

## ГЛАВА 3. ПРИБОРЫ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ

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

### 3.1 ОСНОВНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПРИБОРОВ

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

- a) сканирование, шаг-статичный кадр, полоса захвата и цикл наблюдения;
- b) спектральный диапазон и разрешение;
- c) пространственное разрешение (IFOV, пиксель, размер пикселя по земной поверхности (GSD), угловое расстояние между пикселями (ASD), функция передачи модуляции (MTF));
- d) радиометрическое разрешение.

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

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

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

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

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

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

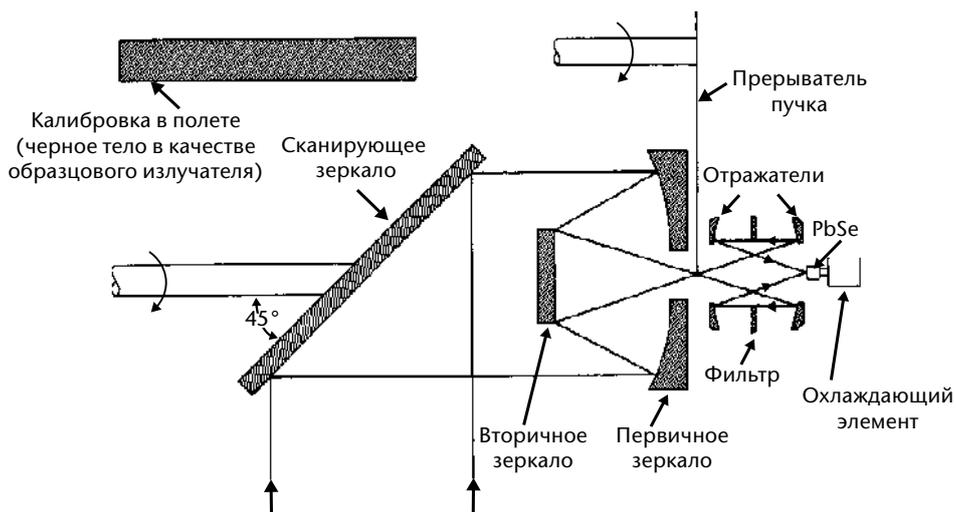


Рисунок 3.1. Типовая схема сканирующего радиометра на НОО

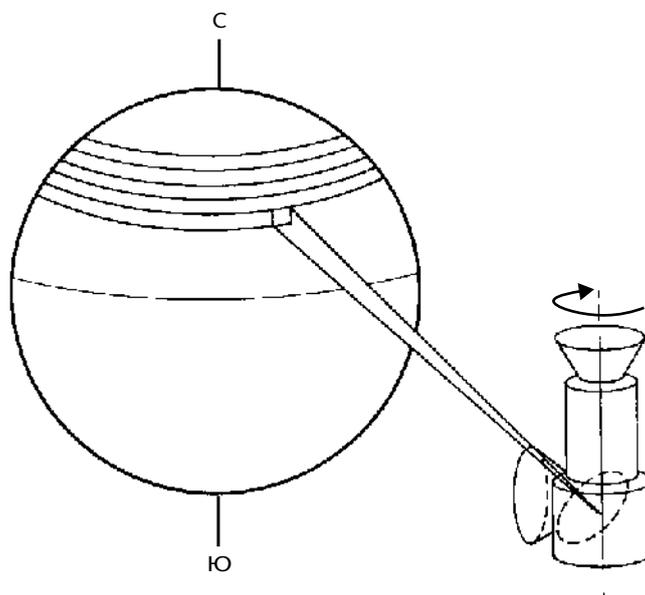
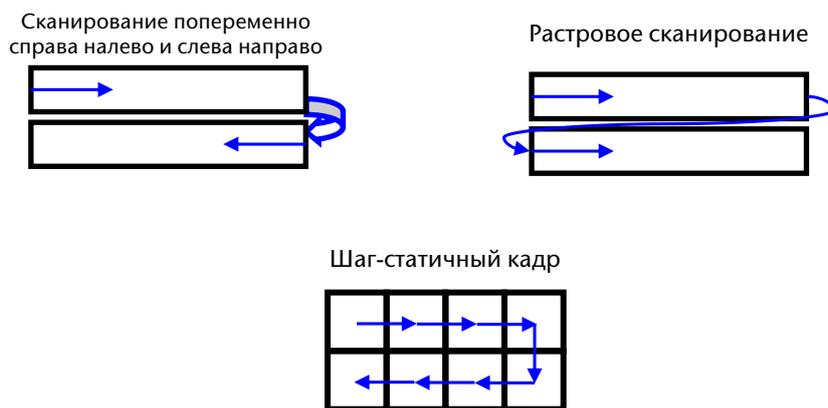


