

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. 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, но некоторые из них достигают стадии полного оперативного развития и вносят вклад в непрерывные наблюдения за компонентами окружающей среды, особенно когда у них продлевается срок работы на орбите и/или они переводятся в режим оперативной работы. 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. Международная координация деятельности между операторами спутников осуществляется в рамках Координационной группы по метеорологическим спутникам, первоочередной задачей которой является поддерживать группировки оперативных спутников в интересах метеорологии и мониторинга климата, и Комитета по спутниковым наблюдениям за Землей, который инициировал создание «виртуальных группировок» с тематическими задачами (топография поверхности океана, осадки, состав атмосферы, формирование изображений поверхности суши, вектор ветра на поверхности моря, радиометрия цветности океана и температура поверхности моря).

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.

4.1 ОПЕРАТИВНЫЕ МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИЕ СПУТНИКИ

Система оперативных метеорологических спутников образует костяк космического компонента ГСН. Он разделяется на два компонента в соответствии с характеристиками орбиты:

¹ Подробное описание этих программ имеется в интерактивном режиме в базе данных ВМО о возможностях космического компонента наблюдений, которая регулярно обновляется.

- a) группировка спутников на геостационарной или сильно вытянутой эллиптической орбите;
- b) группировка спутников на солнечно-синхронных орбитах.

4.1.1 **Спутниковая группировка на геостационарной или сильно вытянутой эллиптической орбите**

Геостационарная орбита 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, при условии, что не потребуется очень высокое пространственное разрешение (порядка 1 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);
- b) профилем температуры и влажности для мониторинга атмосферной устойчивости;
- c) ветром по отслеживанию перемещения облачности и за распределением водяного пара (включая измерение профиля ветра путем отслеживания перемещения профиля водяного пара);
- d) конвективными осадками (в сочетании с данными в МКВ-диапазоне, полученными со спутников на НОО, и обнаружением молний);
- 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.

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 в 2012 г. и их номинальное расчетное положение на орбите. Другие местоположения могут использоваться на временной основе, например в нештатных ситуациях.

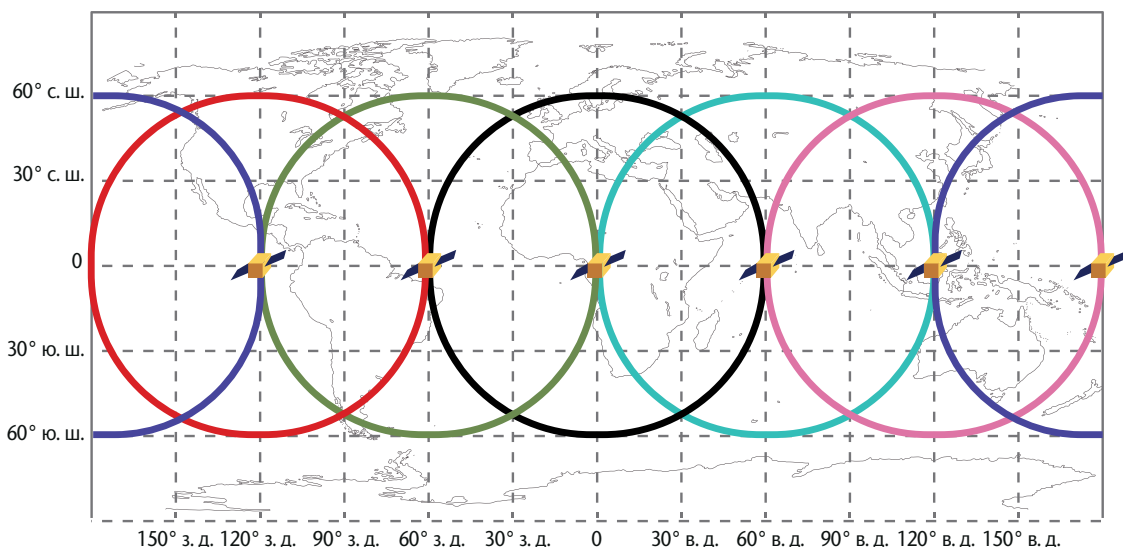


Рисунок 4.1. Зона охвата с шести геостационарных спутников, расположенных на равном расстоянии друг от друга. Окружности стягивает геоцентрический угол 60° , рассматриваемый в качестве практического предела для наблюдений за количественными характеристиками (для использования в целях определения качественных характеристик изображения фактически охватывают больший район). Все широты между 55° ю. ш. и 55° с. ш. охвачены наблюдениями.

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:

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

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	Geostationary Operational Environmental Satellite (Геостационарный оперативный спутник для изучения окружающей среды)	НУОА	75° з. д. и 135° 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	86,5° 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)	Японское метеорологическое агентство	140° в. д.

