмосферы.
81	Высота тропопаузы	Высота поверхности, разделяющей тропосферу от стратосферы.
164	Температура тропопаузы	Температура воздуха в атмосфере на высоте поверхности, разделяющей тропосферу от стратосферы.

2. Переменные облаков и атмосферных осадков

ID	*Переменная (ссылка на OSCAR/Потребности)*	*Определение*
36	Температура вершины облака	Температура верхней поверхности облака.
35	Высота вершины облака	Высота верхней поверхности облака.
37	Вид облаков	Результат классификации видов облаков — точность выражается как обратная величина от количества классов, так что меньшие цифры соответствуют лучшему результату.
27	Облачный покров	Трехмерное поле части неба, заполненной облаками.
26	Высота нижней границы облаков	Высота нижней поверхности облака.
34	Оптическая глубина облака	Эффективная глубина облака с точки зрения проникновения излучения. $OD = \exp(-K \cdot \Delta z)$, где K — коэффициент затухания ($км^{-1}$), а Δz — вертикальный путь (км) между основанием и вершиной облака.

ID	*Переменная (ссылка на OSCAR/Потребности)*	*Определение*
32	Вода в жидкой фазе в облаке	Трехмерное поле содержания воды в атмосфере в жидкой фазе (выпадающей в виде осадков или не выпадающей).
33	Вода в жидкой фазе в облаке (общее содержание в столбе)	Двумерное поле содержания воды в атмосфере в жидкой фазе (выпадающей в виде осадков или не выпадающей), интегрированное в целом по столбу.
28	Эффективный радиус капель воды в облаке	Распределение размеров капель жидкой воды, слившихся в сферы того же объема. Рассматриваются в виде как трехмерного поля на протяжении всей тропосферы, так и двухмерного поля на верхней границе облачной поверхности.
29	Лед в облаке	Трехмерное поле содержания воды в атмосфере в твердой фазе (выпадающей в виде осадков или не выпадающей).
31	Эффективный радиус льда в облаке	Распределение размеров ледяных частиц, ассимилированных в сферы такого же объема. Рассматриваются в виде как трехмерного поля на протяжении всей тропосферы, так и двухмерного поля на верхней границе облачной поверхности.
67	Высота нулевой изотермы в облаке	Высота расположения атмосферного слоя в облаке, на которой происходит трансформация воды из жидкой в твердую фазу и наоборот.
101	Толщина слоя таяния льда в облачности	Толщина атмосферного слоя в облаке, в котором происходит трансформация воды из жидкой в твердую фазу и наоборот.
127	Атмосферные осадки (в жидкой или твердой фазе)	Трехмерное поле распределения вертикальных потоков выпадающей водяной массы (интенсивность осадков).
128	Интенсивность осадков на поверхности (в жидкой или твердой фазе)	Интенсивность атмосферных осадков, достигающих поверхности земли — физическая единица измерения: (мм/ч) (если осадки в твердой фазе, то мм/ч воды, образовавшейся после таяния) — единица точности: (мм/ч). Поскольку точность меняется с изменением интенсивности, необходимо уточнить контрольное значение интенсивности. Предполагаемая интенсивность: 5 мм/ч.
1	Суммарные осадки (за 24 часа)	Интегрирование интенсивности атмосферных осадков, достигающих поверхности земли за несколько временных интервалов. Базовым требованием является интеграция за 24 часа.
302	Обнаружение молний (совокупная плотность молний)	Общее количество обнаруженных вспышек в соответствующем временном интервале и на единицу площади. Пространственная единица (квадрат сетки) должна быть равна горизонтальному разрешению, а время накопления — циклу наблюдения.
303	Обнаружение молний (плотность молний от облаков до земли)	Количество обнаруженных вспышек от облаков до земли в соответствующем временном интервале и на единицу площади. Пространственная единица (квадрат сетки) должна быть равна горизонтальному разрешению, а время накопления — циклу наблюдения.

3. Аэрозоли и радиация

ID	*Переменная (ссылка на OSCAR/Потребности)*	*Определение*
6	Оптическая плотность аэрозоля (ОПА)	ОПА — это эффективная плотность столба аэрозолей в атмосфере с точки зрения проникновения излучения: интеграл вертикального столба спектрального коэффициента затухания аэрозоля ОПА = exp(-$K \cdot \Delta z$), где K — коэффициент затухания (км$^{-1}$), а Δz — вертикальный путь (км).
208	Концентрация аэрозольной пыли	Трехмерное поле частиц аэрозоля среднего размера, определяемое как отношение третьего и четвертого моментов номерного распределения размеров аэрозольных частиц. Требуется измерение в тропосфере (ограничение по высоте: 12 км) и получение осредненного значения по всему атмосферному столбу
3	Эффективный радиус аэрозоля	Выбор аэрозоля, лучше всего соответствующего набору входных данных (наблюдаемых или смоделированных), из заранее определенного набора классов. В заранее определенном наборе классов аэрозолей указаны характеристики состава частиц, состояние смешения, комплексный показатель преломления и форма в зависимости от размера частиц. Определение типа аэрозоля включает характеристики всех классов, а также алгоритм, который используется для выбора наилучшего соответствия входным данным.
9	Тип аэрозоля	Выбор аэрозоля, лучше всего соответствующего набору входных данных (наблюдаемых или смоделированных), из заранее определенного набора классов. В заранее определенном наборе классов аэрозолей указаны характеристики состава частиц, состояние смешения, комплексный показатель преломления и форма в зависимости от размера частиц. Определение типа аэрозоля включает характеристики всех классов, а также алгоритм, который используется для выбора наилучшего соответствия входным данным.
173	Аэрозольный вулканический пепел	Трехмерное поле отношений концентраций компонентов смеси вулканического пепла.
174	Аэрозольный вулканический пепел (общее содержание в столбе)	Двумерное поле массы вулканического пепла, интегрированное по столбу в целом.
51	Нисходящий поток коротковолнового (КВ) излучения на ВГА	Плотность потока солнечного излучения на верхней границе атмосферы.
168	Восходящий поток спектральной плотности излучения на ВГА	Мощность восходящего излучения, измеренная в верхней части атмосферы на единицу площади, на телесный угол и на интервал длины волны. Спектральный диапазон 0,2–200 мкм. Разрешающая способность $\lambda/\Delta\lambda$ = 1 000. Точность указывается как С/Ш (отношение сигнал/шум) (фактически используется С/Ш$^{-1}$, так что меньшая цифра означает лучший результат, как обычно).
169	Восходящий поток длинноволнового (ДВ) излучения на ВГА	Плотность потока земного излучения, испускаемого земной поверхностью и атмосферными газами, аэрозолями и облаками на верхней границе атмосферы.
167	Восходящий поток коротковолнового (КВ) излучения на ВГА	Плотность потока солнечного излучения, отраженного земной поверхностью и атмосферой, излучаемого в космос на верхней границе атмосферы.
141	Отражение коротковолнового излучения от облаков	Отражение солнечного излучения от облаков.

ID	*Переменная (ссылка на ОСКАР/Потребности)*	*Определение*
52	Нисходящий поток длинноволнового (ДВ) излучения на поверхности Земли	Плотность потока излучения, испускаемого атмосферными газами, аэрозолями и облаками на поверхность Земли.
50	Нисходящий поток коротковолнового (КВ) излучения на поверхности Земли	Плотность потока солнечного излучения на поверхности Земли.
54	Альбедо поверхности Земли	Интегрированное в масштабе полушария отражение излучения от поверхности Земли в диапазоне 0,4–0,7.
55	Двунаправленное отражение коротковолнового (КВ) излучения от поверхности Земли	Отражение от поверхности Земли как функция угла обзора и условий освещенности в диапазоне 0,4–0,7. Распределение этой переменной представлено двулучевой функцией отражательной способности (ДФОС).
170	Восходящий поток длинноволнового (ДВ) излучения на поверхности Земли	Плотность потока земного излучения, исходящего от поверхности Земли.
100	Длинноволновое излучение поверхности Земли	Излучательная способность поверхности Земли в тепловом ИК-диапазоне как функция длины волны.
126	Активная радиация фотосинтеза (АРФ)	Поток нисходящих фотонов с длиной волны 0,4-0,7.
65	Доля поглощаемой активной радиации фотосинтеза (ДПАРФ)	Доля АРФ, поглощаемая растительностью (наземной или морской) для осуществления процессов фотосинтеза (обычно вблизи частот «красного» участка спектра).

4. Океан и морской лед

ID	*Переменная (ссылка на ОСКАР/Потребности)*	*Определение*
110	Концентрация хлорофилла в океане	Индикатор живой биомассы фитопланктона, получаемый из наблюдений за цветностью океана. Неопределенность выражается в мг/м^3 для заданной концентрации 1 мг/м^3.
42	Цветность растворенных органических веществ (ЦРОВ)	Оптически измеряемый компонент растворенного органического вещества в воде.
117	Концентрация взвешенных наносов в океане	Значение переменной получают из наблюдений за цветностью океана. Показывает речной сток, наносы или загрязнения веществами небиологического происхождения. Неопределенность выражается в г/м^3 при заданной концентрации (например, 2 г/м^3).
111	Коэффициент диффузионного ослабления в океане	Индикатор мутности воды и вертикальных процессов в океане, значение получают из наблюдений за цветностью океана.
121	Площадь нефтяных разливов	Доля района океана, загрязненная углеводородами, случайно или преднамеренно сбрасываемыми с судов или морских платформ.

ID	*Переменная (ссылка на OSCAR/Потребности)*	*Определение*
134	Температура поверхности моря	Температура морской воды на поверхности. «Среднемассовая» температура относится к слою воды до глубины обычно 2 м от поверхности, температура «поверхностной пленки океана» относится к верхнему слою воды толщиной 1 мм.
133	Соленость поверхности моря	Соленость морской воды в поверхностном слое (верхний ~ 1 м при наблюдении в МКВ). Для районов открытого океана правильно использовать термин «хлорeность» для того, чтобы указать на разнообразие присутствующих солей.
112	Динамическая карта поверхности океана	Отклонение уровня моря от геоида в результате воздействия океанских течений (после внесения поправок на воздействие прилива/отлива и атмосферного давления) — физическая единица измерения: см — единица точности: см.
40	Уровень моря в прибрежных районах (приливы и отливы)	Отклонение уровня моря от местного нулевого уровня в прибрежной зоне в результате воздействия местных течений и приливов/отливов (астрономического и ветрового происхождения).
142	Высота значительных волн	Средняя амплитуда 30 самых высоких из 100 волн.
48	Преимущественное направление волн	Одна из особенностей спектральной характеристики океанских волн. Это направление волны с самой большой энергией в спектре — физическая единица измерения: градусы — единица точности: градусы.
49	Преимущественный период волн	Период волны с самой большой энергией в спектре океанских волн.
176	Частотный спектр направленной энергии волн	Двухмерная переменная, иначе называемая «волновой спектр». Описывает энергию волн, распространяющуюся в каждом направлении и частотном диапазоне (например, 24 различных азимутальных сектора, каждый шириной в 15°, и 25 частотных диапазонов).
135	Морской ледовый покров	Часть площади океана, на которой имеется лед.
138	Толщина морского льда	Толщина ледового покрова. Она относится к высоте поверхности морского льда над уровнем моря и к плотности льда
139	Вид морского льда	Переменная, объединяющая несколько факторов (возраст, неровность рельефа, плотность и т. д.) — точность выражается в количестве классов. Фактически используются классы$^{-1}$, так что меньшее значение, как обычно, соответствует лучшему результату.

5. Поверхность суши (включая снег)

ID	*Переменная (ссылка на OSCAR/Потребности)*	*Определение*
96	Температура поверхности суши	Температура видимой поверхности суши (оголенная почва или растительность) — физическая единица измерения: K — единица точности: K.
149	Влажность почвы на поверхности	Относительное содержание воды в объеме влажной почвы. Поверхностный слой (верхние несколько сантиметров).
148	Влажность почвы (в корнеобитаемом слое почвы)	Трехмерное поле относительного содержания воды в объеме влажной почвы в подпочвенном слое. Требуемое измерение в слое от поверхности вглубь почвы до ~3 м.

ID	*Переменная (ссылка на ОСКАР/Потребности)*	*Определение*
66	Доля поверхности суши, покрытая растительностью	Доля области суши, на которой имеется растительность.
172	Тип растительности	Результат классификации различных типов растительности в пределах области, покрытой растительностью — точность выражается как обратная величина от количества классов, так что меньшие цифры соответствуют лучшему результату.
98	Индекс листовой поверхности (ИЛП)	ИЛП — это общая односторонняя площадь фотосинтезирующих тканей на единицу площади поверхности земли.
107	Приведенный разностный индекс растительности (ПРИР)	Разница между максимальной (в БИК-диапазоне) и минимальной (в районе «красной» области спектра) отражающей способностью растительности, приведенная к суммированию. Является репрезентативной величиной для общей биомассы и вспомогательной величиной для расчета ИЛП, если он не измеряется напрямую.
60	Долевая часть покрова, охваченная пожаром	Доля области суши, охваченная пожаром.
62	Температура пожара	Температура пожара, происходящего в пределах определенной площади.
61	Энергия излучения от пожара	Энергия, излучаемая пожаром, происходящим в пределах определенной площади.
144	Состояние снега (влажный/сухой)	Двоичная продукция (сухой или тающий снег), выражающая наличие воды в жидкой фазе в слое снега — точность выражена в виде ударной скорости (УС) и уровня ложной тревоги (УЛТ).
143	Снежный покров	Часть данной площади, которая покрыта снегом.
145	Водный эквивалент снега	Вертикальная высота воды, которая была бы получена в результате таяния снежного слоя. Связана с высотой снега через плотность снежного слоя.
150	Тип почвы	Результат классификации различных типов почвы в пределах района - точность выражается как обратная величина от количества классов, так что меньшие цифры соответствуют лучшим характеристикам.
95	Земной покров	Обработка данных на основе снимков земной поверхности путем отнесения выявленного(ых) кластера(ов) в пределах заданной области к определенным классам объектов - точность выражается как количество классов. Фактически используются классы$^{-1}$, так что меньшее значение, как обычно, соответствует лучшему результату.
97	Топография поверхности суши	Карта высот поверхности суши — физическая единица измерения: м — единица точности: м.
69	Ледниковый покров	Доля области суши, покрытая многолетним льдом.
71	Топография ледников	Карта высот поверхности ледника.