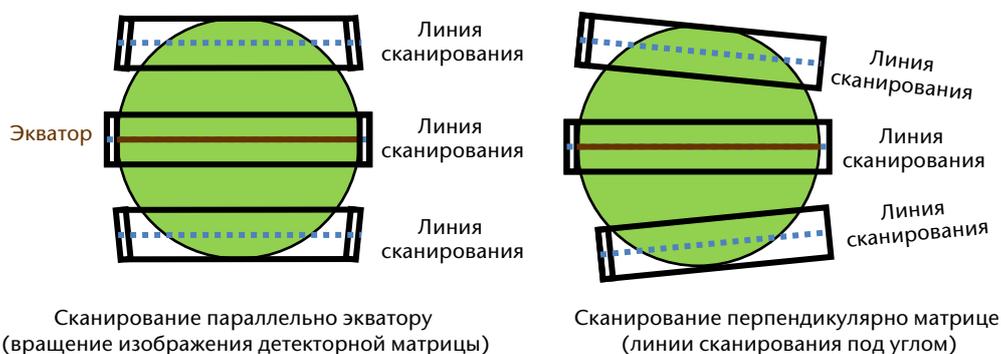
Рисунок 3.2. Схема сканирования с геостационарного спутника со стабилизацией по вращению

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

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



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



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

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

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

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

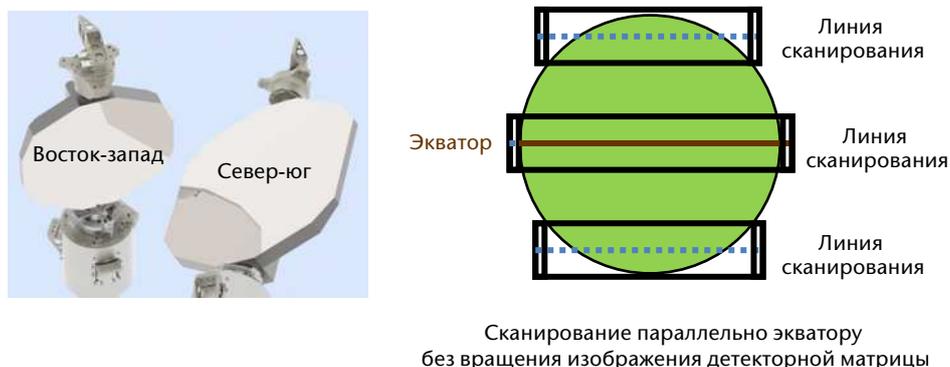
иметь важное значение, поскольку при изменении угла сканирования постоянно меняется относительное расположение пикселей. Для приборов ГСО угол сканирования изменяется только на  $\pm 4,4$  градуса, поэтому для коротких матриц поворот не важен (например, формирователь изображений GOES-15), но может иметь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

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

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

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

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



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

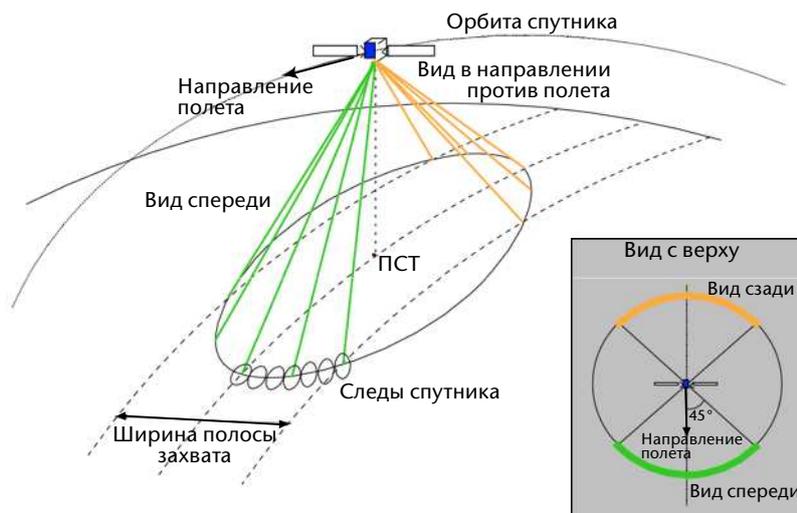


Рисунок 3.6. Геометрия конического сканирования

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

### Оценка цикла наблюдений для типичных приборов НОО

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

- для дневных и ночных датчиков (ИК- или МКВ-диапазоны), работающих как на восходящих, так и нисходящих витках:  $\Delta t = 1\,400/\text{полоса захвата}$  (например, для микроволнового конического сканера с полосой захвата 1 400 км:  $\Delta t = 1$  день);
- для чисто дневных датчиков (КВ), работающих только на одном витке за орбитальный период:  $\Delta t = 2\,800/\text{полоса захвата}$  (например, наблюдение за состоянием суши в видимом диапазоне с полосой захвата 180 км:  $\Delta t = 16$  дней).

