

ГЛАВА 4. СПУТНИКОВЫЕ ПРОГРАММЫ

Измерения, описанные в [главе 2](#) настоящего тома, производятся в рамках спутниковых программ¹, 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 (ОСКАР): <https://www.wmo-sat.info/oscar/spacescapabilities>.

4.1 ОПЕРАТИВНЫЕ МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИЕ СПУТНИКИ

Система оперативных метеорологических спутников образует костяк космического компонента Интегрированной глобальной системы наблюдений ВМО (IGCHV). 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.

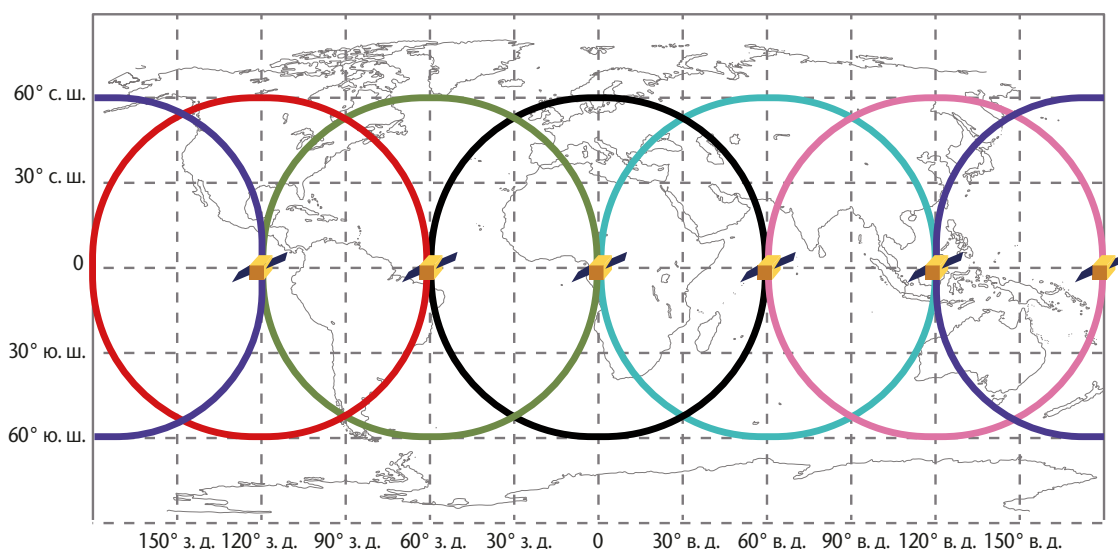


Рисунок 4.1. Зона охвата с шести геостационарных спутников, расположенных на равном расстоянии друг от друга. Окружности стягивает геоцентрический угол 60° , рассматриваемый в качестве практического предела для наблюдений за количественными характеристиками (для использования в целях определения качественных 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 аппаратов, 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:

- информация о вертикальных профилях температуры и влажности, полученная с помощью измерений радиоизлучения и радиозатмений, как важнейший вклад в ЧПП;
- данные наблюдений за облачностью в высоких широтах в дополнение к наблюдениям с ГСО;
- данные наблюдений за осадками с помощью МКВ радиометрии;
- 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

<i>Аббревиатура</i>	<i>Полное название</i>	<i>Ответственная организация</i>	<i>Номинальное расчетное положение</i>
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

- е) данные о ледовом покрове, снеге, гидрологических переменных;
- ф) приземные радиационные переменные (интенсивность излучения, альbedo, фотосинтетически активная радиация, доля поглощаемой в процессе фотосинтеза активной радиации);
- г) 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