Примечание:
ЕВМЕТСАТ — Европейская организация по эксплуатации метеорологических спутников
ИСРО — Индийская организация по космическим исследованиям
КМА — Корейская метеорологическая администрация
КМУ — Китайское метеорологическое управление

местному солнечному времени при условии, что полоса захвата прибора достаточно 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.

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 по восходящей орбите
Suomi-NPP	Suomi National Polar-orbiting Partnership (Суоми — Национальное полярно-орбитальное партнерство)	НУОА	833 км	13:30 по восходящей орбите
JPSS	Joint Polar Satellite System (Объединенная полярная спутниковая система)	НУОА	833 км	13:30 по восходящей орбите
DMSP	Defense Meteorological Satellite Program (Программа метеорологических спутников Минобороны США)	МО США	833 км	05:30 по нисходящей орбите
Metop	Meteorological Operational Satellite (Метеорологический оперативный спутник)	EBMETCAT	817 км	09:30 по нисходящей орбите
Metop-SG	Meteorological Operational Satellite – Second Generation (Метеорологический оперативный спутник — второе поколение)	EBMETCAT	817 км	09:30 по нисходящей орбите
FY-3	Feng Yun 3 (Фен-Юн-3)	КМУ	836 км	10:00 по нисходящей орбите и 14:00 по восходящей орбите
Метеор-М	Метеор серии «М»	Росгидромет	830 км	09:30 по нисходящей орбите и 15:30 по восходящей орбите
Метеор-МП	Метеор серии «МП»	Росгидромет	830 км	09:30 по нисходящей орбите и 15:30 по восходящей орбите

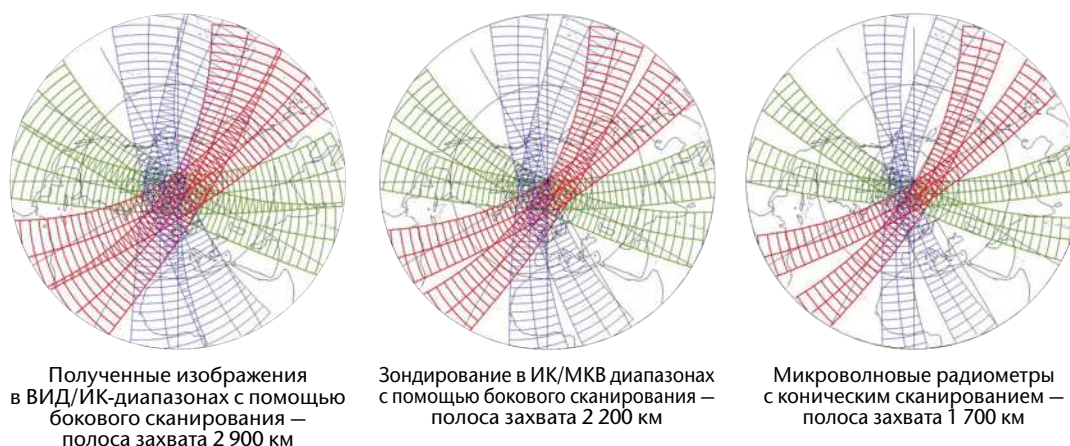


Рисунок 4.2 Охват с трех солнечно-синхронных спутников с высоты 833 км и расположенных на равном удалении друг от друга по времени пересечения экватора (ВПЭ) в 05:30 по нисходящей орбите, 09:30 по нисходящей орбите и 13:30 по восходящей орбите. Для построения этой схематической диаграммы допускается, 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.

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.

TRMM позволил разработать концепцию ГПМ, которая осуществляется в международном масштабе. 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 радиолокатором для измерения осадков, позволяет «откалибровать» все другие данные измерений с помощью пассивных радиометров, когда орбиты спутников группировки и основной лаборатории пересекаются между собой. Кроме спутниковых программ,

специально предназначенных для наблюдений за осадками, любой оперативный космический аппарат, снабженный МКВ-радиометрами, может вносить вклад в эту комплексную систему.



Рисунок 4.3. Концепция Программы глобальных измерений осадков

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. Однако осуществление оперативных систем продвигается медленно. Одной из трудностей является то, что полезный груз, несмотря на небольшую массу, производительность и скорость передачи данных (см., к примеру, описание GRAS в настоящем издании, глава 3, 3.2.7, таблица 3.23), определяет объемные ограничения по размещению на платформе (две большие антенны, примерно $0,5 \text{ м}^2$ каждая, требующие беспрепятственного продольного обзора вдоль оси спутника вперед и назад). Другая трудность заключается в том, что этот метод требует значительного количества спутников на разных орбитах.