6. Твердая оболочка Земли

ID	*Переменная (ссылка на OSCAR/Потребности)*	*Определение*
68	Геоид	Уровенная поверхность потенциала силы тяжести (поверхность геоида), которая точно совпала бы с осредненной поверхностью океана Земли, если бы океаны были в равновесии, в состоянии покоя и простирались бы через континенты (так чтобы между ними были очень узкие каналы) — физическая единица измерения: см — единица точности: см.
46	Определение местоположения плит земной коры	Основа мониторинга эволюции динамики литосферы — физическая единица измерения: см — единица точности: см.
45	Движение земной коры (горизонтальное и вертикальное)	Изменения в динамике по времени местоположения и высоты плит Земли. Свидетельствует о динамике литосферы, поэтому может использоваться для предсказания землетрясения — физическая единица измерения: мм/год — единица точности: мм/год.
72	Гравитационное поле	Свидетельствует о статике и динамике литосферы и мантии Земли — физическая единица измерения: мГал, где 1 Гал = 0,01 м/с^2.
73	Гравитационные градиенты	Градиент гравитационного поля Земли, измеренный на высоте орбиты спутника — физическая единица измерения: Э , Этвеш (1 Э = 1 мГал/10 км) — единица точности: Э.

7. Химический состав атмосферы

ID	*Переменная (ссылка на OSCAR/Потребности)*	*Определение*
108	Количество фракции вещества O_3	Трехмерное поле мольной доли O_3 (озона).
109	Общее содержание O_3 в столбе	Двумерное поле озона, интегрированное по столбу в целом.
16	BrO	Трехмерное поле мольной доли BrO = моноксида брома.
17	C_2H_2	Трехмерное поле мольной доли C_2H_2 = ацетилена в сухом воздухе.
18	C_2H_6	Трехмерное поле мольной доли C_2H_6 = этана в сухом воздухе.
19	ХФУ-11	Трехмерное поле мольной доли ХФУ-11 = трихлорфторметана = Фреона-11 в сухом воздухе — физическая единица: моль/моль.
20	ХФУ-12	Трехмерное поле мольной доли ХФУ-12 = дихлорфторметана = Фреона-12 в сухом воздухе.
21	Количество фракции веществ HCHO (CH_2O)	Трехмерное поле мольной доли HCHO (CH_2O) = формальдегида в сухом воздухе.
22	Общее содержание HCHO (CH_2O) в столбе	Двумерное поле концентрации CH_2O = HCHO = формальдегида, интегрированное по всему атмосферному столбу.
23	Количество фракции веществ CH4	Трехмерное поле мольной доли CH_4 (метана) в сухом воздухе. Примечание: неопределенность здесь подразумевается как совместимость.
315	Общее содержание CH_4 в столбе	Двумерное поле усредненного по столбу количества CH_4 (метана) (выраженного в молях), поделенного на общее количество всех компонентов в сухом воздухе (также выраженное в молях).
318	(13)CH_4 дельта	Трехмерное поле дельта C-13 в CH_4 (метане) (изотопный состав).

ID	*Переменная (ссылка на ОСКАР/Потребности)*	*Определение*
319	(14)CH_4 дельта	Трехмерное поле дельта C-14 в CH_4 (метане) (изотопный состав).
320	CH_3D дельта	Трехмерное поле дельта дейтерия (H-2) в CH_4 (метане) (изотопный состав).
340	Содержание CH_4 в тропосферном столбе	Двумерное поле усредненного по тропосферному столбу количества CH_4 (выраженного в молях), поделенного на общее количество всех компонентов в сухом воздухе (также выраженное в молях).
346	Количество CH_4 в доле вещества (фоновое (ФОН))	Трехмерное поле количества фонового (ФОН) CH_4 (метана) (выраженного в молях), разделенного на общее количество всех составляющих в сухом воздухе (также выраженное в молях).
347	Количество CH_4 в доле вещества (область источника (ОИ))	Трехмерное поле количества CH_4 (метана) в области источника (выраженного в молях), разделенного на общее количество всех составляющих в сухом воздухе (также выраженное в молях).
24	Окись хлора (ClO)	Трехмерное поле мольной доли ClO = моноксид хлора = гипохлорит.
25	Нитрат хлора ($ClONO_2$)	Трехмерное поле мольной доли $ClONO_2$ = нитрат хлора.
38	Количество фракции вещества CO	Трехмерное поле мольной доли CO (моноксида углерода) в сухом воздухе. Примечание: неопределенность здесь подразумевается как совместимость.
329	Общее содержание CO в столбе	Двумерное поле общего количества молекул CO (моноксида углерода) на единицу площади в атмосфере от поверхности до верхней границы атмосферы.
343	Количество фракции вещества CO	Двумерное поле усредненного по тропосферному столбу количества CO (выраженного в молях), поделенного на общее количество всех компонентов в сухом воздухе (также выраженное в молях).
123	Парциальное давление CO_2 (pCO_2)	Парциальное давление диоксида углерода на поверхности моря.
185	Поток CO_2	Поток диоксида углерода с поверхности в атмосферу.
314	Общее содержание CO_2 в столбе	Двумерное поле усредненного по столбу количества CO_2 (выраженного в молях), поделенного на общее количество всех компонентов в сухом воздухе (также выраженное в молях).
316	C-14 в CO_2 ($C(14)CO_2$ дельта)	Трехмерное поле дельта C-14 в CO_2 (диоксид углерода) (изотопный состав).
332	C-13 в CO_2 ($C(13)CO_2$ дельта)	Трехмерное поле дельта C-13 в CO_2 (диоксид углерода) (изотопный состав).
317	O-18 в CO_2 ($O(18)CO_2$ дельта)	Трехмерное поле дельта O-18 в CO_2 (диоксид углерода) (изотопный состав).
326	O-17 в CO_2 ($O(17)CO_2$ дельта)	Трехмерное поле дельта O-17 в CO_2 (диоксид углерода) (изотопный состав).
337	Содержание CO_2 в тропосферном столбе	Двумерное поле усредненного по тропосферному столбу количества CO_2 (выраженного в молях), поделенного на общее количество всех компонентов в сухом воздухе (также выраженное в молях).
39	Количество фракции вещества CO_2	Трехмерное поле мольной доли CO_2 (диоксида углерода) в сухом воздухе. Примечание: неопределенность здесь подразумевается как совместимость.

ID	*Переменная (ссылка на ОСКАР/Потребности)*	*Определение*
338	Количество CO_2 в доле вещества (область источника (ОИ))	Трехмерное поле усредненного по атмосферному столбу количества CO_2 (диоксид углерода) в области источника (выраженного в молях), разделенного на общее количество всех составляющих в сухом воздухе (также выраженное в молях).
339	Количество CO_2 в доле вещества (фоновое (ФОН))	Трехмерное поле усредненного по атмосферному столбу фонового (ФОН) количества CO_2 (диоксид углерода) (выраженного в молях), разделенного на общее количество всех составляющих в сухом воздухе (также выраженное в молях).
43	Сероксид углерода (COS)	Трехмерное поле мольной доли COS = сероксида углерода.
76	Водяной пар	Трехмерное поле мольной доли H_2O = воды (рассматривается как химическое вещество, значимое для химического состава атмосферы).
77	Хлороводород (HCl)	Трехмерное поле мольной доли HCl = хлороводорода.
78	HDO (полутяжелая вода)	Трехмерное поле мольной доли HDO = водяной пар (с одним атомом водорода, замещенным его изотопом дейтерием).
84	Азотная кислота (HNO_3)	Трехмерное поле мольной доли HNO_3 (азотной кислоты).
102	Закись азота (N_2O)	Трехмерное поле мольной доли N_2O = закиси азота в сухом воздухе.
324	Дельта N-15 в N_2O (N(15)NO дельта)	Трехмерное поле дельта N-15 в N_2O (закись азота) (изотопный состав).
325	Дельта O-18 в N_2O (N_2O(18) дельта)	Трехмерное поле дельта O-18 в N_2O (закись азота) (изотопный состав).
333	N(15)NO-альфа дельта	Трехмерное поле дельта N-15 в альфа-N_2O (закись азота, где внешний атом азота — это N-15) (изотопный состав).
334	N(15)NO-бета дельта	Трехмерное поле дельта N-15 в бета-N_2O (закись азота, где средний атом азота — это N-15) (изотопный состав).
351	Количество фракции вещества N_2O_5	Трехмерное поле количества N_2O_5 (выраженного в молях), разделенного на общее количество всех составляющих в сухом воздухе (также выраженное в молях).
104	Количество фракции вещества NO	Трехмерное поле мольной доли HO (окись азота).
106	Общее содержание NO_2 в столбе	Двумерное поле NO_2 (двуокиси азота), интегрированное по столбу в целом.
342	Содержание NO_2 в тропосферном столбе	Двумерное поле усредненного по тропосферному столбу количества NO_2 (выраженного в молях), поделенного на общее количество всех компонентов в сухом воздухе (также выраженное в молях).
105	Количество фракции вещества NO_2	Трехмерное поле мольной доли NO_2 (двуокиси азота).
348	Количество NO_2 в доле вещества (фоновое (ФОН))	Трехмерное поле количества фонового (ФОН) NO_2 (выраженного в молях), разделенного на общее количество всех составляющих в сухом воздухе (также выраженное в молях).
349	Количество NO_2 в доле вещества (область источника (ОИ))	Трехмерное поле количества NO_2 (выраженного в молях) в области источника (ОИ), разделенного на общее количество всех составляющих в сухом воздухе (также выраженное в молях).
120	Количество фракции вещества OH	Трехмерное поле количества OH (гидроксильный радикал).

ID	*Переменная (ссылка на OSCAR/Потребности)*	*Определение*
140	Гексафторид серы (SF_6)	Трехмерное поле мольной доли SF_6 = гексафторида серы в сухом воздухе. Примечание: неопределенность здесь подразумевается как совместимость.
147	Общее содержание SO_2 в столбе	Двумерное поле SO_2 (гексафторида серы), интегрированное по столбу в целом.
146	Количество фракции вещества SO_2	Трехмерное поле мольной доли SO_2 (двуокись серы).

8. Космическая погода

ID	*Переменная (ссылка на OSCAR/Потребности)*	*Определение*
594	Общее содержание электронов в ионосфере (ОСЭ) по вертикали	Число электронов между двумя точками.
591	Скорость ионосферной плазмы	Скорость объемного плазмона и электронов (в зависимости от метода измерения) как функция высоты в ионосфере.
593	Ионосферное мерцание	Случайные флуктуации радиоволн в результате мелкомасштабных вариаций плотности ионосферных электронов в пространстве и времени.
592	Поглощение радиосигнала в ионосфере	Ослабление радиоволн, проходящих через нижние слои ионосферы.
Нет	Плотность электронов	Трехмерное поле плотности электронов в ионосфере.
Нет	Плотность потока электронов	Плотность потока электронов низкой, средней и высокой энергии из магнитосферы, радиационных поясов или межпланетного пространства.
739	Дифференцированный направленный поток электронов	Энергетический спектр плотности потока электронов низкой, средней и высокой энергии из магнитосферы, радиационных поясов или межпланетного пространства, на единицу телесного угла.
740	Дифференциальный направленный поток протонов	Спектр энергетической плотности потока протонов низкой, средней и высокой энергии из магнитосферы, радиационных поясов или межпланетного пространства, на единицу телесного угла.
598	Магнитное поле Солнца	Векторное магнитное поле (одно- и трехмерное) на поверхности Солнца (фотосфера/хромосфера).
603	Поток солнечного ЭУФ	Интегрированный поток экстремального ультрафиолетового излучения (ЭУФ) над солнечным диском.
600	Поток солнечного рентгеновского излучения	Интегрированный по солнечному диску поток рентгеновского излучения.
609	Геомагнитное поле	Величина и направление трехмерного магнитного поля на поверхности Земли и в пределах магнитосферы (то есть на НОО и ГСО).