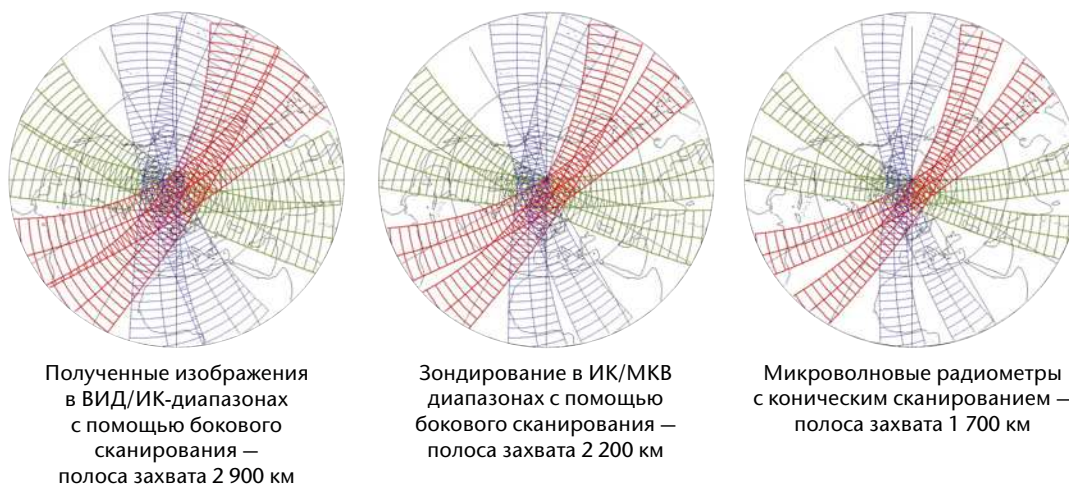


Рисунок 4.2 Охват с трех солнечно-синхронных спутников с высоты 833 км и расположенных на равном удалении друг от друга по времени пересечения экватора (ВПЭ) в 05:30 (нисходящий узел), 09:30 (нисходящий узел) и 13:30 (восходящий узел).

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: сверху слева полоса 2 900 км для космического аппарата, предоставляющего изображения в ВИД/ИК-диапазонах; сверху 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

<i>Аббревиатура</i>	<i>Полное название</i>	<i>Ответственная организация</i>	<i>Высота</i>	<i>Номинальная расчетная ВПЭ</i>
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)	ЯААИ	613 км	13:00 нисходящий узел
Metop	Meteorological Operational Satellite (Метеорологический оперативный спутник)	ЕВМЕТКАТ	817 км	09:30 нисходящий узел
Metop-SG	Meteorological Operational Satellite – Second Generation (Метеорологический оперативный спутник — второе поколение)	ЕВМЕТКАТ	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

ЯААИ = 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 ЕВМЕТСАТ. 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 А-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. А-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 А-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:

- а) 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 ;
- б) 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 (ТОМС), 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

<i>Аббревиатура</i>	<i>Полное название</i>	<i>Ответственная организация</i>	<i>Измерения</i>
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)	ЯАИ	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 приводного ветра. Радиолокационная скаттерометрия началась в 1978 г. Эти наблюдения за температурой поверхности моря, приводным 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

<i>Аббревиатура</i>	<i>Полное название</i>	<i>Ответственная организация</i>	<i>Решаемые океанографические задачи</i>
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 приводным ветром в тропическом циклоне

<i>Аббревиатура</i>	<i>Полное название</i>	<i>Ответственная организация</i>	<i>Решаемые океанографические задачи</i>
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 С- и K_u -диапазонами
GCOM-C	Global Change Observation Mission for Climate (Изучение глобальных изменений для климата)	ЯАИ	Цветность океана
GCOM-W	Global Change Observation Mission for Water (Изучение глобальных изменений для воды)	ЯАИ	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, ЕВМЕТКАТ, 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)	ЕВМЕТКАТ	Приземный ветер с помощью рефлектометра с С-диапазоном

<i>Аббревиатура</i>	<i>Полное название</i>	<i>Ответственная организация</i>	<i>Решаемые океанографические задачи</i>
OceanSat	Satellite for the Ocean (Спутник для изучения Мирового океана)	ИСРО	Цветность океана Приземный ветер с помощью рефлектметра с K_v -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
НСАОС = 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/KNEC 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 цветных 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 цветных 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 Приводный ветер