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

- при среднем интервале выборки поперек трассы  $\Delta x$  характерное время, необходимое для глобального охвата, составляет:
  - $\Delta t = 900/\Delta x$  для датчиков, работающих в дневное и ночное время (например, радиолокационный альтиметр — 2 (РА-2) на спутнике для изучения окружающей среды (Envisat):  $\Delta x = 26$  км,  $\Delta t = 35$  дней);
  - $\Delta t = 1\,800/\Delta x$  для чисто дневных датчиков (например, спектральный радиометр для исследования обратного рассеяния солнечного УФ-излучения (СБУФ) Национального управления по исследованию океанов и атмосферы (НУОА):  $\Delta x = 170$  км,  $\Delta t = 11$  дней);

- b) соответственно, за интервал времени  $\Delta t$  (например, период повторения орбиты или основной подцикл) средний интервал выборки поперек трассы записывается как:
- i)  $\Delta x = 900/\Delta t$  для датчиков, работающих в дневное и ночное время (например, альтиметр Совместной сети спутников для альтиметрии в интересах океанографии (ДЖЕЙСОН):  $\Delta t = 10$  дней,  $\Delta x = 90$  км);
  - ii)  $\Delta x = 1\,800/\Delta t$  для чисто дневных датчиков (например, СБУФ НУОА:  $\Delta t = 5$  дней,  $\Delta x = 360$  км).

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

- a)  $\Delta t$  3 дня для датчиков, работающих в дневное и ночное время (например, MIPAS на Envisat: 3 дня = 1 орбитальный подцикл);
- b)  $\Delta t$  6 дней для чисто дневных датчиков (например, СКИАМАЧИ-лима на борту спутника Envisat: 6 дней = 2 орбитальных подцикла).

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

- a) время, необходимое для одного спутника, производящего 1 000 наблюдений/день:  
 $\Delta t = 510\,000\,000/300/300/1\,000 = 5,7$  дней;
- b) число спутников, необходимых для цикла наблюдения  $\Delta t$ :  
 $N = 5,7/\Delta t$  (например, для  $\Delta t = 0,5$  дней, число спутников близко к 12).

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

### 3.1.2 **Спектральный диапазон: радиометры и спектрометры**

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

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

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

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

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

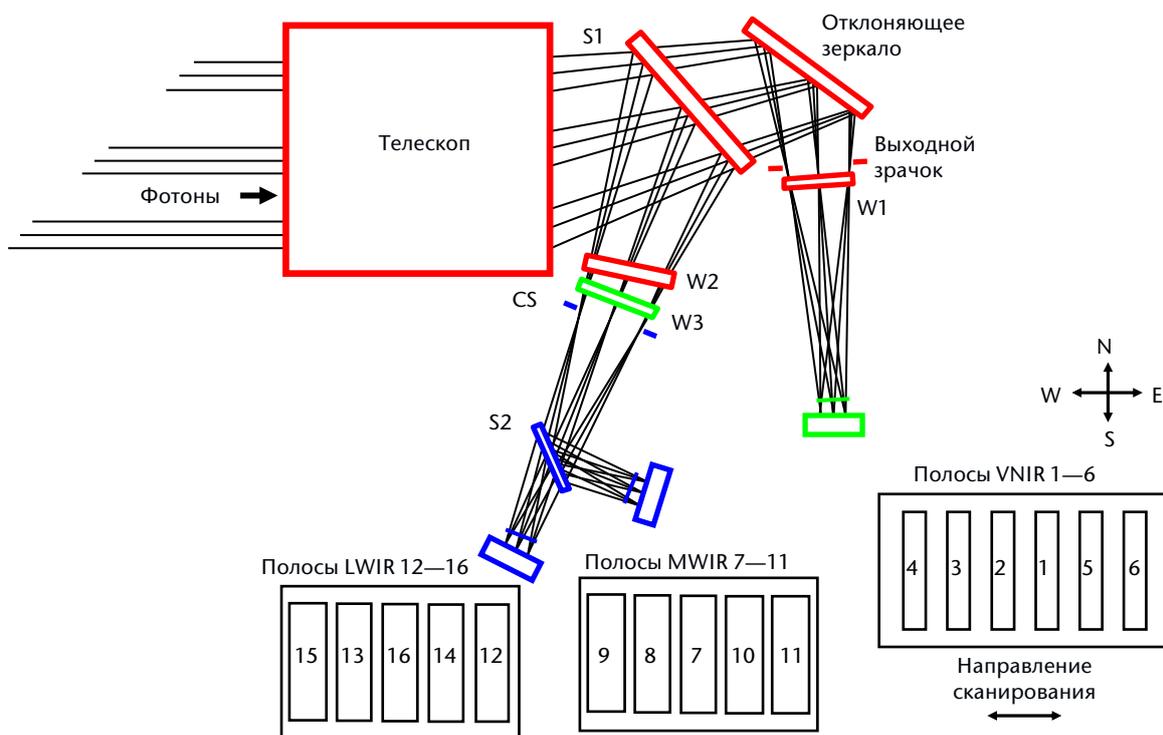
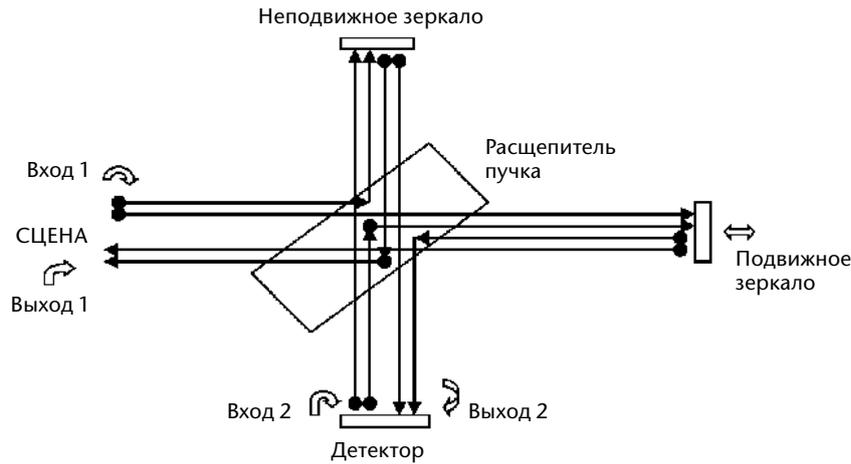