Концепция радиозатменных измерений была продемонстрирована в космическом пространстве в 1995 г. Глобальной системой определения местоположения/метеорология (ГСОМ/MET) на аппарате МикроЛаб-1. С тех пор поддерживается созданная группировка радиозатменных приемных устройств, изначально для климатологических целей, чтобы обеспечить «абсолютные» результаты измерений, которые могут сопоставляться для любого интервала времени для выявления климатических трендов, затем также для зондирования с высоким вертикальным разрешением в интересах ЧПП и для эталонных измерений, корректирующих систематические погрешности других систем зондирования.

Радиозатменное измерение является нечастым событием. При эксплуатации группировки ГНСС и отслеживании затмений при восходе и закате Солнца может быть зарегистрировано около 500 случаев затмения в день. Помимо давно поддерживаемых группировок ГСОМ и ГЛОНАСС, третья группировка Compass (называемая в Китае Beidou) эксплуатируется Китаем и четвертая группировка Galileo в настоящее время осуществляется Европейской комиссией (ЕК) и Европейским космическим агентством (ЕКА). Количество затмений в день на спутник повысилось до 1 000 за счет эксплуатации двух группировок спутников и до 1 500 с тремя группировками, если получают данные по измерениям в режиме как вперед, так и назад. Подсчитано, что для обеспечения

глобального охвата со средним замером в 300 км каждые 12 часов, потребуется разместить минимум 12 спутников, должным образом распределенных на орбитальных плоскостях. Одним из очень эффективных решений является использование групп небольших специальных спутников, размещенных на орбите одним запуском ракеты. COSMIC состоит из шести микро-спутников, выведенных на орбиту одним разом и впоследствии разведенных на равноудаленное друг от друга расстояние на орбитах. Несколько метеорологических спутников несут также самостоятельные радиозатменные приемники ГНСС.

4.2.3 Атмосферная радиация

Ограничением моделей ЧПП и общей циркуляции является представление радиационных процессов в атмосфере. Аэрозоли; характеристики процессов, происходящих внутри облака (в особенности, льдообразование); радиационные потоки в трехмерной атмосфере наряду с процессами на ВГА и поверхности Земли являются их главными факторами. Измерение некоторых из этих переменных требует габаритных приборов для наблюдений (лидар, радиолокатор облачности и др.), что нереализуемо для многоцелевых оперативных метеорологических спутников, таким образом, наблюдение за атмосферной радиацией осуществляется с помощью комплекса приборов, установленных на оперативных спутниках или на специальных космических аппаратах.

Атмосферная радиация являлась первой переменной, наблюдение за которой было выполнено из космоса в октябре 1959 г. со спутника Explorer VII. Во время первых полетов спутников TIROS планетарное альbedo Земли было плохо изучено. Позднее были разработаны приборы, использующие принципы мультиобзорного, мультиполяризационного и мультиспектрального зондирования, первым из которых был прибор для определения поляризации и направленности отражений от поверхности Земли (POLDER), установленный на усовершенствованном спутнике для наблюдений за Землей-1 (ADEOS-1, 1996–1997 гг.).

Наблюдение за атмосферной радиацией требует параллельного наблюдения за отдельными факторами, вносящими вклад в радиационный баланс. Поскольку



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)) будет заменен на OCO-2 и был добавлен спутник Программы по наблюдению глобального изменения (Global Change Observation Mission for Water - 1 (GCOM-W1)).

радиационный баланс незначительно различается при больших количественных значениях, погрешности пространственно-временной совместной регистрации оказывают большое влияние на точность измерений. Так как невозможно разместить все приборы на одной платформе, реализуется концепция группового полета, такого как А-каскад (рисунок 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 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 было ограничено определением общего содержания в столбе воздуха нескольких парниковых газов. КВ-приборы изначально предназначались для измерения озона и ряда веществ в ультрафиолетовом УФ- и ВИД-диапазонах;
- b) некоторые космические программы по изучению химического состава атмосферы осуществлялись с помощью больших многоцелевых платформ или спутников, специально разработанных для изучения химического состава атмосферы.

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.

Следует отметить, что отсутствие аппаратуры для лимбового зондирования на будущих спутниках ставит под угрозу наблюдения за верхними слоями 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 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. Уровень

зависит от трассера и измеряется с ограниченной точностью. 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.