ID	*Переменная (ссылка на ОСКАР/Потребности)*	*Определение*
613	Межпланетное магнитное поле	Векторное магнитное поле (трехмерное) в солнечном ветре. Система отсчета является картезианской или цилиндрической с многочисленными различными ориентациями осей. Имеет важное значение в космической погоде для мониторинга магнитных возмущений в околоземном пространстве.
590	Электрическое поле	Величина и направление электрического поля Земли.
Нет	foEs	Наивысшая обычная частота волны, отражаемой обратно от спорадического слоя E и наблюдаемой при помощи ионозонда.
581	foF2	Критическая частота слоя F2 ионосферы. Эта критическая частота (f, в МГц) ассоциирует с плотностью электронов (Ne, в $см^{-3}$): $f = 9 \cdot 10^{-3} \cdot sqrt(Ne)$.
582	h'F	Вертикальная высота нижней границы ионосферного слоя F.
583	hmF2	Высота пиковой плотности в ионосферном слое F2.
589	Рассеяние F	Вертикальная толщина высокоструктурированной плотности ионов в области F ионосферы.
611	Изображение гелиосферы	Изображение межпланетарного пространства между Солнцем и Землей.
588	Изображение Солнца в K-линии Ca II	Изображение Солнца в K-линии Ca-II (393,4 нм).
599	Изображение солнечного ЭУФ	Изображения Солнца в крайнем ультрафиолетовом (ЭУФ) диапазоне волн для выявления таких особенностей, как нити, активные области и корональные дыры.
601	Изображение Солнца в диапазоне H-альфа	Изображение Солнца на длине волны (656,3 нм) линии водорода H-альфа.
602	Изображение белого солнечного света	Изображение Солнца в белом свете.
605	Изображение солнечного рентгеновского излучения	Изображение Солнца в длинах волн в рентгеновском диапазоне.
609	Коронаграфическое изображение Солнца	Изображение солнечной короны вокруг Солнца.
615	Общее содержание электронов в ионосфере (ОСЭ) по вертикали	Число электронов между двумя точками.

ГЛАВА 6. КАЛИБРОВКА И ВАЛИДАЦИЯ

6.1 КАЛИБРОВКА ПРИБОРА

6.1.1 Введение и обзор

Калибровкой называется процесс количественного определения отклика спутникового прибора на известный, управляемый входной сигнал (например, Ohring, 2007). Калибровочная информация содержится в калибровочной формуле или калибровочных коэффициентах, которые затем используются для преобразования выходного сигнала прибора (к примеру, «число интервалов дискретизации измеряемого сигнала») в физические единицы (например, значение интенсивности излучения $Вт \cdot м^{-2} \cdot ср^{-1}$). Калибровка прибора очень важна для обработки количественных данных, особенно для получения продукции. Для комбинирования данных, полученных с помощью различных приборов, также необходима соответствующая калибровка, что позволяет обеспечить сопоставимость данных. Для климатических применений требование в отношении проведения тщательной калибровки является особенно жестким, поскольку выявление незначительных трендов за продолжительные периоды требует возможности сравнения различных приборов, установленных в разное время на разных спутниковых системах. Построение однородных рядов климатических данных зависит от стабильной калибровки и характеристик неопределенности.

Обычно следует рассматривать пять областей, в которых снимают характеристики: радиометрическая, калибровочная и спектральная, пространственная, временная и поляризационная характеризация. Исчерпывающий протокол калибровки должен включать оценки неопределенности в параметрах калибровки. Калибровка спутникового прибора должна учитывать этапы жизни прибора. На практике это означает, что необходимо учитывать соответствующие изменения (например, временные изменения характеристик датчика) (Ohring, 2007). В последних обзорных статьях, посвященных вопросам калибровки спутников, поясняются ключевые аспекты калибровки и взаимной калибровки спутников. В работе Zhou et al. (2015) довольно подробно рассматриваются вопросы калибровки солнечных каналов спутниковых приборов. Работа Chander et al. (2013) содержит объяснение того, почему необходимо проводить взаимную калибровку спутников, и знакомит читателя со всеми соответствующими аспектами и предостережениями, касающимися калибровки спутников. В этой статье также приводится всеобъемлющий список литературы по нижеописанным методам взаимной калибровки и косвенной калибровки спутников. Более подробная информация представлена в работах Doelling et al. (2004), Goldberg et al. (2011) и Meirink et al. (2013).

В давно сложившемся методе калибровки используются хорошо изученные стабильные цели на Земле; луна является резервным вариантом, когда спутниковый прибор нельзя напрямую сравнить с согласованным образцовым эталоном, например из-за отсутствия на борту надежного калибровочного устройства. Это типичный случай для большинства коротковолновых наблюдений с оперативных метеорологических спутников (например, Govaerts et al., 2004). Такие методы обычно называют «косвенной калибровкой», что означает, что они используются вместо непосредственной калибровки с помощью хорошо известного источника излучения.

Концепция взаимной калибровки спутников существует в спутниковом сообществе довольно давно. В принципе, калибровка представляет собой сравнение с другим прибором, который находится выше по иерархии, чем калибруемый прибор, и ближе к СИ или ближе к стандарту СИ в цепочке прослеживаемости. При сравнении приборов, занимающих одинаковое положение в этой иерархии, мы используем термин сравнение, или взаимное сравнение для проведения взаимной оценки между набором приборов. Такие (взаимные) сравнения устанавливают различия между приборами, а не погрешности конкретного прибора, как в случае калибровки. В метрологии взаимные различия и ошибки имеют разные значения (см. JCGM 200, 2012).

Поскольку при использовании космических систем наблюдения возникают особые трудности при калибровке, часто применяется взаимная калибровка (определение и объяснение которой дается в этой главе). Взаимная калибровка приборов с общим эталонным прибором позволяет достичь совместимости результатов космических измерений в заданной точке по времени. Калибровка по абсолютному стандарту необходима для оценки ошибок и однозначного обнаружения любого долгосрочного смещения во времени, что существенно важно для мониторинга климата (Wielicki et al., 2013). Однако калибровка по абсолютному стандарту и прямому эквиваленту в единицах СИ часто не представляется возможной, когда прибор находится в космосе, и требуется альтернативный метод.

В качестве одного из первых примеров можно привести Международный проект по спутниковой климатологии облаков (ИСККП), в рамках которого использовался прибор AVHRR на спутниках НУОА в качестве псевдоэталонного стандарта, поскольку тепловые ИК-каналы в окнах AVHRR имели встроенную функцию калибровки по абсолютно черному телу. Оценочная общая неопределенность в калибровке излучения AVHRR составляла 5 %-10 % для видимого диапазона и около 2 %-3 % для инфракрасного диапазона или 1,5-2,5 K при яркостной температуре 300 K (Rossow et al. 1996), а приборы на других спутниках сравнивались с AVHRR. Поскольку подобная система не является ни настоящей калибровкой, ни классическим взаимным сравнением, был введен термин взаимная калибровка.

Другим примером является первая попытка систематического сопоставления тепловых ИК-каналов геостационарных метеорологических спутников (Menzel et al., 1993), в ходе которой проводилось взаимное сравнение европейских спутников Meteosat и американских спутников ГОЕС. В рамках КГМС международное участие в этом процессе было расширено, и в результате была создана Глобальная космическая система взаимных калибровок (ГСИКС) (Goldberg et al., 2011).

Наконец, главные центры численных прогнозов погоды (ЧПП) могут также оказывать помощь в определении соответствующих систематических погрешностей сравниваемых приборов путем сопоставления в системах усвоения данных смоделированных и наблюденных спутниковых данных об интенсивности излучения. Вместе с тем, невозможно определить абсолютные смещения с излучениями, рассчитанными по полям моделей ЧПП, поскольку модели имеют свои собственные смещения.

На веб-сайте Интегрированной системы калибровки и валидации, посвященном долгосрочному мониторингу со спутников, объясняются способы использования всех этих инструментов (https://www.star.nesdis.noaa.gov/icvs/)

Ряды данных наблюдений, полученных в прошлом с помощью приборов предыдущих поколений, могут быть фактически вновь откалиброваны, если станет доступной дополнительная информация о состоянии этих приборов и будут разработаны новые способы проведения взаимной калибровки. В работе John et al. (2019) демонстрируется повторная калибровка геостационарных изображений с использованием калиброванных наблюдений за излучением с помощью HIRS (инфракрасного датчика с высокой разрешающей способностью) и гиперспектральных датчиков IASI (Интерферометр зондирования атмосферы в инфракрасном диапазоне) и AIRS (усовершенствованный прибор для зондирования в ИК-диапазоне). Сравнение повторных калибровок с оперативными калибровками продемонстрировало значительное снижение смещений. Такая работа важна, потому что благодаря ей исторические спутниковые наблюдения излучения становятся полезными для климатических видов применения.

Здесь также следует отметить принципы мониторинга климата Глобальной системы наблюдения за климатом (ГСНК), которые были разработаны с упором на предоставление подходящих данных для мониторинга климата. Эти принципы содержат краткий перечень требований, которым должны соответствовать спутниковые (и наземные) измерения: https://gcos.wmo.int/site/global-climate-observing-system-gcos/essential-climate-variables/about-essential-climate-variables?book=22923.

Полезную дополнительную информацию, касающуюся вопросов калибровки, можно получить на веб-сайте Рабочей группы КЕОС по калибровке и валидации: http://calvalportal.ceos.org.

6.1.2 Факторы, влияющие на калибровку

Чувствительность прибора к входному сигналу, например соотношение между интенсивностью излучения, которой подвергается прибор, и численным значением конкретного результата измерения (в физических единицах, например $Вт \cdot м^{-2} \cdot ср^{-1}$ или $Вт \cdot м^{-2} \cdot мкм^{-1} \cdot ср^{-1}$), в каждый момент времени зависит от нескольких факторов, таких как:

a) геометрия обзора, экранирующие эффекты, засветка и диаграмма направленности антенны;

b) чувствительность и эксплуатационное изнашивание детектора;

c) фильтрующая оптика, а также возможное загрязнение и его изменение со временем, а также стабильность фильтрующего материала;

d) окружающая среда (температура, излучение, вибрация) для всех частей прибора, включая фронтальную оптику, зеркала в оптическом пути, детектор и электронику внутреннего интерфейса (электроника фокальной плоскости, предварительный усилитель и так далее);

e) система обработки сигнала (коэффициент усиления, аналогово-цифровой преобразователь и так далее).

Эти факторы также влияют на функцию спектрального отклика и функцию рассеяния точки, которые определяют характеристики прибора. Они должны быть определены перед запуском и, при наличии возможности, отслеживаться во время работы на орбите. Для понимания состояния прибора и тенденций, а также для предварительной оценки и корректировки систематических погрешностей удобно использовать модели программного обеспечения прибора, имитирующие его работу и функциональные возможности. Тем не менее, как правило, невозможно описать аналитическими средствами точное изменение чувствительности прибора, являющееся следствием многочисленных факторов, способных оказывать влияние на калибровку. Таким образом, контрольные измерения (например, с помощью размещенного на борту абсолютно черного тела) являются обязательными при проведении точной калибровки.

6.1.3 Предпусковая калибровка

Предпусковая калибровка прибора проводится в лаборатории с использованием точно известных источников радиации в контролируемых условиях. До запуска на орбиту необходимо смоделировать ожидаемые состояния прибора и воздействующие на калибровку факторы, поскольку это единственный способ точно охарактеризовать и смоделировать поведение прибора перед тем, как он будет подвержен суровому воздействию космической среды в жестких условиях внешней среды орбитального полета. Необходимо обеспечить надежную работу систем проверки данных бортовых систем, которые обеспечивают информацию о спутнике и его состоянии, включая приборы, чтобы они были способны выдержать физический стресс на этапах запуска, и нахождения на орбите. Данные, полученные по результатам проверки бортовых систем, в сочетании с информацией о калибровке после запуска прибора позволят операторам судить о состоянии калибровки прибора и будут способствовать поиску решений в нештатных ситуациях, которые могут возникнуть в процессе работы на орбите. Подробное рассмотрение мероприятий по определению характеристик и калибровке перед запуском выходит за рамки настоящего Руководства ВМО. Однако заинтересованным читателям

предлагается обратиться к посвященной этому вопросу работе Datla et al. (2011), где дается исчерпывающее описание характеризации и калибровки пассивных оптических приборов дистанционного зондирования перед запуском.

6.1.4 Бортовая калибровка

Бортовая калибровка прибора на орбите обычно осуществляется с использованием эталонных целей (таких как абсолютно черное тело в инфракрасном диапазоне спектра, а также диффузоры солнечного света, виды Луны и ламповые линейные источники излучения в коротковолновом диапазоне спектра) для пассивных приборов или встроенных калибровочных систем (таких как мониторы усиления спектра) для активных приборов.

Некоторые унаследованные приборы работают без использования адекватных способов проведения бортовой калибровки в течение десятилетий, например солнечные каналы AVHRR. Для таких приборов необходимо использовать другие способы калибровки (например, косвенную калибровку или взаимное сравнение с другими приборами).

Точность калибровки прибора, работающего на орбите, зависит от стабильности бортовых калибровочных систем на протяжении всего времени эксплуатационного ресурса прибора. Поэтому калибровка обязательно должна подвергаться регулярной проверке путем проведения взаимных сравнений с более точным контрольным прибором. В случае каналов ИК-изображения это можно сделать с помощью приборов гиперспектрального зондирования, таких как AIRS, IASI и CrIS (инфракрасный зонд для сканирования поперек трассы) (например, Goldberg et al. 2011; Hewison et al. 2013). Для спутниковых приборов, измеряющих отраженное солнечное излучение, взаимное сравнение различных приборов в течение более длительных временных периодов позволяет оценить относительную эффективность работы; проведение коррекции смещений может позволить изучать тенденции (Zhan and Davies, 2016).