Рисунок 3.7. Схема разделения каналов в УБФИ на GOES-R



**Рисунок 3.8. Схема интерферометра Мичельсона с двумя входами и двумя выходами**

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

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

$$\Delta\nu = 1/OPD_{\max} \tag{3.1}$$

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

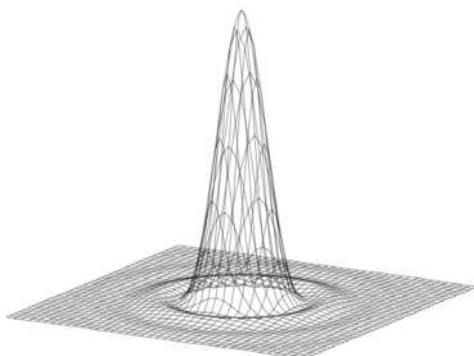


Рис. 3.9. Вид функции рассеяния точки

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

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

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

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

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

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

- a) AVHRR: IFOV = 1,1 км; пиксель = 1,1 км вдоль трассы, 0,80 км вдоль скана (сверхдискретизация) (AVHRR представляет собой прибор с постоянным ASD);
- b) SEVIRI: IFOV = 4,8 км; пиксель = 3,0 км поперек и вдоль скана (сверхдискретизация);
- c) УБФИ 0,64 мкм (красный) канал запад-восток: IFOV = 12,4 мкрад; ASD выборки = 11 мкрад; ASD пикселя = 14 мкрад (0,5 км). Обратите внимание, что IFOV УБФИ и ASD выборки были оптимизированы в соответствии с алгоритмом передискретизации, чтобы обеспечить желаемую MTF для результирующего пиксельного изображения.

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

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

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

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

**Таблица 3.1. Изменение функции  $MTF_{\text{window}}$  отношения  $\Delta x / \text{IFOV}$**

$\Delta x/\text{IFOV}$	1/2	2/3	1	2	3	4	5	6
$MTF_{\text{window}}$	0	0,30	0,64	0,90	0,95	0,97	0,98	0,99

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

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

$$MTF_{\text{diffraction}} = \frac{2}{\pi} \left[ \cos^{-1} \left( \frac{f}{f_d} \right) - \frac{f}{f_d} \sqrt{1 - \left( \frac{f}{f_d} \right)^2} \right] \quad (3.4)$$

где  $f = 1/(2 \vartheta H)$  (при  $H$  = высота спутника над поверхностью Земли);

$\vartheta$  = угловое разрешение (т. е.  $\text{IFOV}/H$ );

$f_d = L/(\lambda H)$ ;

$L$  = апертура первичной оптики и отсюда  $f/f_d = \lambda/(2 \vartheta L)$ .

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

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

что соответствует классическому закону дифракции.

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

- a) IFOV: невидим для пользователя; определяет радиометрический баланс изображения;
- b) пиксель: дает прямое восприятие степени детализации изображения;
- c) MTF: контролируя восстановление амплитуды, обеспечивает восприятие контрастности.