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>
Envisat	Environmental Satellite (Спутник для наблюдения за окружающей средой)	ЕКА	Лимбовые в ИК-диапазоне, надирные и лимбовые в КВ-диапазоне, звездно-затменные в УФ/ВИД-диапазонах
EOS Aura	Earth Observation System – Aura (Система наблюдения за Землей — Аура)	НУОА	Лимбовые в ИК-диапазоне, надирные и лимбовые в ИК-диапазоне, надирные в УФ/ВИД-диапазонах, МкВ лимбовые в МКВ-диапазоне
GOSAT	Greenhouse Gas Observing Satellite (Спутник для наблюдений за парниковыми газами)	ЯААИ	Надирные в ПИК/КВИК/СВИК/ТИК-диапазонах
Odin	Спутник Odin	ШНКС	Лимбовые в УФ/ВИД/ПИК-диапазонах, лимбовые в МКВ-диапазоне
OCO-2	Orbiting Carbon Observatory (Орбитальная обсерватория для наблюдений за углеродом)	НАСА	Надирные в ПИК/КВИК-диапазонах
SCISAT	Scientific Satellite (Спутник для научных целей)	ККА	Солнечно-затменные в УФ/ВИД/ПИК 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/ПИК-диапазонах
Sentinel-5P	Sentinel 5 precursor (Предшественник Sentinel-5)	ЕКА, ЕК	Надирные в УФ/ВИД/ПИК/КВИК-диапазонах
Sentinel-5	Sentinel 5 on Metop Second Generation (Sentinel-5 на Metop второго поколения)	ЕКА, ЕВМЕТСАТ, ЕК	Надирные в КВ-диапазоне

Примечание:

ККА = канадское космическое агентство

НАСА = Национальное управление по аэронавтике и исследованию космического пространства

ШНКС = Шведский национальный космический совет

ЯААИ = Японское агентство аэрокосмических исследований

БИК = ближний инфракрасный диапазон

КВИК = коротковолновый инфракрасный (диапазон волн)

СВИК = средневолновый инфракрасный диапазон

ТИК = тепловой инфракрасный спектр

Проводились эксперименты с целью демонстрации отслеживания атмосферных вихрей, аэрозолей и молекул с помощью доплеровского лидара, способного обеспечить измерения с очень высоким вертикальным разрешением при ясном небе. Это область исследований ADM -ALADIN.

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 TIDI (доплеровский интерферометр TIMED) 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 дополнили возможности измерения температуры поверхности моря и ледового покрова в любых погодных условиях и дополнили возможности по определению скорости ветра у поверхности моря. Радиолокационная скаттерометрия началась в 1978 г. Эти наблюдения за температурой поверхности моря, ветром у поверхности моря 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)	КМА	Цветность океана с ГСО
Coriolis	Спутник Coriolis	Минобороны США, НАСА	Приземный ветер с помощью МКВ поляриметрии
CryoSat	Cryosphere Satellite (Спутник для изучения криосферы)	ЕКА	Лед с помощью радиолокационной альтиметрии
Envisat	Environmental Satellite (Спутник для изучения окружающей среды)	ЕКА	Цветность океана Радиолокационная альтиметрия

<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	Многоцелевое МКВ изображение (большая антенна) 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)	ЯАИИ	Цветность океана
GCOM-W	Global Change Observation Mission for Water (Изучение глобальных изменений для воды)	ЯАИИ	Многоцелевое МКВ изображение (большая антенна)
GEO-KOMPSAT	Корейский геостационарный многоцелевой спутник	КМА	Цветность океана с ГСО
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	Ice, Cloud and Land Elevation Satellite (Спутник для изучения льда, облачности и возвышения суши)	НАСА	Лед с помощью лидарной альтиметрии
JASON	Joint Altimetry Satellite Oceanography Network (Совместная сеть спутников для альтиметрии в интересах океанографии)	НАСА, КНЕС, ЕУМ, НУОА	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

<i>Аббревиатура</i>	<i>Полное название</i>	<i>Ответственная организация</i>	<i>Решаемые океанографические задачи</i>
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 С-диапазоном
OceanSat	Satellite for the Ocean (Спутник для изучения Мирового океана)	ИСПО	Цветность океана Приземный ветер с помощью рефлектометра с К _u -диапазоном
SAC-D/Aquarius	Satélite de aplicaciones científicas – D (Спутник для научных исследований-D)	НАСА, КОНАЕ	Соленость океана (антенна с реальной апертурой)
SARAL	Satellite with Argos and AltiKa (Спутники с АРГОС и Алтика)	КНЕС, ИОКИ	Радиолокационная альтиметрия
Sentinel-3	Sentinel-3	ЕКА, ЕС, ЕУМ	Цветность океана Радиолокационная альтиметрия
SMOS	Soil Moisture and Ocean Salinity (Влагосодержание в почве и соленость океана)	ЕКА	Соленость океана (антенна с синтезированной апертурой)
Suomi-NPP	Suomi National Polar-orbiting Partnership (Национальное полярно-орбитальное партнерство)	НАСА, НУОА, Минобороны США	Цветность океана