В случае с приборами для измерения инфракрасного излучения и когда допускается, что детекторы радиометров имеют линейную характеристику чувствительности, напряжение на выходе определяется формулой:

$$V = \alpha R + V_0$$

где R — входящая энергетическая яркость, α — чувствительность радиометра и V_0 — системная погрешность. Калибровка состоит из определения α и V_0, которое осуществляется путем экспонирования радиометра минимум на две эталонные мишени с сильно различающимися температурами яркости. На практике линейная зависимость может не сохраняться, и при оперативной калибровке необходимо учитывать поправку на нелинейность (например, квадратичный член).

Для приборов для измерения инфракрасного и микроволнового излучения одной эталонной целью обычно является глубокое космическое пространство с температурой 2,7 K. Однако для приборов на спутниковой платформе не всегда имеется возможность направить прибор в сторону глубокого космоса. Например, приборы, всегда нацеленные в сторону поверхности Земли, необходимо оснастить вспомогательным зеркалом для обеспечения обзора глубокого космоса с определенной периодичностью. Второй целью обычно является хорошо изученный источник с температурой в средней части и до верхнего уровня динамического диапазона, чаще всего это размещенное на борту абсолютно черное тело, которое идеально сопоставимо с СИ, т. е. шкалой энергетической яркости, предоставляемой национальным метрологическим учреждением.

Для приборов для измерения ультрафиолетового, видимого и ближнего инфракрасного диапазонов спектра бортовая калибровка является более сложной задачей, поскольку она подвержена влиянию многих факторов. Для слабых сигналов глубокое космическое пространство является подходящим эталоном для контрольного измерения при условии, что возмущающие эффекты (например, отражения от других частей спутника) отсутствуют. При очень сильных сигналах абсолютный источник обычно заменяется

Солнцем, наблюдаемым через солнечные диффузоры, которые обеспечивают относительно стабильные характеристики для контрольного замера. Луна также может использоваться в качестве эталонной цели с тем преимуществом, что на нее можно смотреть без аттенюатора; однако она должна использоваться в сочетании с точной моделью двунаправленной отражательной способности Луны (Kieffer and Stone 2007). В настоящее время ни солнечные диффузоры, ни Луна не обеспечивают калибровки абсолютным методом. Другой часто используемой системой является стенд ламповых линейных источников на борту с хорошо контролируемой интенсивностью излучения. Также необходимо принимать во внимание воздействие спектрально-зависимой поляризации, вызванной влиянием отражающих поверхностей оптики прибора.

6.1.5 Косвенная калибровка

Проблемой при проведении бортовой калибровки является то, что во многих случаях структура измерительных средств не позволяет подвергнуть всю основную оптику облучению с помощью эталонных источников. Например, стабилизированный вращением радиометр на геостационарной орбите использует встроенное абсолютно черное тело, требующее моделирования с учетом вклада телескопа и периферийной оптики в фоновое излучение. Для приборов более старых поколений (таких как Meteosat первого поколения) эталонный источник абсолютно черного тела использовался скорее для мониторинга устойчивости функционирования, чем для калибровки абсолютным методом. В качестве обходного способа для тепловых ИК-каналов использовались косвенные калибровки с использованием модели быстрого радиационного переноса со вспомогательными входными данными, то есть атмосферными профилями от ЧПП и радиозондов (например, van de Berg et al., 1995). Более широкие вопросы, касающиеся этих ранних метеорологических спутников, кратко рассматриваются в работе Schmetz and Menzel (2015).

Для калибровки солнечных каналов были проведены специальные авиационные кампании с использованием хорошо откалиброванных радиометров и солнечных калибровок для спутников Meteosat первого поколения. Калибровки были получены путем сравнения подсчетов, измеренных спутником, с излучениями, измеренными самолетом (Kriebel и Amann, 1993). Если использовать только расчеты радиационного переноса (Köpke, 1982), то для получения данных об отраженном солнечном излучении в космос земные цели во время пролета спутника должны быть хорошо известными.

Для косвенной калибровки могут использоваться различные виды целей, например снежные поля, солнечное отражение, однородные районы пустыни, вершины облаков глубокой конвекции для верхнего предела видимого динамического диапазона; поверхность океана при отсутствии облачности в качестве темной цели в видимом диапазоне; и отражатели из уголков для радара с синтезированной апертурой (что требует минимизации погрешности при строительстве и развертывании отражателей, так чтобы поперечное сечение радара было точно известно). Тропический влажный лес отличается удивительной стабильностью и однородностью для микроволновых радиометров и радиолокационных измерителей рассеяния, хотя и имеет некоторую пространственную и временную изменчивость.

Калибровочные испытательные полигоны, такие как Центр исследований климата для измерения атмосферной радиации (ИАР) — пользовательский центр Министерства энергетики США (https://www.arm.gov/), где проводятся натурные наблюдения, используются для калибровки спутниковых приборов с высоким пространственным разрешением. Во время ввода в эксплуатацию полетной аппаратуры или через регулярные интервалы времени самолеты пролетают над целевым районом одновременно с прохождением над ним спутника, что позволяет получить дополнительные данные для ретроспективной калибровки.

6.1.6 Взаимная калибровка путем проведения одновременных наблюдений

В ходе взаимной калибровки спутниковых приборов (Chander et al., 2013) сопоставляются скоординированные одновременные измерения по одному прибору относительно измерений по другому прибору. Это делается в следующих целях:

a) обеспечение косвенной калибровки приборов, у которых нет встроенного калибровочного устройства или оно не такого высокого качества;

b) слияние данных, полученных с помощью нескольких приборов, для построения однородных временных рядов;

c) уменьшение систематических ошибок смещения за счет сравнения с очень хорошо откалиброванными приборами, примером может служить взаимное сравнение приборов для формирования ИК изображений с приборами гиперспектрального зондирования.

Важность взаимной калибровки спутников общепризнана. Например, в рамках ИСККП, реализуемого Всемирной программой исследований климата (ВПИК), одновременные наблюдения с геостационарных формирователей изображений и формирователей изображений, установленных на полярно-орбитальных спутниках, выполняются ежемесячно уже в течение более 30 лет в качестве средства нормализации изображений, получаемых с геостационарных спутников (Rossow et al. 1996). Совсем недавно ГСИКС (https://gsics.wmo.int/site/global-space-based-inter-calibration-system-gsics) (Goldberg et al., 2011) разработала оперативную методологию для проведения таких взаимных калибровок, конкретно для одновременно проводимых скоординированных наблюдений. Хорошее описание и анализ приводятся в работах Hewison (2013) и Hewison et al. (2013). Эта методология оценивает выбор оптимального соотношения между точным совместным пространственно-временным ориентированием приборов и частотой таких событий, и учитывает поправки, которые необходимо вводить для:

a) различной геометрии обзора (с учетом как угла сканирования прибора, так и Солнца);

b) различного состояния атмосферы вдоль линии луча при сканировании, включая аэрозоли и облачность;

c) различных функций спектральной чувствительности.

Следует отметить, что практически одновременные наблюдения между двумя спутниками на солнечно-синхронных орбитах могут проводиться только в точке пересечения их орбитальных плоскостей, которая всегда расположена в определенный момент по местному солнечному времени и на определенной — обычно высокой — широте. Для наклонения в 98° широта пересечения составляет около 70°, когда время пересечения экватора (ВПЭ) двух орбит отличается меньше чем на 8 часов, и опускается значительно, когда разница в ВПЭ возрастает до 12 часов. Пример одновременного надирного наблюдения (ОСН), оперативно проводимого ГСИКС, приведен на сайте https://gsics.wmo.int/en/objectives.

6.1.7 Корректировка систематической погрешности измерений в многолетних рядах наблюдений

Для мониторинга изменчивости климата и климатических тенденций необходимы долгосрочные данные, охватывающие десятилетия наблюдений с различных спутниковых приборов. К успешным примерам можно отнести записи температурных трендов, полученные с помощью прибора микроволнового зондирования (MSU) на борту полярно-орбитальных спутников НУОА. Этот прибор измеряет температуру атмосферы от поверхности до нижнего слоя стратосферы при любых погодных условиях, исключая

осадки. Хотя MSU был разработан в первую очередь для мониторинга погодных процессов, его наблюдения широко используются для обнаружения климатических тенденций. Калибровка отдельного прибора сама по себе содержит слишком большую системную ошибку для мониторинга климата. Для уменьшения этой неопределенности был разработан метод взаимной калибровки, основанный на выверках одновременных надирных пролетов (ОНН) (Cao et al., 2004) для приборов MSU на борту спутников НУОА-10, -11, -12 и -14. С учетом геометрии орбиты выверки ОНН ограничены полярными областями, где диапазон яркостных температур меньше глобального диапазона. Тем не менее, полученные калибровочные коэффициенты применяются по всему миру для всего жизненного цикла спутника MSU (например Zou et al., 2009 и содержащиеся в этой работе ссылки). John et al. (2019) провели повторную калибровку формирователей изображений на борту действующих геостационарных спутников с использованием калиброванных наблюдений за излучением с полярных орбитальных спутников с HIRS, а также с гиперспектральных зондировщиков IASI и AIRS. Сравнение повторных калибровок с оперативными калибровками геостационарных формирователей изображений выявило значительные отклонения в оперативных калибровках, которые могут быть скорректированы, чтобы обеспечить полезность данных для мониторинга изменчивости климата.

6.1.8 Использование калибровочной информации

Тип имеющейся калибровочной информации зависит от уровня ее обработки и от рассматриваемого прибора. Каждый прибор имеет свой собственный рабочий режим и цикл калибровки, который включает в себя регулярные измерения калибровочных целей, каждый раз с выполнением определенного числа наблюдений. Для примера в таблице 6.1. показаны циклы калибровки усовершенствованного микроволнового радиометра-А (AMSU-A), микроволнового датчика влажности (МДВ) и инфракрасного датчика с высокой разрешающей способностью-4 (HIRS/4).

Таблица 6.1. Примеры циклов наблюдений/калибровки

	AMSU-A	*МДВ*	*HIRS/4*
Число обзоров Земли (наблюдение)	1 линия на 30 пикселей	1 линия на 90 пикселей	38 линий на 56 пикселей
Число обзоров теплой мишени (калибровка)	2 (~300 K)	4 (~273 K)	48 (~290 K)
Число обзоров холодной мишени (калибровка)	2 (глубокий космос ~2,73 K)	4 (глубокий космос ~2,73 K)	56 (глубокий космос ~2,73 K)
Общая длительность цикла	8 с	8/3 с	256 с

Важным шагом в предварительной обработке данных от уровня 0 до уровня 1b является извлечение калибровочной информации. В таблице 6.1 приведен пример для AMSU, где подсчеты теплых/холодных обзоров используются для расчета поверочных коэффициентов в соответствии с калибровочной моделью (такой как линейная или квадратичная калибровочная функция либо таблица преобразования и др.), которая обычно предоставляется оператором прибора на борту. Один из первых примеров описания калибровки AMSU-A представлен в работе Mo (1995).

Для прикладных целей, требующих высокой точности и однородности рядов данных, полученных по различным приборам, может быть применена поправка дополнительно к оперативной калибровке для учета последних результатов проведения взаимной калибровки. Такие поправки предоставляются ГСИКС (см. Goldberg et al., 2011). Откорректированный калибровочный коэффициент может быть включен в уровень 1b/уровень 1,5 форматов данных как дополнительная калибровочная информация.

6.1.9 Сопоставимость результатов измерений из космоса

В то время как взаимная калибровка может обеспечить сопоставимость результатов измерений различными спутниковыми приборами, она необязательно обеспечивает сопоставимость со стандартами СИ, кроме случаев, когда эталонный прибор на орбите является сопоставимым с СИ. Для достижения сопоставимости с СИ на орбите существуют большие проблемы, поскольку большинство датчиков деградируют физически в ходе и после запуска на орбиту. Достижение сопоставимости с СИ представляет собой проблему для конструкторов приборов и остается исследовательской темой для всех видов измерений, за исключением нескольких.

Предложенная программа наблюдения абсолютных значений энергетической яркости и рефракции для исследования климата(CLARREO) (Wielicki et al., 2013) включает космический аппарат с высокоточным инфракрасным радиометром с контрольным абсолютно черным телом с высокой излучательной способностью и с сопоставимой с СИ калибровкой термометра с многократно меняющими фазу ячейками, а также со спектрометром с рабочим диапазоном в ультрафиолетовом, видимом и ближнем инфракрасном частях спектра, калибруемом по Солнцу и Луне, с криогенно охлаждаемом активном резонансном радиометром и датчиком радиозатменных измерений. Этот комплекс приборов должен обеспечивать полностью сопоставимые результаты измерений всего спектра, излучаемого Землей, и отраженного солнечного излучения. Осуществление запуска и поддержание работы такого аппарата предоставило бы опорные точки для поддержки калибровки и сопоставимости со стандартами СИ результатов работы многочисленных оперативных радиометров.

Для сопоставимости результатов измерений можно также воспользоваться преимуществами приборов, которые не зависят от радиометрической калибровки, таких как радиозатменные и солнечные либо звездно-затменные датчики. Однако для использования измерений таких приборов необходимы расчеты радиационного переноса для вычисления излучения для сравнения со спутниковыми наблюдениями. Эти расчеты могут иметь смещение, что в результате приводит к проблеме.