Приводный 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 приводного ветра, которые предоставляют данные измерений

как скорости, так и направления ветра (с помощью радиолокационного скаттерометра либо с С-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

<i>Аббревиатура</i>	<i>Полное название</i>	<i>Ответственная организация</i>	<i>Цель/характер программы</i>
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

<i>Аббревиатура</i>	<i>Полное название</i>	<i>Ответственная организация</i>	<i>Цель/характер программы</i>
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 наклона
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

КНЕС = 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 Biltan 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.

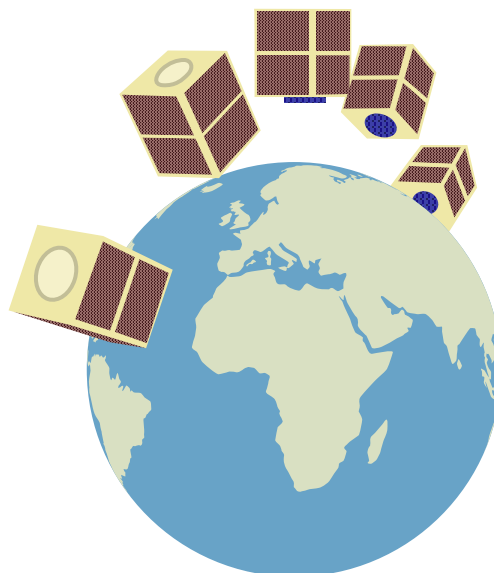


Рисунок 4.5 Концепция ГСМБ, основанная на пяти спутниках со сдвигом по фазе около 20 мин

Таблица 4.6. Спутниковые программы, входящие в ГСМБ и близкие к ней

<i>Аббревиатура</i>	<i>Полное название</i>	<i>Ответственная организация</i>	<i>Технические возможности прибора</i>
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

<i>Аббревиатура</i>	<i>Полное название</i>	<i>Ответственная организация</i>	<i>Технические возможности прибора</i>
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

<i>Аббревиатура</i>	<i>Полное название</i>	<i>Ответственная организация</i>	<i>Частотный диапазон</i>
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	RADARSAT Constellation 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-X)	НАКЦ, Германия	Х-диапазон
TanDEM-X	TanDEM-X (ТанДЕМ-X)	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:

- 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;
- 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 ГСОН;