Примечание:

КАКТ = Китайская академия космических технологий

КМУ = Китайское метеорологическое управление

КНЕС = Национальный центр космических исследований (Франция)

КОНАЕ = Космическое агентство Аргентины

МО США = Министерство обороны США

НСОАС = Национальное спутниковое прикладное океаническое обслуживание (Китай)

4.3.1 Топография океана

Изучение топографии поверхности океана является базовой задачей для океанографии, поскольку она позволяет понять сущностные причины и взаимосвязи в системе крупномасштабной циркуляции океана, что является главной океанографической характеристикой и базовым компонентом климатической системы. Реконструкция топографии океана также включает в себе точное определение геоида, аналитическую информацию в области изучения твердой оболочки Земли.

Радиолокационная альтиметрия является единственным методом наблюдений за топографией океана. Альтиметры устанавливаются на различные спутники, на некоторые (со времени проведения Топографического эксперимента — Посейдон в 1992–2006 гг.) многоцелевые платформы для обеспечения глобального охвата и на специально предназначенные для этого спутники, расположенные на особо стабильной орбите для обеспечения точных контрольных измерений. Некоторые альтиметры специально сконструированы для топографии полярных льдов, в одном случае используется лидар для более точного определения границы и вертикального разрешения (см. таблицу 4.4).

4.3.2 Цветность океана

Наблюдения за цветностью океана обеспечивают очень информативные данные для того, чтобы сделать вывод о состоянии здоровья океана, его продуктивности и способности взаимодействовать с атмосферой, например служить стоком для CO_2 . Поэтому это базовый вид наблюдений для оперативной деятельности в открытом океане и прибрежных районах, а также для климатологии.

Несколько спутников проводят наблюдения за цветностью океана. Некоторые из них входят в сеть оперативных метеорологических спутников; один спутник расположен на ГЕО (см. таблицу 4.4).

4.3.3 Приземный ветер у поверхности моря

Ветер у поверхности моря 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 приземного ветра у поверхности моря, 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, любая виньетка с РСА изображения может быть обработана с целью получения информации о преобладающем направлении и периоде волн, а также как и о направленном частотном энергетическом спектре. На практике виньетки 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 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)	ИСПО	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	GeoEye	Коммерческая программа
КАНОПУС-В	КАНОПУС-Вулкан	Роскосмос	Мониторинг растительного покрова
Landsat и LDCM	Landsat and Landsat Data Continuity Mission (Landsat и Программа по обеспечению непрерывности получения данных со спутника Landsat)	ГС США, НАСА	Изыскания и рациональное использование природных ресурсов 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
ResourceSat	Satellite for Earth Resources (Спутник для изучения природных ресурсов Земли)	ИСПО	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	Компания DigitalGlobe	Коммерческая программа

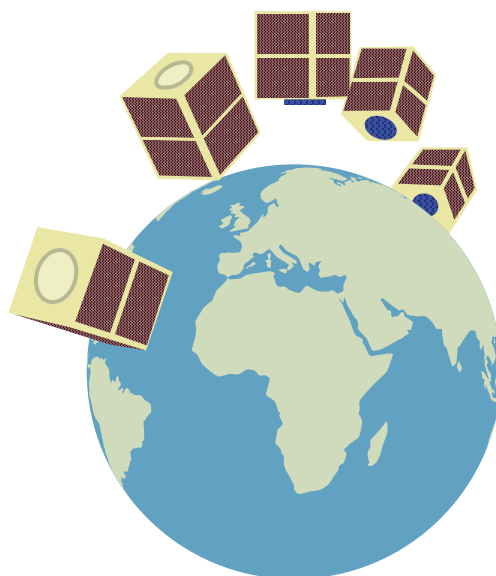


Рисунок 4.5 Концепция ГСМБ, основанная на пяти спутниках со сдвигом по фазе около 20 мин

<i>Аббревиатура</i>	<i>Полное название</i>	<i>Ответственная организация</i>	<i>Цель/характер программы</i>
Примечание: БКА = Бразильское космическое агентство (Бразилия) ГС США = Геологическая служба США ЮСЕФ = Институт экспериментальных беспилотных автономных космических аппаратов (Япония) NEC = Японская электротехническая компания			

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 Bilen 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.