### 3.1.4 Радиометрическое разрешение

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

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

$$NESR = \frac{2 F}{D^* \cdot \Delta\nu \cdot \tau \cdot \sqrt{\pi \cdot t \cdot \Delta\Omega}} \quad (3.6)$$

где:

NESR= спектральная плотность энергетической яркости, эквивалентная шуму (единицы: Вт·м<sup>-2</sup>·ср<sup>-1</sup> [см<sup>-1</sup>]<sup>-1</sup>, т.е. на единицу волнового числа);

$F = f/L$ ,  $F$ -число ( $f$  = фокусное расстояние системы,  $L$  = апертура телескопа);

$D^*$  = порог обнаружения (сильно зависит от  $\nu$ );

$\Delta\nu$  = спектральное разрешение (выраженное через волновое число  $\nu = 1/\lambda$ );

$\tau$  = пропускная способность прибора;

$t$  = время интегрирования;

$\Delta\Omega$  = пропускная способность системы, определяемая произведением ( $\pi \cdot L^2/4$ ) на ( $IFOV^2/H^2$ ), где  $\pi \cdot L^2/4$  = площадная апертура телескопа;

$H$  = высота спутника;

$IFOV^2/H^2$  = телесный угол, под которым находится IFOV.

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

$$SNR = I(\nu)/NESR \quad (3.7)$$

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

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

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

Для узкополосных ИК-каналов радиометрическое разрешение обычно записывается как:

$$\text{NE}\Delta T = \frac{\text{NESR}}{dB/dT} \quad (3.9)$$

где  $B$  = функция Планка и  $\text{NE}\Delta T$  = эквивалентная шуму дифференциальная температура при конкретной температуре  $T$ .

При  $\text{NE}\Delta T$ , формула, представляющая радиометрические характеристики 3.6, может быть переписана в следующем виде:

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

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

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

$$\text{NE}\Delta R \cdot \text{IFOV} \cdot \sqrt{t} \propto \frac{1}{L} \quad (3.11)$$

где  $\text{NE}\Delta R$  — эквивалентная шуму дифференциальная энергетическая яркость (единица измерения: Вт·м<sup>-2</sup>·ср<sup>-1</sup>).

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

$$\text{IFOV} = \frac{1.24 \cdot H \cdot c}{L \cdot \nu^*} \quad (3.12)$$

где  $\nu^*$  = частота =  $c/\lambda$ , а  $c$  = скорость света.

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

$$\text{NE}\Delta T \cdot \sqrt{\Delta\nu^* \cdot t} = T_{\text{sys}} \quad (3.13)$$

где  $T_{\text{sys}}$  = температура системы.

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

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

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

- a) для рассматриваемого набора параметров прибора ( $L$ ,  $F$ ,  $\tau$  и  $D^*$ ) некоторые параметры, представляющие интерес для пользователя (NEΔT,  $\Delta\nu$ , IFOV и  $t$ ), могут быть улучшены за счет некоторых других. В некоторых случаях это можно осуществить на уровне программного обеспечения во время обработки данных на земле. Однако, если по всем требованиям пользователей все параметры будут только улучшаться и никакие из них не будут ухудшаться, то потребуется увеличение габаритов прибора;
- b) влияние NEΔT,  $\Delta\nu$  и IFOV на размеры прибора линейным образом связано с диаметром оптики  $L$ . Влияние  $t$  на размеры прибора (время интегрирования, обусловленное требованием охвата данной зоны в данное время) уменьшается по квадратному корню времени интегрирования. Поэтому требования по увеличению охвата и/или более частых наблюдений имеют меньшее значение, чем требования по улучшению пространственного, спектрального и радиометрического разрешений;
- c) увеличение апертуры оптики  $L$  оказывает очень большое влияние на размер прибора. Поскольку очень трудно реализовать оптические системы с F-числом  $= f/L < 1$ , увеличение  $L$  означает увеличение фокусного расстояния и, следовательно, увеличение объемов оптики прибора в целом. Например, уменьшение IFOV с 3 до 2 км приводит к увеличению массы прибора в два раза.

### 3.2 КЛАССИФИКАЦИЯ ПРИБОРОВ

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

- a) формирователи оптических изображений среднего разрешения;
- b) формирователи оптических изображений высокого разрешения;
- c) надирные сканирующие коротковолновые радиометры;
- d) надирные сканирующие инфракрасные радиометры;
- e) микроволновые радиометры или микроволновые радиометры зондирования;
- f) лимбовые зондировщики;
- g) радиозатменные зондировщики Глобальной навигационной спутниковой системы;
- h) широкополосные радиометры;
- i) приборы для мониторинга солнечного излучения;
- j) формирователи изображений молний;

- k) радиолокаторы обнаружения облаков и осадков;
- l) радиолокационные скаттерометры;
- m) радиолокационные альтиметры;
- n) радиолокаторы с получением изображений (радиолокаторы с синтезированной апертурой);
- o) лидарная аппаратура;
- p) градиометры/акселерометры;
- q) приборы для мониторинга солнечной активности, солнечного ветра или околоземного пространства;
- r) приборы для мониторинга параметров космической среды;
- s) магнетометры или датчики электрического поля.