6.2 ВАЛИДАЦИЯ

6.2.1 Факторы, которые необходимо учитывать при проверке качества продукции

Валидация представляет собой процесс оценки с помощью независимых средств точности продукции, полученной в результате измерений космическими приборами. Для валидации данных уровня 1 необходимо глубокое понимание приборов и, следовательно, она должна выполняться оператором прибора при поддержке инженеров по приборам. Валидация продукции (уровень 2) должна выполняться разработчиками продукции после проведения калибровки прибора. Оба процесса должны быть отражены в планах валидации, разработанных для каждого конкретного прибора и вида продукции соответственно (например, Spezzi et al., 2018).

Поскольку валидация геофизической продукции представляет собой сложный и весьма разнообразный процесс, специфичный для многих видов геофизической продукции, здесь достаточно указать его основные аспекты:

– геофизическая продукция производится с использованием спутниковых данных (часто это измерения энергетической яркости) с применением алгоритма, который чаще всего основан на физике. Сравнение полученной продукции с полевыми наблюдениями или результатами моделирования является важной частью процесса для оценки и документирования надежности используемого алгоритма по извлечению данных и для определения области ее применения;

– для многих видов продукции валидация является сложной задачей, поскольку сравнение продукции, полученной на основе результатов космических измерений, или продукции полученной на основе независимого контрольного прибора, часто с использованием измерений *in situ*, подвержено погрешностям, обусловленным несколькими источниками: i) погрешности, присущей продукции на основе спутниковых данных; ii) стандартной погрешности в контрольных данных; iii) погрешности, обусловленной методологией проведения сравнения, часто из-за неодновременного сбора данных в пространстве и времени, так называемой ошибке репрезентативности. Также стоит отметить, что разными методами измерения измеряются различные вещи, например космические наблюдения часто покрывают относительно обширные районы (мгновенное поле зрения) и объем атмосферы и представляют собой почти мгновенные измерения (несколько миллисекунд), в то время как наземные (*in situ*) измерения, как правило, являются точечными измерениями, обобщенными за период времени. Наземное дистанционное зондирование обычно обеспечивает получение информации об атмосферном столбе. Важно, чтобы такая валидация продукции проводилась в соответствии с одним определенным методом усреднения по времени и пространству для обеспечения согласованности.

Модель оценки качества может использоваться для улучшения сравнений за счет понимания и объяснения этих различий и лучшего использования преимуществ и недостатков различных методов проверки качества данных. Обычно проведение проверки качества данных спутниковыми операторами сопровождается подготовкой таких оценочных моделей.

6.2.1 **Стратегии валидации**

Проверка качества продукции на основе спутниковых данных должна выполняться в соответствии с передовыми методами работы и протоколами, зависимыми от переменных величин, например разработанными Рабочей группой КЕОС по калибровке и валидации (http://ceos.org/ourwork/workinggroups/). Проверка качества полученных со спутников параметров и продукции может выполняться с использованием следующих хорошо изученных источников:

a) измерения *in situ* в верхней атмосфере (например, радиозонды);

b) измерения методами наземного дистанционного зондирования;

c) сравнение с результатами модели и/или использование при ассимиляции данных;;

d) пустынные цели;

e) другая полученная со спутников или смешанные виды продукции схожего типа.

Для использования таких источников проверки качества продукции необходимо, чтобы:

a) были хорошо известны неопределенности измерения;

b) учитывались пространственно-временные выборки по разным видам продукции и изначально позволяли проводить взаимные сравнения.

Например, в поддержку подготовки прошедшей проверку качества комбинированной спутниковой продукции на основе данных о температуре поверхности моря (ТПМ) Группа по данным высокого разрешения о ТПМ (ГДВРТПМ) разработала комплексную стратегию проведения валидации, которая включает в себя подробное описание данных, измерений и процесса проведения сравнения. Дополнительную информацию можно получить по адресу: https://www.ghrsst.org/ghrsst-data-services/services/.

6.2.2 Валидация данных уровня 1

Валидация рабочих характеристик продукции на уровне 1 затрагивает различные аспекты. Как правило, методики включают перекрестную калибровку с другими приборами (возможно, даже на той же платформе), взаимные сравнения с другими сопоставимыми наблюдениями во время одновременных пролетов в надире (Goldberg et al., 2011), сравнения с наземными наблюдениями и лунную калибровку. Рабочие характеристики продукции на уровне 1B будут проверяться на соответствие геометрическим, спектральным и радиометрическим требованиям для всех географических регионов, включая их сезонную изменчивость. В частности, включены следующие конкретные мероприятия: i) проверка калибровки, ii) валидация радиометрии, iii) проверка геометрии, iv) проверка качества изображения (Phillips et al., 2018). Такие испытания обычно проводятся на этапе ввода в эксплуатацию, то есть в течение ограниченного периода времени. Вместе с тем, эти мероприятия необходимо также проводить в ходе повседневной эксплуатации для того, чтобы поддерживать долгосрочную стабильность калиброванных данных излучения.

6.2.3 Валидация геофизической продукции (уровень 2)

Для валидации продукции уровня 2 требуется независимая продукция от других спутников или наземных измерений (Spezzi и др., 2018). Важным аспектом является сопоставимость временных и пространственных масштабов продукции. Существенное значение здесь приобретает ошибка репрезентативности (Kitchen, 1989). Валидацию также можно провести путем взаимного сравнения с другой продукцией, полученной в результате другой спутниковой программы и прошедшей валидацию. Также полезно проводить сравнения с наземными наблюдениями. Еще одним методом является валидация с помощью моделей ЧПП (см. раздел 6.2.4). Цель валидации заключается в оценке качества продукции с точки зрения презиционности, точности (смещения), стабильности, а также обеспечения непрерывности/согласованности временных записей о продукции. Успешность валидации в некоторой степени зависит от требований пользователя к продукции, и для некоторых видов применения необходима более строгая валидация, чем для других. Хорошее описание валидации геофизической продукции представлено в работе Loew et al. (2017); в этой работе рассматриваются современные методы валидации данных со спутников и документируются их сходства и различия.

В течение срока действия спутниковой программы продукция обычно претерпевает изменения и совершенствуются алгоритмы, используемые для ее получения. В принципе, после таких изменений необходимо проводить новую валидацию, однако многое может быть охвачено валидацией с помощью системы ЧПП.

6.2.4 Валидация с помощью ЧПП

Опыт показывает, что включение продукции по излучению (уровень 1) или геофизической продукции в систему ассимиляции данных ЧПП является отличным способом валидации спутниковых данных. Это особенно справедливо, когда в основу спутникового прибора положена часто повторяющаяся конструкция, а его предшественники уже использовались в ЧПП. В этом случае уже имеется опыт, позволяющий судить об эффективности измерений, подлежащих валидации. Еще одним преимуществом валидации с помощью систем ЧПП является возможность сравнений для различных географических регионов и сезонов.

Если в системе ассимиляции ЧПП используются новые спутниковые измерения, то требуется больше усилий. Например, для моделирования спутниковых измерений на основе выходных полей модели ЧПП необходимо запрограммировать новый оператор передачи данных.

Огромным преимуществом мониторинга спутниковой продукции в рамках систем ЧПП является также непрерывность такого мониторинга в течение всего срока действия

спутниковой программы. Дополнительные преимущества обеспечивает мониторинг, осуществляемый различными центрами ЧПП, поскольку это может выявить проблемы, присущие конкретной системе ЧПП. Это связано с тем, что поля ЧПП не представляют собой истину как таковую; в частности, в регионах, наименее охваченных наблюдениями, могут присутствовать значительные фоновые ошибки ЧПП. Для получения максимальной пользы из новых спутниковых наблюдений для ЧПП и мониторинга климата обычно требуется время и специальные исследования.

С примерами такого мониторинга для различной продукции можно ознакомиться на веб-сайтах Центров спутниковых применений (ЦСП) EUMETSAT, например: https://www.nwpsaf.eu/site/; https://www.romsaf.org.

СПРАВОЧНАЯ И ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ЛИТЕРАТУРА

Achieving Satellite Instrument Calibration for Climate Change (ASIC³); Report of a Workshop Organized by the National Oceanic and Atmospheric Administration, National Institute of Standards and Technology, National Aeronautics and Space Administration, National Polar-orbiting Operational Environmental Satellite System-integrated Program Office, and Space Dynamics Laboratory of Utah State University; Ohring, G., Ed.; National Oceanic and Atmospheric Administration: Washington, DC, 2007.

Cao, C.; Weinreb, M.; Xu, H. Predicting Simultaneous Nadir Overpasses among Polar-Orbiting Meteorological Satellites for the Intersatellite Calibration of Radiometers. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology* **2004**, *21* (4), 537–542. https://doi.org/10.1175/1520-0426(2004)021<0537:PSNOAP>2.0.CO;2.

Chander, G.; Hewison, T.; Fox, N. et al. Overview of Intercalibration of Satellite Instruments. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* **2013**, *51* (3), 1056–1080. https://doi.org/10.1109/TGRS.2012.2228654.

Datla, R. U.; Rice, J. P.; Lykke, K. R. et al. Best Practice Guidelines for Pre-Launch Characterization and Calibration of Instruments for Passive Optical Remote Sensing. *Journal of Research of the National Institute of Standards and Technology* **2011**, *116* (2), 621–646. https://doi.org/10.6028/jres.116.009.

Doelling, D.; Nguyen, L.; Minnis, P. On the Use of Deep Convective Clouds to Calibrate AVHRR Data. In *Optical Science and Technology*, Proceedings of the 49th Annual Meeting of SPIE, the International Society for Optics and Photonics, Denver, USA, 2–6 August 2004; SPIE: Bellingham, USA, 2004; Vol. 5542: Earth Observing Systems IX. https://doi.org/10.1117/12.560047.

Goldberg, M.; Ohring, G.; Butler, J. et al. The Global Space-based Inter-calibration System. *Bulletin of the American Meteorological Society* **2011**, *92* (4), 467–475. https://doi.org/10.1175/2010BAMS2967.1.

Govaerts, Y.; Clerici, M.; Clerbaux, N. Operational Calibration of the Meteosat Radiometer VIS Band. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* **2004**, *42* 1900–1914. https://doi.org/10.1109/TGRS.2004.831882.

Hewison, T. An Evaluation of the Uncertainty of the GSICS SEVIRI-IASI Intercalibration Products. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* **2013**, *51* (3), 1171–1181. https://doi.org/10.1109/TGRS.2012.2236330.

Hewison, T.; Wu, X.; Yu, F. et al. GSICS Inter-Calibration of Infrared Channels of Geostationary Imagers Using Metop/IASI. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* **2013**, *51* (3), 1160–1170. https://doi.org/10.1109/TGRS.2013.2238544.

John, V. O.; Tabata, T.; Rüthrich, F. et al. On the Methods for Recalibrating Geostationary Longwave Channels Using Polar Orbiting Infrared Sounders. *Remote Sensing* **2019**, *11*, 1171. https://doi.org/10.3390/rs11101171.

Joint Committee for Guides in Metrology (JCGM). *International Vocabulary of Metrology – Basic and General Concepts and Associated Terms (VIM)*; JCGM 200:2012; JCGM: Sèvres, France, 2012.

Kieffer, H. H.; Stone, T. C. The Spectral Irradiance of the Moon. *The Astronomical Journal* **2005**, *129* 2887–2901. https://doi.org/10.1086/430185.

Kitchen, M. Representativeness Errors for Radiosonde Observations. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society* **1989**, *115* (487), 673–700. https://doi.org/10.1002/qj.49711548713.

Köpke, P. Vicarious Satellite Calibration in the Solar Spectral Range by Means of Calculated Radiances and its Application to Meteosat. *Applied Optics* **1982**, *21*, 2845–2854. https://doi.org/10.1364/AO.21.002845.

Kriebel, K.-T.; Amann, V. Vicarious Calibration of the Meteosat Visible Channel. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology* **1993**, *10*, 225–232. https://doi.org/10.1175/1520-0426(1993)010<0225:VCOTMV>2.0.CO;2.

Loew, A.; Bell, W.; Brocca, L. et al. Validation Practices for Satellite-based Earth Observation Data across Communities. *Reviews of Geophysics* **2017**, *55*, 779–817. https://doi.org/10.1002/2017RG000562.

Meirink, J. F.; Roebeling, R. A.; Stammes, P. Inter-calibration of Polar Imager Solar Channels Using SEVIRI. *Atmospheric Measurement Techniques* **2013**, *6*, 2495–2508. https://doi.org/10.5194/amt-6-2495-2013.

Menzel, P.; Schmetz, J.; Nieman, S. et al. *Intercomparison of the Operational Calibration of GOES-7 and Meteosat-3/4*; NOAA Technical Report NESDIS 73; National Oceanic and Atmospheric Administration: Washington, DC, USA, 1993.

Mo, T. *Calibration of the Advanced Microwave Sounding Unit-A for NOAA-K*; NOAA Technical Report NESDIS 85, National Oceanic and Atmospheric Administration: Washington, DC, USA, 1995.

Ohring, G.; Wielicki, B.; Spencer, R. et al. Satellite instrument calibration for measuring global climate change: Report of a workshop. *Bulletin of the American Meteorological Society* **2005**, *86*, 1303–1314. https://doi.org/10.1175/BAMS-86-9-1303.