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

<i>Аббревиатура</i>	<i>Полное название</i>	<i>Агентство/ страна</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

<i>Аббревиатура</i>	<i>Полное название</i>	<i>Агентство/ страна</i>	<i>Технические возможности прибора</i>
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
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

<i>Аббревиатура</i>	<i>Полное название</i>	<i>Агентство/ страна</i>	<i>Технические возможности прибора</i>
Примечание:			
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 = Эмирский институт современной науки и технологии			
ЮАНКА = Южноафриканское национальное космическое агентство			

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. РФИ-С/Х-РСА (Радиолокатор с формированием изображения в составе полетной аппаратуры, установленной на Шаттле), летавший дважды на космическом челноке США в апреле и сентябре 1994 г., продемонстрировал преимущества получения одновременных изображений РСА в L-, С- и X-диапазонах (L и С обеспечивались НАСА, X — 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>Агентство/ страна</i>	<i>Частотный диапазон</i>
ALOS	Advanced Land Observing Satellite (Усовершенствованный спутник для наблюдений за поверхностью суши)	ЯААИ, Япония	L-диапазон
SAOCOM-1	Satélite argentino de observación con microondas – series 1 (Аргентинский спутник для микроволновых наблюдений — серия 1)	КОНАЕ, Аргентина	L-диапазон

Аббревиатура	Полное название	Агентство/ страна	Частотный диапазон
SAOCOM-2	Satélite argentino de observación con microondas – series 2 (Аргентинский спутник для микроволновых наблюдений — серия 2)	КОНАЕ, Аргентина	L-диапазон
HJ-1C	Huan Jing 1C (Хуань Цзин-1С)	КАКТ, Китай	S-диапазон
Envisat	Environmental Satellite (Спутник для наблюдения за окружающей средой)	ЕКА	C-диапазон
RadarSat	RadarSat	ККА, Канада	C-диапазон
RCM	RadarSat Constellation Mission (Группировка космических аппаратов РадарСат)	ККА, Канада	C-диапазон
RISAT-1	Radar Imaging Satellite – 1 (Спутник с радиолокационным формированием изображения-1)	ИСРО, Индия	C-диапазон
Sentinel-1	Sentinel-1	ЕКА	C-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	X-диапазон
CSK	COSMO-SkyMed	ИКА, Италия	X-диапазон
KOMPSAT-5	Korea Multi-purpose Satellite – 5 (Корейский многоцелевой спутник-5)	КИАИ, Республика Корея	X-диапазон
Метеор М и МП	Метеор-М и Метеор-МП	Росгидромет	X-диапазон
Paz (SEOSAR)	«Paz» (Испанский спутник с РСА для наблюдений за Землей)	ЦТПР, Испания	X-диапазон
RISAT-2	Radar Imaging Satellite – 2 (Спутник с радиолокационным формированием изображения-2)	ИСРО, Индия	X-диапазон
TerraSAR-X	TerraSAR X (ТерраРСА-X)	НАКЦ, Германия	X-диапазон
TanDEM-X	TanDEM-X (ТанДЕМ-X)	НАКЦ, Германия	X-диапазон

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:

- а) 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 ГСОН;
- c) обобщение информации о динамике внешних слоев земной коры (литосфера, мантия, верхняя часть мезосферы); 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 (нижние слои мезосферы, жидкое ядро, твердое ядро) на основе наблюдений за магнитосферой путем спутниковых измерений магнитных и электрических полей.

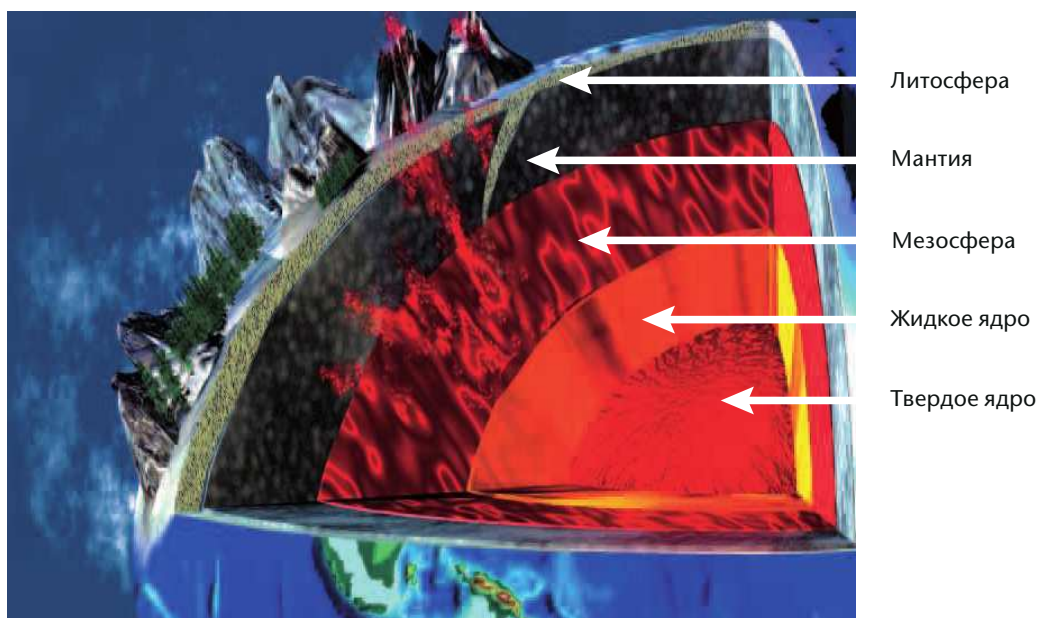


Рисунок 4.6. Стратификация твердой оболочки Земли

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;
- 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).