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

### 3.2.1 **Формирователи оптических изображений среднего разрешения**

Приборы этого типа имеют следующие характеристики:

- a) функционирование в ВИД, БИК, КВИК, СВИК и ТИК областях спектра (т. е. от 0,4 до 15 мкм);
- b) дискретные каналы, от нескольких каналов до нескольких десятков каналов, разделенные дихроичными фильтрами или спектрометрами с полосой пропускания от ~10 нм до ~1 мкм;
- c) средства формирования изображений: сплошная или перекрывающаяся выборка с пространственным разрешением порядка 1 км, обеспечивающая полосу захвата от нескольких сот до нескольких тысяч километров;
- d) сканирование: обычно поперек трассы, но иногда многоугловое и иногда с несколькими поляризациями;
- e) предназначены для использования на спутниках как на НОО, так и ГСО.

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

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

- b) формирование изображений цветности океана, наблюдения за аэрозолем и классификация растительного покрова. Для этих целей наиболее важной характеристикой прибора является количество каналов с узкой полосой пропускания в видимой и ближней ИК-областях спектра;
- c) формирование изображений со специальной геометрией визирования для более совершенных наблюдений за аэрозолем и перистыми облаками, получения точной температуры поверхности моря, радиационных параметров поверхности суши, включая двунаправленную функцию распределения отражения. Наиболее важными характеристиками прибора являются количество углов визирования и, если таковые имеются, поляризаций.

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

### 3.2.2 **Формирователи оптических изображений высокого разрешения**

Приборы этого типа имеют следующие основные характеристики:

- a) длины волн в ВИД-, БИК- и КВИК-диапазонах, т.е. от 0,4 до 3 мкм с возможным расширением в СВИК- и ТИК-областях;
- b) изменяемое количество каналов и полос пропускания:
  - i) один канал (панхроматический) с полосой пропускания около 400 нм (например, 500—900 нм);
  - ii) от 3 до 10 многоспектральных каналов с полосой пропускания около 100 нм;
  - iii) непрерывный спектральный диапазон (гиперспектральный); как правило, имеет 100 каналов с полосой пропускания около 10 нм;
- c) пространственное разрешение в диапазоне меньше, чем от одного метра, до нескольких десятков метров;
- d) функция получения изображения: сплошная и смежная выборка, покрывающая полосу захвата от нескольких десятков до приблизительно 100 км, которая часто соответствует полю зрения в несколько сотен километров;
- e) предназначены для использования на НОО. ГСО не исключается, однако пока еще не используется.

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

- a) панхроматические формирователи изображений: наблюдение, распознавание, стереоскопия для цифровой модели высоты рельефа и прочее. Наиболее значимыми характеристиками приборов являются разрешение и возможности нацеливания с автоматическим управлением;
- b) мультиспектральные формирователи изображений: наблюдение за сушей для мониторинга землепользования, наземного покрова, подземных вод, классификации растительности, мониторинга стихийных бедствий и прочее. Наиболее значимыми характеристиками прибора является количество каналов и спектральный охват;
- c) гиперспектральные формирователи изображений: наблюдение за сушей, особенно в целях изучения вегетационных процессов, углеродного цикла и прочее. Наиболее значимыми характеристиками прибора являются спектральное разрешение и спектральный охват.

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

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

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

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

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

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

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

### 3.2.3 **Надирные сканирующие коротковолновые радиометры**

Этот спектрометр имеет следующие основные характеристики:

- функционирует в ультрафиолетовой (УФ), ВИД-, БИК- и СВИК-областях спектра (от 0,2 до 3 мкм));
- спектральное разрешение варьируется от доли нанометра до нескольких нанометров;

- c) пространственное разрешение порядка 10 км;
- d) горизонтальная дискретизация не обязательно сплошная и смежная;
- e) возможности сканирования — от направления только в надир до полосы охвата в несколько тысяч километров;
- f) предназначен для использования как на НОО, так и ГСО.

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

- a) только УФ-область спектра: профиль озона;
- b) УФ- и ВИД-области спектра: профиль и общее содержание озона, или общий профиль небольшого числа других компонентов атмосферы, таких как BrO, NO<sub>2</sub>, OClO, SO<sub>2</sub> и аэрозоля;
- c) УФ-, ВИД- и БИК-области спектра: профиль и общее содержание озона, или общий профиль некоторых других компонентов атмосферы, таких как BrO, ClO, H<sub>2</sub>O, HCHO, NO, NO<sub>2</sub>, NO<sub>3</sub>, O<sub>2</sub>, O<sub>4</sub>, OClO, SO<sub>2</sub> и аэрозоля;
- d) УФ-, ВИД-, БИК- и КВИК-области спектра: профиль и общее содержание озона, или общий профиль некоторых других компонентов атмосферы, таких как BrO, CH<sub>4</sub>, ClO, CO, CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O, HCHO, N<sub>2</sub>O, NO, NO<sub>2</sub>, NO<sub>3</sub>, O<sub>2</sub>, O<sub>4</sub>, OClO, SO<sub>2</sub> и аэрозоля;
- e) БИК- и КВИК-области спектра и, возможно, дополнительно СВИК- и ТИК-области: общее содержание или общий профиль отдельных компонентов атмосферы, таких как CH<sub>4</sub>, CO, CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O и O<sub>2</sub>.