Phillips, P.; Bonsignori, R.; Just, D. et al. Calibration and Validation of Level 1B Radiances of the EUMETSAT Polar System – Second Generation (EPS-SG) Visible/Infrared Imager METimage. In Proceedings of SPIE Remote Sensing, Berlin, Germany, 10–13 September 2018; SPIE: Bellingham, USA, 2018; Vol. 10785: Sensors, Systems, and Next-Generation Satellites XXII. https://doi.org/10.1117/12.2325545.

Rossow, W. B.; Brest, C. L.; Roiter, M. *International Satellite Cloud Climatology Project (ISCCP) Update of Radiance Calibrations* (WMO/TD-No. 736). World Climate Research Programme.

Schmetz, J.; Menzel, W. P. A Look at the Evolution of Meteorological Satellites: Advancing Capabilities and Meeting User Requirements. *Weather, Climate, and Society* **2015**, *7*, 309–320. https://doi.org/10.1175/WCAS-D-15-0017.1.

Spezzi, L.; Borde, R.; Phillips, P. L. et al. Validation Activities for the Level 2 Geophysical Products of the EUMETSAT Polar System – Second Generation (EPS-SG) Visible/Infrared Imager (METimage). In Proceedings of SPIE Remote Sensing, Berlin, Germany, 10–13 September 2018; SPIE: Bellingham, USA, 2018; Vol. 10786: Remote Sensing of Clouds and the Atmosphere XXIII. https://doi.org/10.1117/12.2325586.

van de Berg, L.; Schmetz, J.; Whitlock, J. On the Calibration of the Meteosat Water Vapor Channel. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* **1995**, *100* (D10), 21069–21076. https://doi.org/10.1029/95JD01880.

Wielicki, B.; Young, D. F.; Mlynczak, M. G. et al. Achieving Climate Change Absolute Accuracy in Orbit. *Bulletin of the American Meteorological Society* **2013**, *94* (10), 1519–1539. https://doi.org/10.1175/BAMS-D-12-00149.1.

Zhan, Y.; Davies, R. Intercalibration of CERES, MODIS, and MISR Reflected Solar Radiation and its Application to Albedo Trends. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* **2016**, *121*, 6273–6283. https://doi.org/10.1002/2016JD025073.

Zhou, G.; Li, C.; Yue, T. et al. An Overview of In-orbit Radiometric Calibration of Typical Satellite Sensors. In *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*; Copernicus GmbH, 2015; Volume XL-7/W4, 235–240. https://doi.org/10.5194/isprsarchives-XL-7-W4-235-2015.

Zou, C.-Z.; Gao, M.; Goldberg, M. D. Error Structure and Atmospheric Temperature Trends in Observations from the Microwave Sounding Unit. *Journal of Climate* **2009**, *22*, 1661–1681. https://doi.org/10.1175/2008JCLI2233.1.

ГЛАВА 7. МЕЖДИСЦИПЛИНАРНЫЕ ВОПРОСЫ

7.1 ВОПРОСЫ ЗАЩИТЫ РАДИОЧАСТОТ

7.1.1 Общее регулирование использования радиочастот

Исключительно важным по значению вопросом для обеспечения наблюдений за Землей из космоса является доступность радиочастотного спектра в микроволновом диапазоне (от 1 до 300 ГГц и выше). Это важно для:

a) пассивных наблюдений за поверхностью Земли в окнах прозрачности атмосферы и за атмосферными газами в полосах поглощения;

b) активных наблюдений с помощью радиолокаторов (альтиметрия, скаттерометрия, радиолокаторы с синтезированной апертурой);

c) каналов связи, необходимых для передачи со спутника полученных данных и для управления спутником.

Использование спектра радиочастот координируется на глобальном уровне Международным союзом электросвязи (МСЭ). Регламенты радиосвязи принимаются странами — членами МСЭ на всемирных конференциях по радиосвязи (ВКР) каждые четыре года. МСЭ регулирует выделение полос радиочастот для различных видов применения, называемых «обслуживанием», например, для фиксированной и мобильной телесвязи, широкополосных мобильных применений, радионавигации, наземных радиолокаторов, устройств малого радиуса действия и электронного сбора новостей. Применения в отношении наблюдений за Землей определяются МСЭ как обслуживание в интересах двух специальных служб: Спутниковой службы исследования Земли (ССИЗ) и Метеорологической спутниковой службы (МСС). В то время как некоторые частотные диапазоны выделяются какой-либо службе для исключительного пользования, большинство частотных диапазонов выделяются ряду служб на определенных условиях (таких как с ограничением по количеству, мощности излучения и географическому распределению источников), которые направлены на исключение вредных помех.

С быстрым развитием сектора телесвязи и его возрастающими потребностями в расширении частотного диапазона защита радиочастот для ССИЗ и МСС стала критически важной задачей. К числу проблем, вызывающих озабоченность, относятся следующие:

a) помехи от неконтролируемых излучений на частотах, используемых исключительно ССИЗ и ММС, или внеполосных излучений от близлежащих частотных диапазонов;

b) совместное использование частотных диапазонов на условиях, недостаточно строгих для того, чтобы гарантировать надежную защиту;

c) стремление других обслуживающих отраслей экономики расширить свои диапазоны и использовать частотные диапазоны, в настоящее время выделенные для ССИЗ и МСС;

d) потребности ССИЗ и МСС в использовании новых частот, проявляющиеся в результате развития технологий дистанционного зондирования (например, в микроволновом диапазоне частот свыше 300 ГГц), растущих скоростей передачи данных или расширяющихся частотных диапазонов для телесвязи.

При рассмотрении этих вопросов необходимо учитывать, что выбор частот, используемых для пассивных методов измерений метеорологическими спутниками, обусловлен законами физики, лежащими в основе требуемых наблюдений. То есть,

выбранные для метеорологических спутников частоты должны соответствовать либо полосам поглощения наблюдаемых компонентов атмосферы, либо, в случае наземных наблюдений, атмосферным окнам с минимальным атмосферным поглощением. Важно также отметить, что природные излучения чрезвычайно слабые по сравнению с большинством искусственных источников излучения, и поэтому они легко искажаются. Поэтому частотные диапазоны для пассивного радиометрического зондирования должны рассматриваться как естественный и невозобновляемый ресурс, который необходимо сохранить.

7.1.2 Пассивная микроволновая радиометрия

Спектральный микроволновый диапазон, используемый для наблюдения за Землей, растянут с ~1,4 ГГц (например, для измерения солености океана) до ~2 500 ГГц и более. Самыми критически важными являются вопросы защиты частот ниже 300 ГГц. Использование частот свыше ~300 ГГц все еще развивается; более того, поскольку присутствие водяного пара влияет на процесс наблюдения за нижними слоями тропосферы, большинство приборов, работающих на этих частотах, предназначаются для определения химического состава атмосферы и используют лимбовые наблюдения, которые делают их менее подверженными к восприимчивости помех от наземных источников. МСЭ установил ограниченное число частотных полос, выделенных ССИЗ, для которых активные использования запрещены или ограничены. По мере того, как все больше пользователей используют радиочастотный спектр, и у пользователей появляется потребность в использовании более высоких скоростей передачи данных, возрастает и давление на более высокие частоты, приводящее к тому, что МСЭ вынуждено распределять частотные полосы, выделенные для ССИЗ, среди действующих служб. Только несколько узких диапазонов выделяются ССИЗ на исключительной основе, что обеспечивает надежную юридическую защиту. Это имеет следующие последствия:

a) расположение в спектре выделенных микроволновых каналов зачастую не совпадает с пиком чувствительности для измерения необходимой геофизической переменной и может подвергаться различным помехам;

b) защищенные частотные полосы могут быть настолько узкими, что отношение сигнала к уровню помех является очень низким; это может привести к рассмотрению возможности использования незащищенного частотного диапазона, в котором имеется более широкая полоса, при допущении риска возникновения помех.

К сожалению, давление со стороны других пользователей частотного спектра, включая коммерческие и мобильные службы, постоянно возрастает; специализированные группы ВМО, Координационная группа по метеорологическим спутникам (КГМС) и космические агентства должны постоянно отслеживать ситуацию при каждом пересмотре Регламента МСЭ. Одной из таких очень важных групп является Группа по координации пространственных частот (ГКПЧ), которая выступает в качестве форума для координации действий космических операторов в целях эффективного использования тех полос радиочастот, которые выделены МСЭ для таких видов обслуживания, как проведение космических исследований, осуществление космической оперативной деятельности, поддержание спутников исследования Земли и метеорологических спутников, а также в целях управления этими полосами.

7.1.3 Активное микроволновое зондирование

Проблема защиты частот также существует и для активного зондирования (альтиметрия, скатерометрия или радиолокаторы с синтезированной апертурой). Для некоторых видов применений радиолокационного отраженного рассеяния, подобных измерению атмосферных осадков, измерительная частота должна выбираться с учетом физических характеристик измеряемых переменных. В других случаях, таких как альтиметрия или получение изображений с помощью радиолокаторов с синтезированной апертурой, это

не так критично, и существует некоторая гибкость в определении частоты в любом из L-, S-, C-, X-, K_u-, K-, K_a-, V- или W-диапазонов частот (см. определения в таблице 2.8, глава 2 настоящего тома).

7.1.4 Эксплуатация спутников и частоты радиосвязи

Выделение частот для системы связи между спутником и наземной станцией является еще одним важнейшим вопросом. В этом случае, поскольку речь идет об активном использовании частот, Регламент МСЭ накладывает очень жесткие ограничения в отношении разрешенных частот, частотного диапазона и мощности излучения. Последствия этого следующие:

a) более высокая стоимость наземных принимающих станций, работающих с низким уровнем сигнала;

b) более высокие расходы из-за недостаточного частотного диапазона, доступного в одной полосе, для передачи данных, в результате чего приходится перераспределять ресурсы и задействовать более высокочастотные полосы, что требует использования более современной технологии и ориентирования антенны;

c) прежде всего, более сложное обеспечение сохранности частоты, особенно для передачи данных в реальном времени; доступно меньше частот и иногда это провоцирует помехи, возникающие между спутниками одного семейства, которые одновременно находятся на орбите.

В любом случае, защиту радиочастоты трудно гарантировать, и пользователи испытывают проблемы, особенно в промышленно развитых районах. Для поддержания защиты требуется выделение целевых ресурсов в спутниковых организациях и ВМО. В таблице в этом разделе представлены частотные диапазоны, выделенные для передачи данных на метеорологические спутники и с них (WMO/ITU, 2008). В ней также учитывается частотный диапазон 7 850—7 900 МГц, который был добавлен на предыдущие ВКР. Со списком всех частот, используемых для передачи данных на спутники наблюдения Земли и с них, а также для микроволнового активного или пассивного дистанционного зондирования, можно ознакомиться на сайте: https://space.oscar.wmo.int/satellitefrequencies.

7.2 МЕЖДУНАРОДНАЯ КООРДИНАЦИЯ

7.2.1 Координационная группа по метеорологическим спутникам

Исходя из задачи долгосрочного обеспечения функционирования спутниковых программ, Координационная группа по метеорологическим спутникам (КГМС) в соответствии с согласованной базовой конфигурацией координирует работу спутниковых группировок на геостационарных и низких околоземных орбитах в поддержку программ ВМО и программ, спонсируемых ВМО. Учрежденная в 1972 г. с акцентом на мониторинге погоды с геостационарных спутников в целях прогнозирования погоды, КГМС с самого начала определяла общие стандарты для распространения изображений с низким разрешением в формате при факсимильной передаче метеорологических карт (ВЕФАКС) и для Международной системы сбора данных в поддержку мобильных станций, наблюдаемых различными спутниками. Первоначально КГМС также уделяла особое внимание геостационарным спутникам и содействовала созданию кольца геостационарных спутников вокруг Земли.

Сфера деятельности КГМС была расширена в 1992 г., охватив полярно-орбитальные метеорологические спутники и исследовательские спутники, вносящие вклад в работу глобальной космической системы наблюдений. В настоящее время КГМС все больше занимается наблюдениями за системой Земля, производимыми в целях решения задач

Распределения полос частот, доступных для передачи данных с метеорологических спутников

Направление космос-Земля	*Направление Земля-космос*
137—138 МГц (метеорологические спутники на первичной основе)	401—403 МГц (ССИЗ и метеорологические спутники на первичной основе)
400,15—401 МГц (метеорологические спутники на первичной основе)	2 025—2 110 МГц (ССИЗ на первичной основе) (Примечание 1) (включая направление космос-космос)
460—470 МГц (ССИЗ и метеорологические спутники на вторичной основе)	8 175—8 215 МГц (метеорологические спутники на первичной основе)
1 670—1 710 МГц (метеорологические спутники на первичной основе)	28,5—30,0 ГГц (ССИЗ на вторичной основе) (Примечание 1)
2 200—2 290 МГц (ССИЗ на первичной основе) (Примечание 1) (включая направление космос-космос)	40,0—40,5 ГГц (ССИЗ на первичной основе) (Примечание 1)
7 450—7 550 МГц (метеорологические спутники на первичной основе, только для геостационарных спутников)	
7 750—7 900 МГц (метеорологические спутники на первичной основе, только для негеостационарных спутников)	
8 025—8 400 МГц (ССИЗ на первичной основе) (Примечание 1)	
18,0—18,3 ГГц (метеорологические спутники на первичной основе для направления космос-Земля в Районе 2, только для геостационарных спутников)	
18,1—18,4 ГГц (метеорологические спутники на первичной основе для направления космос-Земля в Районах 1 и 3, только для геостационарных спутников)	
25,5—27,0 ГГц (ССИЗ на первичной основе) (Примечание 1) (включая направления космос-космос в диапазоне 25,25—27,5 ГГц)	
37,5—40,0 ГГц (ССИЗ на вторичной основе) (Примечание 1)	
65,0—66,0 ГГц (ССИЗ на первичной основе) (Примечание 1)	

Примечание 1:

[a] Поскольку метеорологические спутники являются подклассом Спутниковой службы исследования Земли (ССИЗ), данные распределения (например, 8 025—8 400 МГц и 25 500—27 000 МГц) могут также использоваться для работы с метеорологическими спутниками и их применениями.