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 геодинамических процессов, 1 и 2)	ИКА, НАСА	Лазерная локация
LARES	Laser Relativity Satellite (Спутник лазерной относительности)	ИКА	Лазерная локация
GOCE	Gravity Field and Steady-state Ocean Circulation Explorer (Спутник для исследования гравитационного поля и установившихся океанских течений)	ЕКА	Градиометр, 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
CHAMP	Challenging Mini-satellite Payload (Миниспутниковая система геофизических наблюдений)	НАКЦ	Акселерометр, лазерная локация, магнитометр
Ørsted	Ørsted (Орстед)	ДНКЦ, КНЕС, НАСА	Магнитометры
SAC-C	Satélite de aplicaciones científicas – C (Научно-прикладной спутник-С)	КОНАЕ	Магнитометр
SWARM (3 спутника)	Спутники для исследования магнитного поля Земли и окружающей среды	ЕКА, КНЕС, ККА	Акселерометр, датчик электрического поля, магнитометры

Примечание:
ДНКЦ = Датский национальный космический центр

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.

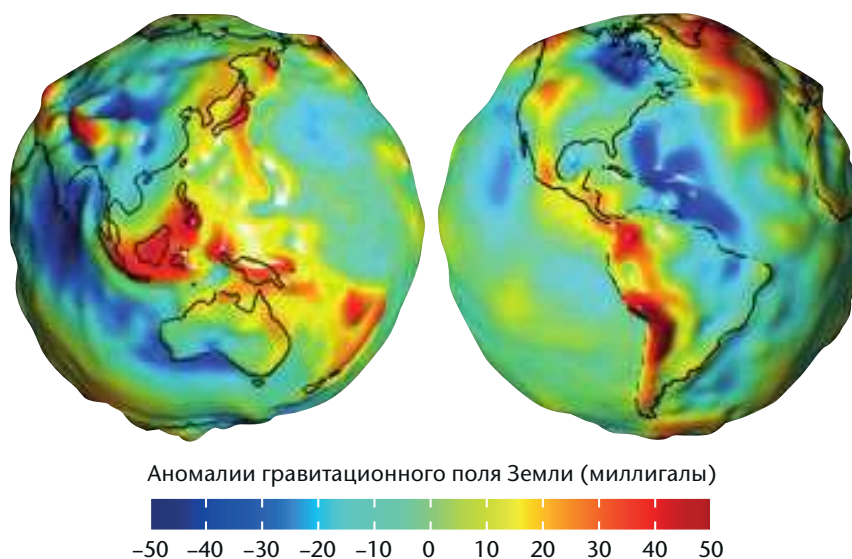


Рисунок 4.7. Трехмерное наглядное представление геоидальных высот. Единицы: мГал
(1 Гал = 0,01 м/с² и 1 мГал $\approx 10^{-6} g_0$)

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.

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
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

Аббревиатура	Полное название	Ответственная организация	Орбита
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

4.6.2 Мониторинг магнитосферы и ионосферы

В расположенных ближе к Земле (см. рисунок 4.8 (а) 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.