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

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

<i>СКИАМАЧИ-надир</i>	<i>Сканирующий абсорбционный спектрометр с формированием изображения для составления атмосферных карт – устройство сканирования в надирном режиме</i>
Спутник	Envisat
Программа исследований	Атмосферная химия, отслеживание компонентов атмосферы: BrO, CH <sub>4</sub> , ClO, CO, CO <sub>2</sub> , H <sub>2</sub> O, HCHO, N <sub>2</sub> O, NO, NO <sub>2</sub> , NO <sub>3</sub> , O <sub>2</sub> , O <sub>3</sub> , O <sub>4</sub> , OClO, SO <sub>2</sub> и аэрозоля
Основные характеристики	Спектральный диапазон: УФ/ВИД/БИК/КВИК-области спектра Возможность получения изображений: дифракционный спектрометр, покрывающий восемь полос, 8192 каналов, с 7 каналами поляризации
Дополнительная информация	<a href="https://www.wmo-sat.info/oscar/instruments/view/478">https://www.wmo-sat.info/oscar/instruments/view/478</a>

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

UVN	Спектрометр в УФ-, видимом и ближнем ИК-диапазонах (также известный как Sentinel-4)
Спутники	MTG-S1, MTG-S2
Программа исследований	Атмосферная химия, отслеживание компонентов атмосферы: BrO, ClO, H <sub>2</sub> O, HCHO, NO, NO <sub>2</sub> , NO <sub>3</sub> , O <sub>2</sub> , O <sub>3</sub> , O <sub>4</sub> , OCIO, SO <sub>2</sub> и аэрозоля
Основные характеристики	Спектральный диапазон: УФ/ВИД/БИК-области спектра Возможность получения изображений: дифракционный спектрометр, покрывающий 3 полосы, 1 470 каналов
Дополнительная информация	<a href="https://www.wmo-sat.info/oscar/instruments/view/584">https://www.wmo-sat.info/oscar/instruments/view/584</a>

### 3.2.4 Надирные сканирующие инфракрасные радиометры

Радиометры или спектрометры этого типа имеют следующие основные характеристики:

- функционирование в СВИК- и ТИК-областях спектра (3—15 мкм) с возможным расширением в дальнюю ИК-область (до 50 мкм) и вспомогательные каналы в ВИД/БИК-областях спектра;
- спектральное разрешение порядка 0,1 см<sup>-1</sup> (очень высокое разрешение), 0,5 см<sup>-1</sup> (гиперспектральное) или 10 см<sup>-1</sup> (радиометр);
- пространственное разрешение порядка 10 км;
- горизонтальная дискретизация, не обязательно сплошная или смежная;
- возможности сканирования варьируются от направления только в надир до полосы охвата в несколько тысяч километров;
- предназначены для использования как на НОО, так и ГСО.

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

- радиометры позволяют получить профили температуры и влажности грубого вертикального разрешения;
- спектрометры позволяют получить профили температуры и влажности высокого вертикального разрешения, а также приближенный профиль озона и общее содержание или общий профиль некоторых других компонентов атмосферы, таких как CH<sub>4</sub>, CO, CO<sub>2</sub>, HNO<sub>3</sub>, NO<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub> и аэрозоля;
- спектрометры очень высокого разрешения, предназначенные для изучения химии атмосферы, позволяют получить профили или общее содержание C<sub>2</sub>H<sub>2</sub>, C<sub>2</sub>H<sub>6</sub>, CFC-11, CFC-12, CH<sub>4</sub>, ClONO<sub>2</sub>, CO, CO<sub>2</sub>, COS, H<sub>2</sub>O, HNO<sub>3</sub>, N<sub>2</sub>O, N<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, NO, NO<sub>2</sub>, O<sub>3</sub>, PAN, SF<sub>6</sub>, SO<sub>2</sub> и аэрозоля.

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

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

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

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

<i>IASI</i>	<i>Интерферометр зондирования атмосферы в инфракрасном диапазоне</i>
Спутники	Metop-A, Metop-B, Metop-C
Программа исследований	Профили температуры и влажности высокого вертикального разрешения Приближенный профиль озона Общее содержание или общий профиль ряда других компонентов атмосферы, таких как CH <sub>4</sub> , CO, CO <sub>2</sub> , HNO <sub>3</sub> , NO <sub>2</sub> , SO <sub>2</sub> и аэрозоля
Основные характеристики	Спектрометр: спектральное разрешение 0,25 см <sup>-1</sup> (без аподизации), СВИК/ТИК-области спектра, интерферометр с 8 461 каналами и одним каналом, встроенным в ТИК-формирователь изображений
Дополнительная информация	<a href="https://www.wmo-sat.info/oscar/instruments/view/207">https://www.wmo-sat.info/oscar/instruments/view/207</a>