климата, океанографии и мониторинга окружающей среды. Согласованная базовая конфигурация КГМС описывает классы спутниковых программ и орбиты, на которых они должны поддерживаться на долгосрочной основе; она служит ориентиром для планируемых вкладов стран-членов в Интегрированную глобальную систему наблюдений ВМО (ИГСНВ) с учетом Перспективного видения в отношении ИГСНВ в 2040 году.

КГМС определяет технические стандарты или наилучшие методические рекомендации для обеспечения оперативной совместимости по всей глобальной системе. Она разработала

планы на случай непредвиденных ситуаций, которые предоставляют рамочную основу для действий в случае выхода из строя спутника или других непредвиденных трудностей в полноценном осуществлении согласованной базовой конфигурации.

Кроме того, Объединенная рабочая группа по климату Комитета по спутниковым наблюдениям за Землей (КЕОС/КГМС) координирует и поощряет совместную деятельность ведущих космических агентств мира в области мониторинга климата, преследуя главную цель — повышение систематической доступности климатических данных путем скоординированного внедрения и дальнейшего развития глобальной системы мониторинга климата из космоса. Рабочая группа по климату была создана в 2010 году для координации деятельности КЕОС по мониторингу изменения климата.

КГМС осуществляет работу через рабочие группы по следующим вопросам: i) спутниковые системы и телесвязь; ii) спутниковая продукция; iii) планирование для обеспечения непрерывности наблюдений и на случай непредвиденных ситуаций; iv) глобальное распространение данных. Эти рабочие группы всегда собираются на ежегодных совещаниях КГМС. Совместно с ВМО КГМС инициировала крупные инициативы по сотрудничеству, к числу которых относятся Глобальная космическая система взаимных калибровок (ГСИКС), Проект по непрерывной скоординированной обработке спутниковых данных об окружающей среде для мониторинга климата (СКОПЕ-КМ), проекты по СКОПЕ и наукастингу и Виртуальная лаборатория для образования и подготовки кадров в области спутниковой метеорологии (ВЛаб). КГМС также инициировала создание нескольких международных научных рабочих групп, которые, в свою очередь, представляют регулярные сообщения на ежегодных заседаниях КГМС. В настоящее время КГМС спонсирует и помогает организовывать специальные совещания следующих пяти международных научных рабочих групп:

a) Международная рабочая группа по прибору TIROS для оперативного вертикального зондирования (ТОВС) (МРГТ);

b) Международная рабочая группа по ветрам (МРГВ);

c) Международная рабочая группа по осадкам (МРГО);

d) Международная рабочая группа по радиозатменным наблюдениям (МРГРН);

e) Международная рабочая группа по облакам (МРГОб).

Более подробную информацию о КГМС можно получить по адресу: https://www.cgms-info.org/.

7.2.2 Комитет по спутниковым наблюдениям за Землей

Комитет по спутниковым наблюдениям за Землей (КЕОС) был основан в сентябре 1984 г. в соответствии с рекомендацией Группы экспертов по дистанционному зондированию из космоса, созданной под эгидой Рабочей группы по вопросам роста, технологий и занятости Экономического саммита промышленно развитых стран («Группы семи»). Данная группа экспертов признала многодисциплинарный характер космических наблюдений за Землей и важность координации международных усилий по наблюдению за Землей на благо общества. Таким образом, изначальная функция КЕОС заключалась в координации и согласовании наблюдений за Землей, чтобы пользователям было легче получать доступ к данным и использовать их. Первоначально в центре внимания КЕОС находились вопросы функциональной совместимости, общих форматов данных, взаимной калибровки приборов, а также общего утверждения и взаимного сравнения продуктов.

С момента создания КЕОС условия сбора и использования данных космических наблюдений за Землей изменились. Значительно увеличилось количество спутников наблюдения за Землей. Бортовые приборы стали более совершенными и теперь способны собирать новые типы данных, причем в постоянно растущих объемах. По мере

появления различных типов данных и разработки новых применений для наблюдений за Землей расширяется и становится более разнообразным и круг пользователей. Уровень организации деятельности пользователей также растет: было сформировано несколько международных органов, занимающихся координацией и выдвижением требований к наблюдениям за Землей. В ответ на эти изменения меняется и КЕОС: его структура приобретает более сложный характер, а число и масштабы мероприятий растут. Помимо своих первоначальных обязанностей теперь КЕОС занимается рассмотрением уже утвержденных требований, выдвинутых внешними организациями, тесно сотрудничает с другими органами по координации спутниковых наблюдений (такими как КГМС) и продолжает играть роль основной площадки для международной координации космических наблюдений за Землей.

За последние три десятилетия КЕОС внес значительный вклад в развитие усилий специалистов по космическим наблюдениям за Землей. Пленарные заседания КЕОС позволяют учреждениям КЕОС регулярно общаться, сотрудничать и обмениваться информацией о деятельности в области наблюдений за Землей. Такая международная координация стимулировала полезные партнерства, такие как Комплексная стратегия глобальных наблюдений (КСГН), а КЕОС сыграла влиятельную роль в создании и постоянном развитии Группы по наблюдениям за Землей (ГЕО) и Глобальной системы систем наблюдения за Землей (ГЕОСС). Действительно, КЕОС занимается координацией космического сегмента ГЕОСС. Учреждения КЕОС вместе работают над запуском совместных межведомственных спутниковых программ, причем такие коллективные усилия становятся основным принципом разработки спутниковых программ наблюдений за Землей. КЕОС также выступает в качестве надежного канала связи с внешними организациями, что позволяет КЕОС понимать потребности и требования этих организаций в области наблюдения за Землей, а затем принимать соответствующие меры.

КЕОС обеспечивает международную координацию возможностей и активов отдельных учреждений КЕОС. Основополагающим принципом всех таких координационных усилий является демонстрация целесообразности и пользы постоянных космических наблюдений за Землей, особенно для удовлетворения потребностей заинтересованных сторон. Если говорить более конкретно, то его координационная деятельность охватывает как уже существующие, так и будущие системы спутникового наблюдения и направлена на обеспечение их взаимодополняемости и полного соответствия требованиям заинтересованных сторон.

Для осуществления внутренней координации КЕОС использует различные механизмы. На рабочем уровне эта координация обычно обеспечивается за счет объединения усилий нескольких рабочих групп (для координации инфраструктурных и междисциплинарных вопросов) и использования нескольких виртуальных группировок спутников (для координации тематических/профильных направлений). Кроме того, в зависимости от обстоятельств, эти постоянные, механизмы КЕОС рабочего уровня могут быть подкреплены специальными мерами по осуществлению конкретных, более краткосрочных мероприятий.

К пяти упомянутым рабочим группам относятся (http://ceos.org/ourwork/workinggroups/):

a) РГПД: Рабочая группа по созданию потенциала и распространению данных;

b) РГКл: Рабочая группа КЕОС/КГМС по климату;

c) РГКВ: Рабочая группа по калибровке и валидации;

d) РГБ: Рабочая группа по бедствиям;

e) РГИСО: Рабочая группа по информационным системам и обслуживанию.

В настоящее время существует семь виртуальных группировок спутников (http://ceos.org/ourwork/virtual-constellations/):

a) состав атмосферы;

b) съемка поверхности суши;

c) топография поверхности океана;

d) атмосферные осадки;

e) радиометрические наблюдения за цветностью океана;

f) наблюдения за векторами приво́дного ветра ;

g) наблюдения за температурой поверхности моря.

В тех случаях, когда рабочих групп и виртуальных группировок спутников недостаточно, КЕОС может сформировать специальную команду (см. https://ceos.org/ourwork/ad-hoc-teams/).

7.3 ПЛАНИРОВАНИЕ СПУТНИКОВЫХ ПРОГРАММ НАБЛЮДЕНИЙ

7.3.1 Срок эксплуатации спутниковой программы

В соответствии с хорошо зарекомендовавшими себя методами управления программами/проектами, мероприятия, проводимые в течение всего периода действия спутниковой программы/проекта, делятся на стадии.

На каждой стадии программа/проект переходит с одного этапа на другой и, как правило, завершается официальным обзором.

Точная терминология, используемая организацией, занимающейся разработкой спутника, может отличаться, но обычно в ходе своего жизненного цикла спутниковая программа/проект проходит следующие стадии[1]:

– стадия 0: определение требований пользователей с привлечением сообщества пользователей и определение требований к космическому аппарату, т. е. выбор возможных технических средств для выполнения требований пользователей;

– стадия A: техническое предложение на системном уровне (включая предварительную спецификацию наземного сегмента) и ответственные приборы (возможно, включая моделирование работы приборов); оценка приблизительного порядка величины расходов на программу;

– стадия B: предварительное проектирование, подготовительная деятельность (включая мероприятия по осуществлению испытаний с установкой на летательных аппаратах), подробная оценка необходимых затрат;

– стадия C: рабочее проектирование и разработка и испытание всех систем (включая наземный сегмент) и подсистем;

– стадия D: сведение в единое целое всех подсистем, испытания всего спутника, стартовая кампания и ввод в эксплуатацию на орбите;

[1] См. ECSS-M-ST-10C Rev.1 (Space Project Management: Project Planning and Implementation), page 19, “Project Phasing”.

– стадия E: этап эксплуатации;

– стадия F: послеэксплуатационный период, включающий в себя окончательную консолидацию данных по полезной нагрузке, полученных после схода спутника с орбиты, для их дальнейшего размещения в долгосрочных архивах.

В случае более масштабных спутниковых программ/проектов продолжительность стадий от 0 до D может достигать 15 лет (например, для более крупного геостационарного спутника продолжительность стадии 0 может занимать 3—4 года, стадии A — ~ 2 года, стадии B — ~ 2 года, стадии C — ~ 5 лет, а стадии D — 1—2 года). В случае же спутниковых программ/проектов меньшего масштаба продолжительность стадий от 0 до D может составлять всего 1—2 года.

Этап эксплуатации (стадия E) может длиться от нескольких месяцев для низкоорбитального спутника до нескольких лет для геостационарной спутниковой программы. Например, для оперативных программ, включая запуск серии из трех или четырех спутников с некоторым перекрытием на случай нештатной ситуации стадия эксплуатации может быть рассчитана на 15 или более лет (обычно срок эксплуатации низкоорбитального спутника составляет пять лет, а геостационарного спутника — 7 лет). Стадия F в основном завершается через 3—5 лет после схода с орбиты.

В целом, продолжительность эксплуатации поколения спутников является следствием компромисса между необходимостью окупить расходы на разработку программы и накопить опыт использования полученных данных и необходимостью разработать новое поколение спутниковых приборов для того, чтобы воспользоваться преимуществами самых современных технологий.

В организации спутниковой программы принимает участие множество заинтересованных сторон: сообщество пользователей данных, научно-исследовательские институты, космические агентства в части проведения научных исследований и опытно-конструкторских разработок, промышленность и правительственные учреждения с учетом их промышленной политики и бюджетных ограничений.

В случае спутниковых программ с глобальным охватом обязательно должна осуществляться координация с международными партнерами, что может еще больше усложнить процесс принятия решений.

7.3.2 Планирование с целью обеспечения непрерывности наблюдений и на случай непредвиденных ситуаций

Непрерывность наблюдений была важнейшим требованием для метеорологических спутниковых группировок на геостационарной орбите с тех пор, как прогнозы текущей погоды и явлений суровой погоды, включая предупреждения о тропических циклонах, стали опираться на данные мониторинга со спутников. Оперативная непрерывность поступления полученных с геостационарных спутников изображений предусматривает круглосуточный режим работы, высокую степень доступности, распространение данных почти в реальном масштабе времени и долгосрочную непрерывность наблюдений, гарантированную надежными программами, которые включают в себя возможности поддержки для орбитальных резервных средств.

Когда была создана полярно-орбитальная спутниковая группировка, и модели численного прогнозирования погоды стали полагаться все в большей степени на спутниковые данные об излучении (инфракрасном и микроволновом), радиозатменные данные, а также другие основные виды спутниковых наблюдений, таких как наблюдения за ветром у поверхности моря и в верхних слоях атмосферы (например, векторы атмосферного движения), такие же требования к оперативной непрерывности наблюдений стали применяться в отношении утренних и полуденных спутников, составляющих ядро группировки метеорологических спутников на полярной орбите.

Одновременно со спутниковыми операторами, обязавшимися поддерживать функционирование геостационарной и полярной солнечно-синхронной группировок спутников, КГМС подготовила Глобальный план на случай непредвиденных ситуаций (см. раздел 7.2.1 и вставку внизу), обеспечивающий техническую и юридическую рамочную основу для принятия мер в случае непредвиденных обстоятельств, которые предусматривают реализацию принципа «окажи помощь своему соседу» в случае отсутствия одного из элементов оперативной конфигурации.