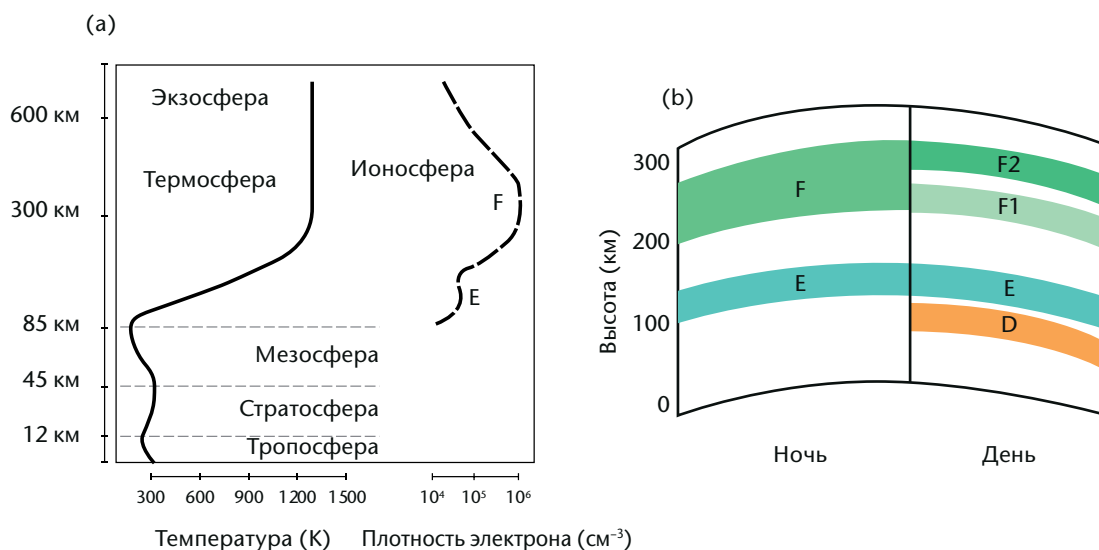


Рисунок 4.8. (а) Стратификация атмосферы ниже и выше мезопаузы; (b) уровни большей концентрации электронов. Самая высокая концентрация в слое F2, днем и ночью.

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.

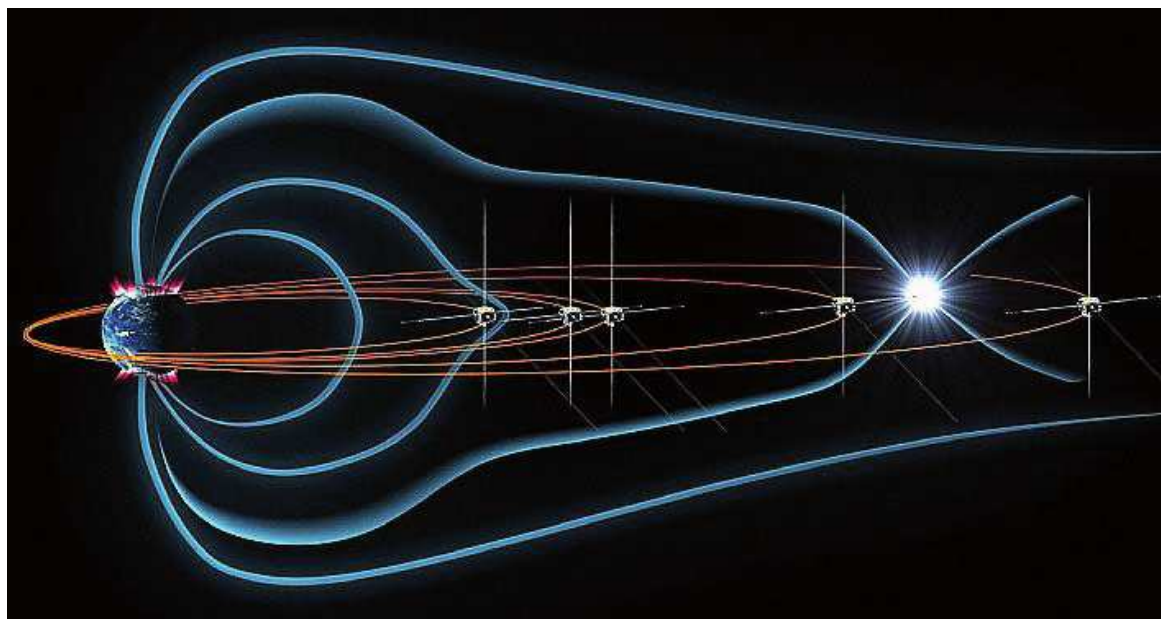


Рисунок 4.9. Орбиты пяти спутников THEMIS в магнитосфере. Белая вспышка показывает высвобождение энергии в результате магнитосферной суббури.

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.

В разделе 4.5 описан ряд низкоорбитальных космических аппаратов, на которых также размещены приборы для соответствующих исследований магнитосферы:

- а) Ørsted: феррозондовый векторный магнитометр (ФВМ) и скалярный магнитометр Оверхаузера (СМО);
- б) 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 (ГCOM, 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 (сегодня происходит переход на три): ~1 180 ГГц, ~1 580 ГГц и, возможно, ~1 250 ГГц. Путем дифференциации двух (или трех) 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).

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 ДЖЕЙСОН), измерение проводится в нижних слоях плазмосферы (слой над термосферой, на высоте от ~1 000 до ~40 000 км).



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

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 ГСOM 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.

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
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

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

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	ГГAK-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)
NOAA с 15 по 19 Metop A, B	SEM/2 для детектирования протонов средней энергии и результирующей энергии
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

<i>Серии спутников</i>	<i>Аппаратура для проведения мониторинга in situ космической среды</i>
FY-3 от С 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)