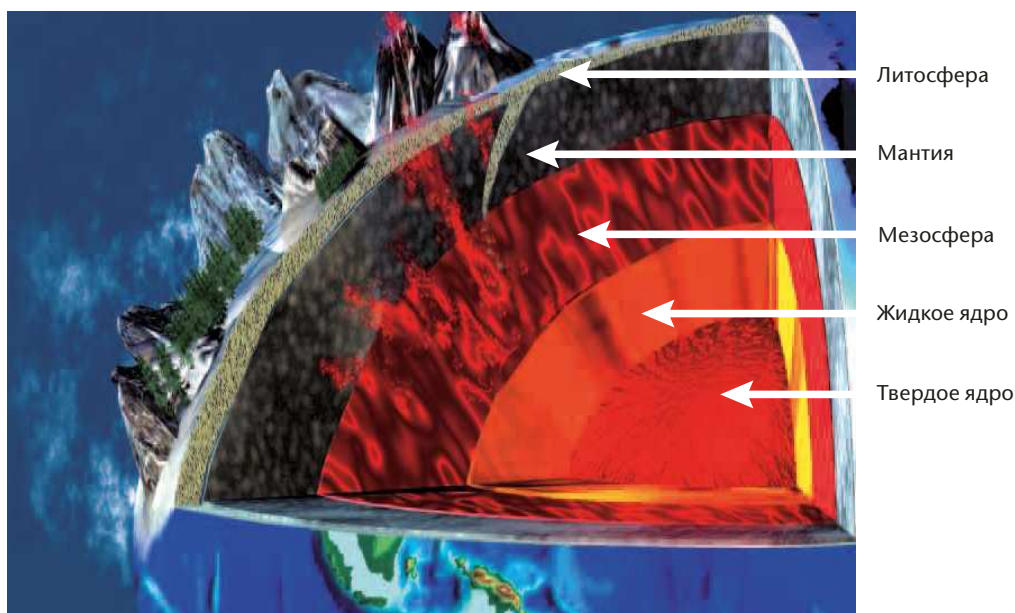


Рисунок 4.6. Стратификация твердой оболочки Земли

- 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

<i>Аббревиатура</i>	<i>Полное название</i>	<i>Ответственная организация</i>	<i>Системы датчиков</i>
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 геодинимических 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.

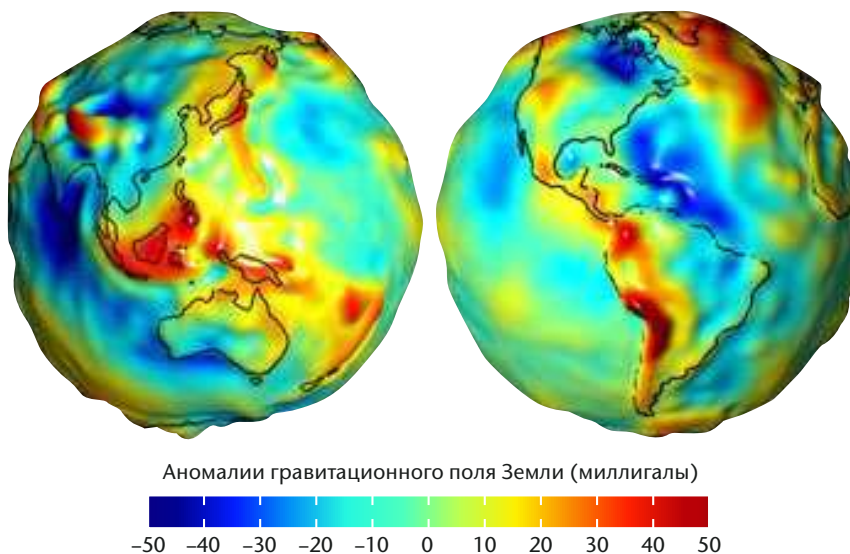


Рисунок 4.7. Трехмерное наглядное представление геоидальных высот. Единицы: мГал (1 Гал = 0,01 м/с² и 1 мГал $\approx 10^{-6} g_0$)

Мониторинг космической погоды включает 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 (СТЕРЕО): 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

<i>Аббревиатура</i>	<i>Полное название</i>	<i>Ответственная организация</i>	<i>Орбита</i>
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))	ЯАИ	НОО, солнечно-синхронная
IRIS	Interface Region Imaging Spectrograph (Спектрограф для отображения граничной области)	НАСА	НОО, солнечно-синхронная
Picard	Picard	КНЕС	НОО, солнечно-синхронная

<i>Аббревиатура</i>	<i>Полное название</i>	<i>Ответственная организация</i>	<i>Орбита</i>
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 наклона
SDO	Solar Dynamics Observatory (Обсерватория солнечной динамики)	НАСА	Геосинхронная, с малым углом наклона
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 наклона
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 а) и б)) 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.