Для геостационарных спутников поддержка при возникновении непредвиденной ситуации может быть оказана в том случае, если имеется достаточно большое количество спутников, и их номинальное местоположение на орбите находится на равном расстоянии друг от друга вдоль линии экватора (см., например, том IV, глава 4, рисунок 4.1), чтобы полностью покрывать более низкие широты. Перемещение спутника с одной долготы на другую требует расходования небольшого количества топлива, если движение осуществляется на малой скорости. В соответствии с планами на случай непредвиденных обстоятельств несколько спутников поддерживается на резервных позициях на орбите, и можно переместить спутник для заполнения пробела путем совершения маневра в течение нескольких дней или недель, в зависимости от срочности и наличия топлива на борту спутника. Было несколько примеров такого замещения: спутник Meteosat-3 был перемещен для заполнения пробела на орбите над западной частью Атлантического океана, когда система геостационарных оперативных спутников для исследования окружающей среды (GOES) недосчиталась спутника из-за проблемы с запуском на орбиту в начале 1990-х годов (de Waard et al., 1992); резервный спутник GOES заполнил пробел на орбите над западной частью Тихого океана во время переходного периода от геостационарного метеорологического спутника (ГМС) к многофункциональному транспортному спутнику (MTCAT) в начале 2000-х годов; над Индийским океаном закрывалась позиция в последние двадцать лет резервными спутниками Meteosat; а с 2018 года спутник Фэнъюнь (FY) также обеспечивал покрытие в Индийском океане, предоставляя данные наблюдений глобальным пользователям.

Планирование КГМС с целью обеспечения непрерывности наблюдений и на случай непредвиденных ситуаций

Принятая КГМС базовая конфигурация содержит долгосрочные обязательства спутниковых операторов, принятые ими для реализации Перспективного видения ИГСНВ и касающиеся измерений, орбит и обслуживания. Базовая конфигурация определяет i) геостационарную группировку по меньшей мере из шести спутников, расположенных на долготах, находящихся на значительном расстоянии друг от друга (приблизительно 135° з. д., 75° з. д., 0°, 76° в. д., 105° в. д., 140° в. д.), и выполняющих ряд согласованных задач; ii) главную метеорологическую спутниковую группировку на полярной солнечно-синхронной орбите, представляющую данные в виде снимков и данные зондирования с трех орбитальных плоскостей (ранним утром, в середине утра и днем); iii) различные группировки, предназначенные для дополнительных программ, с размещением спутников на солнечно-синхронных или наклоненных низких околоземных орбитах. Рабочая группа КГМС по планированию для обеспечения непрерывности наблюдений и на случай нештатных ситуаций постоянно проводит анализ осуществления базовой конфигурации, наличия на орбите резервных спутников и рисков прерывания главных программ наблюдения.

Координационная группа по метеорологическим спутникам приняла Глобальный план на случай непредвиденных ситуаций, который включает в себя руководящие указания для обеспечения непрерывности наблюдений, например в отношении реализации политики поддержания на орбите резервных ресурсов и осуществления повторного запуска спутника, набор критериев для введения в действие режима на случай нештатных ситуаций, и устанавливает перечень действий, которые должны быть предприняты в таких непредвиденных ситуациях. В частности, Глобальный план на случай непредвиденных ситуаций устанавливает стандартную процедуру для перемещения резервного геостационарного спутника на место выбывшего спутника, которая известна как стратегия «оказания помощи своему соседу». Этот глобальный план дополняется двусторонними соглашениями между операторами геостационарных спутников на случай нештатных ситуаций. В ряде случаев за последние три десятилетия подобные передислокации спутников при нештатных ситуациях имели существенное значение для сохранения непрерывности наблюдений с крайне необходимых оперативных космических аппаратов.

Для спутников, расположенных на солнечно-синхронных орбитах, реализация действий на случай непредвиденных ситуаций является более сложной задачей. Изменение плоскости орбиты спутника требует очень большого количества топлива и поэтому не предусматривается, если не считать естественного дрейфа плоскости орбиты из-за прецессии или маневрирования с целью корректировки такого дрейфа и удержания спутника на орбите. Поэтому план на случай непредвиденных ситуаций нацелен на обеспечение наличия резервных спутников в каждой орбитальной плоскости наряду с равномерным распределением этих плоскостей по времени пересечения экватора, а также на использование автономных научно-исследовательских спутников, которые могут помочь устранить пробелы и обеспечить дополнительное дублирование.

Сфера деятельности оперативной космической системы наблюдений, изложенная в Перспективном видении ИГСНВ, в настоящее время включает в себя поддержку мониторинга климата, отражая тем самым как потребности в мониторинге климата на постоянной основе, так и уровень развития космических систем, которые становятся достаточно точными для осуществления мониторинга климата.. В ответ на это КГМС последовательно сформулировала и одобрила новую базовую конфигурацию, которая объединила в себе ряд спутниковых программ климатической направленности. Непрерывность климатического мониторинга столь же важна, как и для оперативного прогнозирования погоды; однако требования к наблюдениям различаются, поскольку климатический мониторинг затрагивает различные временные масштабы. Во-первых, доступность данных практически в режиме реального времени и краткосрочные пробелы в дневном цикле не являются основными требованиями. Во-вторых, большое значение придается долгосрочной непрерывности и стабильности проведения измерений на протяжении десятилетий. Принципы климатического мониторинга Глобальной системы наблюдений за климатом (ГСНК) требуют систематического перекрытия зон охвата наблюдениями между всеми последовательно расположенными на орбите спутниками для того, чтобы провести взаимные сравнения и обеспечить сопоставимость результатов измерений. Стабильность и сопоставимость полученных данных может быть также достигнута за счет поддержания на орбите одного в высшей степени защищенного контрольного космического аппарата в качестве резерва на орбите, который может служить контрольным эталоном для калибровки всех других (как уже рассматривалось в томе IV, глава 6, 6.1.9). Такой резерв следует рассматривать в качестве главного элемента при определении Архитектуры для мониторинга климата из космоса.

7.3.3 Долгосрочная эволюция

Эволюционирующие потребности пользователей в отношении спутниковых данных и значительный прогресс в развитии космической техники и технологии дистанционного зондирования требуют непрерывного совершенствования спутниковых систем и измерительной аппаратуры.

В то же время острая нехватка ресурсов подчеркивает необходимость стремиться к оптимизации глобальных усилий по обеспечению наличия комплексной системы наблюдений и к тому, чтобы избегать ненужного резервирования ресурсов сверх того, что требуется для обеспечения надежности работы. Для реализации оперативных спутниковых программ закупаются несколько спутников одного типа, что позволяет получить выгоду от эффекта масштаба и тем самым сделать дорогостоящие программы более доступными. Минусом этого необходимого подхода является то, что на протяжении всего срока действия спутниковой программы происходит «замораживание» технологического потенциала. Оптимизация также необходима при разработке, проверке достоверности и непрерывной обработке получаемой продукции и требует обмена данными, оперативной совместимости и обеспечения качества. Глобальная координация под эгидой ВМО направлена на обеспечение такой оптимизации в общем контексте ИГСНВ, опираясь на Регулярный обзор потребностей (https://community.wmo.int/en/rolling-review-requirements-process-legacy-version), руководящие указания высокого уровня, предоставляемые в рамках Концепции развития ГСН, заявления о руководящих принципах в каждой из областей применения и План осуществления эволюции глобальных систем наблюдений, который вобрал в себя рекомендации исполнителям, отвечающим

за осуществление систем наблюдений. Важной инициативой является также Архитектура для мониторинга климата из космоса, поддержанная ВМО, КЕОС и КГМС, с целью обеспечения непрерывного реагирования со стороны космической системы наблюдений на требования к климатическому мониторингу — см. также: https://ceos.org/ourwork/workinggroups/climate/.

СПРАВОЧНАЯ И ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ЛИТЕРАТУРА

Всемирная метеорологическая организация (ВМО). *Всемирный метеорологический конгресс: Сокращенный окончательный отчет восемнадцатой сессии* (ВМО-№ 1236), дополнение к резолюции 37 (Кг-18) «Интегрированная глобальная система наблюдений ВМО» (ИГСНВ). Женева, 2019.

Всемирная метеорологическая организация (ВМО). *Всемирный метеорологический конгресс: Сокращенный окончательный отчет восемнадцатой сессии* (ВМО-№ 1236), резолюция 51 (Кг-18) «Осуществление архитектуры для мониторинга климата из космоса». Женева, 2019.

Achieving Satellite Instrument Calibration for Climate Change (ASIC3); Report of a Workshop Organized by the National Oceanic and Atmospheric Administration, National Institute of Standards and Technology, National Aeronautics and Space Administration, National Polar-orbiting Operational Environmental Satellite System-integrated Program Office, and Space Dynamics Laboratory of Utah State University; Ohring, G., Ed.; National Oceanic and Atmospheric Administration: Washington, DC, 2007.

Bizzarri, B. Satellite Data for Numerical Weather Prediction. *Rivista di Meteorologia Aeronautica* **1982**, *42* (4), 369–382.

Bizzarri, B. Basic Principles of Remote Sensing. In *Proceedings of the Course on Satellite Meteorology and its Extension to Agriculture*; EUMETSAT, EUM P03; Erice, Ed.; 1986; pp. 1–10.

Bizzarri, B.; Tomassini, C. Retrieval of Information from High-resolution Images. In *Proceedings of the Symposium on Meteorological Observations from Space*; Committee on Space Research: Philadelphia, USA, 1976; pp. 140–144.

Chander, G.; Hewison, T. J.; Fox, N. et al. Overview of Intercalibration of Satellite Instruments. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* **2013**, *51* (3), 1056–1080.

Committee on Earth Observation Satellites. *Mission, Instruments and Measurements database online*. http://database.eohandbook.com.

Datla, R. V.; Rice, J. P.; Lykke, K. R. et al. *Best Practice Guidelines for Pre-launch Characterization and Calibration of Instruments for Passive Optical Remote Sensing*; NIST IR 7637; National Institute of Standards and Technology: Gaithersburg, USA, 2009.

de Waard, J.; Menzel, W. P.; Schmetz, J. Atlantic data coverage by METEOSAT-3. *Bulletin of the American Meteorological Society* **1992**, *73*, 977–983. https://doi.org/10.1175/1520-0477(1992)073<0977:ADCB>2.0.CO;2.

Earth Science Reference Handbook; Parkinson, C. L.; Ward, A.; King, M. D., Eds.; NASA Goddard Space Flight Center: Greenbelt, USA, 2006.

European Cooperation for Space Standardization (ECSS). *System Engineering General Requirements*; ECSS-E-ST-10C Rev.1. ECSS, 2017. https://ecss.nl/standard/ecss-e-st-10c-rev-1-system-engineering-general-requirements-15-february-2017/.

European Space Agency, Sharing Earth Observation Resources. Satellite Missions Database. https://earth.esa.int/eogateway/mission.

Fox, N. *QA4EO – A Quality Assurance Framework for Earth Observation: A Guide to "Reference Standards" in Support of Quality Assurance Requirements of GEO;* Greening, M. C., Ed.; QA4EO-QAEO-GEN-DQK-003; Group on Earth Observations: Geneva, 2010. http://www.qa4eo.org/docs/QA4EO-QAEO-GEN-DQK-003_v4.0.pdf.

Joint Committee for Guides in Metrology (JCGM). *International Vocabulary of Metrology – Basic and General Concepts and Associated Terms (VIM)*; JCGM 200:2012; JCGM: Sèvres, France, 2012.

Klein, M.; Gasiewski, A. J. Nadir Sensitivity of Passive Millimeter and Submillimeter Wave Channels to Clear Air Temperature and Water Vapor Variations. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* **2000**, *105* (D13), 17481–17511.

Kramer, H. J. *Observation of the Earth and its Environment – Survey of Missions and Sensors*; Springer: Berlin, 2002.

Menzel, W. P. *Applications with Meteorological Satellites* (SAT-No. 28; WMO/TD-No. 1078). World Meteorological Organization: Geneva, 2001.

National Aeronautics and Space Administration (NASA). *NASA System Engineering Handbook*; NASA SP-2016-6105 Rev2, 2016. https://www.nasa.gov/connect/ebooks/nasa-systems-engineering-handbook.

Tobin, D. C.; Revercomb, H. E.; Knuteson, R. O. et al. Radiometric and Spectral Validation of Atmospheric Infrared Sounder Observations with the Aircraft-based Scanning High-Resolution Interferometer Sounder. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* **2006**, *111* (D09S02). https://doi.org/10.1029/2005JD006094.

Tobin, D. C.; Revercomb, H. E.; Moeller, C. C. et al. Use of Atmospheric Infrared Sounder High-spectral Resolution Spectra to Assess the Calibration of Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer on EOS Aqua. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* **2006**, *111* (D09S05).

World Meteorological Organization. *Observing Systems Capability Analysis and Review (OSCAR) database and tool*. 2014. http://www.wmo-sat.info/oscar/.

World Meteorological Organization (WMO), International Telecommunication Union (ITU). *Handbook on Use of Radio Spectrum for Meteorology: Weather, Water and Climate Monitoring and Prediction*. WMO/ITU: Geneva, 2008.

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

Электронная почта: cpa@wmo.int

wmo.int

JN 211524