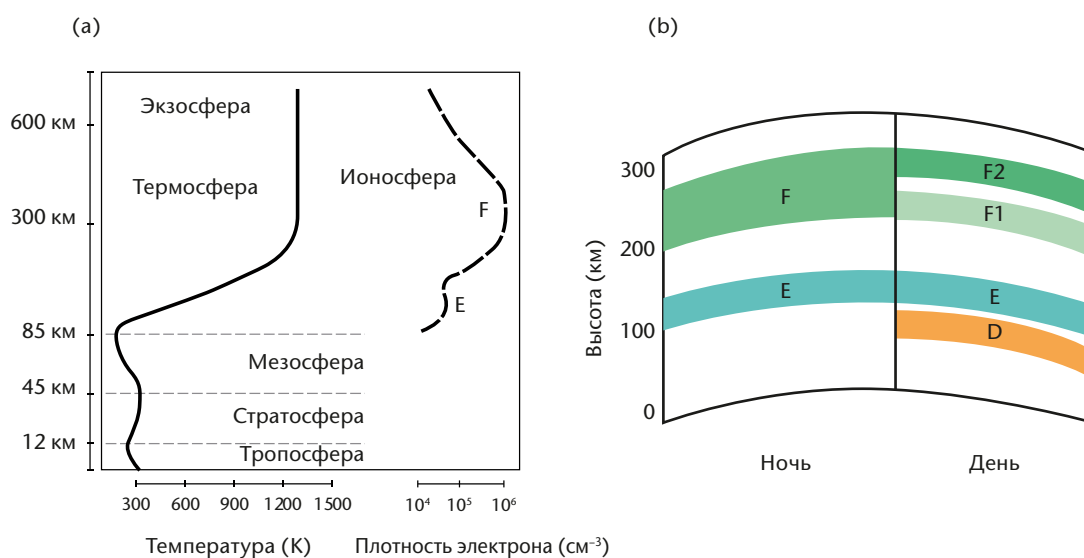


Рисунок 4.8. а) Стратификация атмосферы ниже и выше мезопаузы; б) уровни большей концентрации электронов. Самая высокая концентрация в слое F2, днем и ночью.

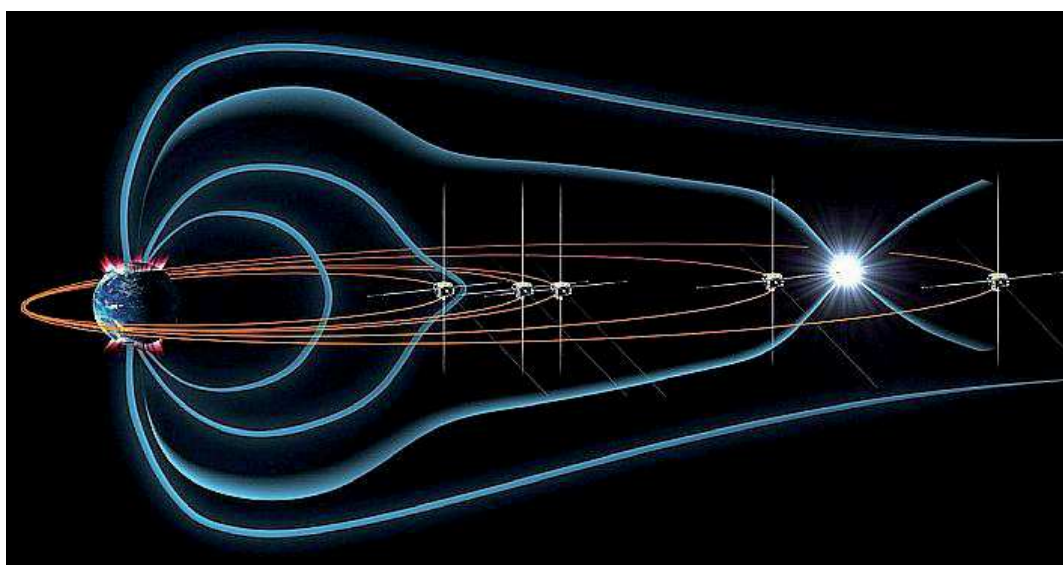


Рисунок 4.9. Орбиты пяти спутников THEMIS в магнитосфере. Белая вспышка показывает высвобождение энергии в результате магнитосферной суббури.

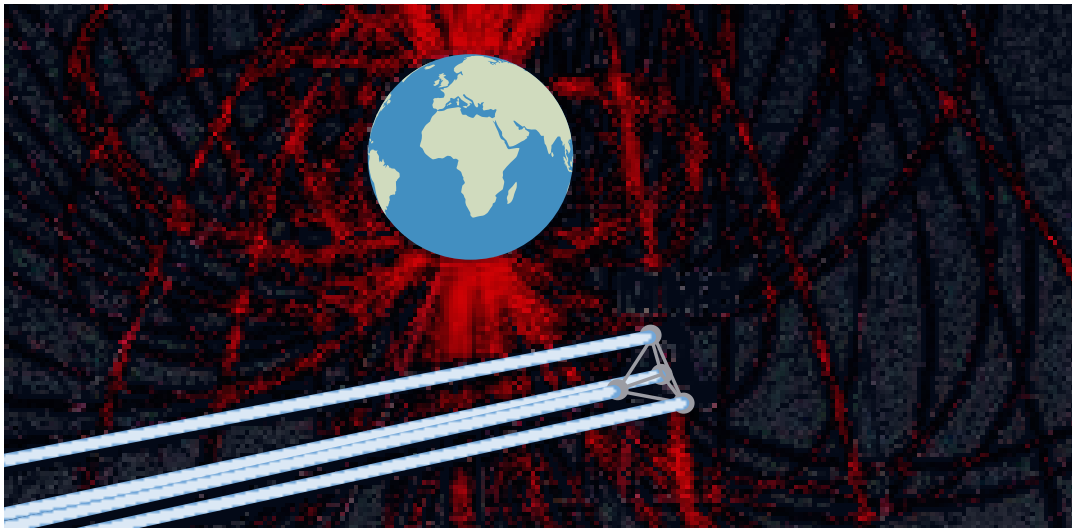


Рисунок 4.10. Четыре спутника MMS, входящих в группировку. Четырехгранная схема для захвата трехмерной (3-D) структуры встречающихся узлов перезамыкания.

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

<i>Аббревиатура</i>	<i>Полное название</i>	<i>Ответственная организация</i>	<i>Орбита</i>
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 наклона

<i>Аббревиатура</i>	<i>Полное название</i>	<i>Ответственная организация</i>	<i>Орбита</i>
CASSIOPE	Cascade SmallSat and Ionospheric Polar Explorer (Каскад малых спутников и спутник для исследования ионосферы над полярными регионами)	ККА	Высокоэллиптическая, с большим углом наклона, на относительно малой высоте
Cluster (4 спутника)	Cluster	ЕКА, НАСА	Высокоэллиптическая, с полярным углом наклона, четырехгранная спутниковая группировка
Geotail	Geotail	ЯАИ, НАСА	Экстремальноэллиптическая, с малым углом наклона, пересекающая орбиту Луны
IBEX	Interstellar Boundary Explorer (Исследователь межзвездных границ)	НАСА	Высокоэллиптическая, с малым углом наклона
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 наклона
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 наклона, 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 наклона, 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»

<i>Аббревиатура</i>	<i>Полное название</i>	<i>Ответственная организация</i>	<i>Орбита</i>
VAP (2 спутника)	Van Allen Probe (Зонд Вана Аллена, бывшая РБСП — программа зондов для изучения радиационного пояса)	НАСА	Высокоэллиптическая, с малым углом наклона, 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:

- Ørsted: феррозондовый векторный магнитометр (ФВМ) и скалярный магнитометр Оверхаузера (СМО);
- SAC-C: прибор для картирования магнитных полей/Ørsted-2 (MMS/Ørsted-2);
- CHAMP: магнитометрическая приборно-агрегатная система (МИАС);
- 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:

- общего содержания электронов (ОСЭ);
- 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 ГСОН 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

<i>Серии спутников</i>	<i>Аппаратура для проведения мониторинга in situ космической среды</i>
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	ГТАК-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 <i>in situ</i> 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 ГГAK-М (ГГAK-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)