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

<i>Надир TES</i>	<i>Тропосферный эмиссионный спектрометр — устройство сканирования в надирном режиме</i>
Спутник	EOS-Aura
Программа исследований	Атмосферная химия: профили и общее содержание C <sub>2</sub> H <sub>2</sub> , C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> , CFC-11, CFC-12, CH <sub>4</sub> , ClONO <sub>2</sub> , CO, CO <sub>2</sub> , COS, H <sub>2</sub> O, HNO <sub>3</sub> , N <sub>2</sub> O, N <sub>2</sub> O <sub>5</sub> , NO, NO <sub>2</sub> O <sub>2</sub> , O <sub>3</sub> , PAN, SF <sub>6</sub> , SO <sub>2</sub> и аэрозоля
Основные характеристики	Спектрометр, спектральное разрешение 0,059 см <sup>-1</sup> (без аподизации), СВИК/ТИК-спектральный диапазон, интерферометр с формированием изображений: четыре полосы, 40 540 каналов
Дополнительная информация	<a href="https://www.wmo-sat.info/oscar/instruments/view/563">https://www.wmo-sat.info/oscar/instruments/view/563</a>

### 3.2.5 Микроволновые радиометры

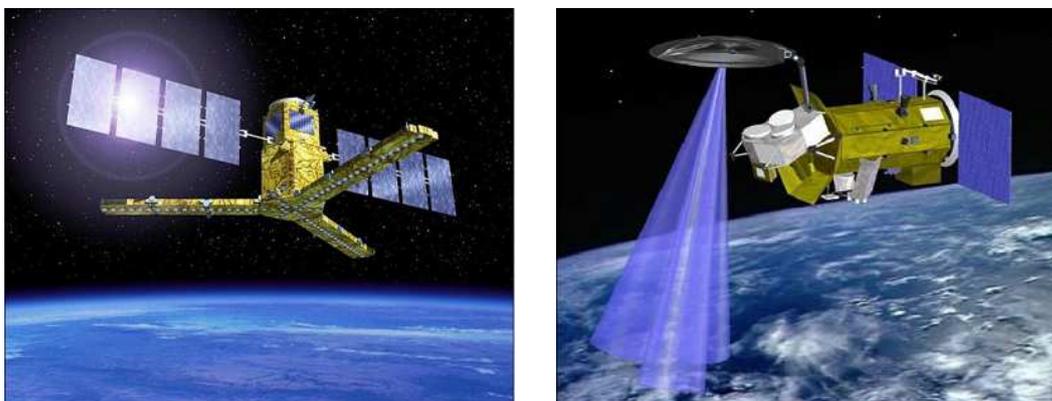
Радиометры этого типа имеют следующие основные характеристики:

- частота от 1 до 3 000 ГГц (длины волн от 0,1 мм до 30 см);
- ширина полосы пропускания канала от нескольких МГц до нескольких ГГц;
- пространственное разрешение от нескольких километров до примерно 100 километров, определяемое размером антенны и частотой излучения;

- d) горизонтальная дискретизация не обязательно сплошная или смежная;
- e) сканирование: поперек трассы (полоса захвата порядка 2 000 км), коническое (полоса захвата порядка 1 500 км, возможна одиночная или двойная поляризация) или только в надир;
- f) предназначены для использования на НОО.

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

- a) формирование многоцелевых МКВ-изображений для определения осадков; содержания жидкой воды и ледяных кристаллов в облаке; количества водяного пара в атмосфере, который может выпасть в виде осадков; температуры поверхности океана; скорости приводного ветра (и направления, если используется мультиполяризация); покрова морского льда; влажности поверхности почвы; состояния снега и водного эквивалента снега, водно-болотных угодий, мониторинга экосистем, составление карт паводковых бедствий и т.п. Наиболее важными характеристиками прибора в этом плане являются следующие: расширение спектрального диапазона, по крайней мере, от 19 ГГц (возможно, 10 ГГц или лучше 6–7 ГГц) до самое меньшее 90 ГГц, а также коническое сканирование для использования конической поляризации в условиях постоянного угла падения;
- b) зондирование температуры и влажности, а также осадков, практически при любых условиях погоды. Наиболее важными характеристиками прибора являются каналы в полосах поглощения  $O_2$  для температуры (основная частота: 57 ГГц) и  $H_2O$  для влажности (основная частота: 183 ГГц);
- c) определение солёности воды на поверхности океана и объёмного содержания влаги в почве. Наиболее важной характеристикой прибора является низкая частота в L-полосе (основная частота: 1,4 ГГц); это предполагает использование очень больших антенн (см. рисунок 3.10);
- d) атмосферная коррекция для обеспечения выполнения задач альтиметрии. Наиболее важными характеристиками прибора являются использование частоты водяного пара 23 ГГц с прилегающими окнами, а также совмещение центра с альтиметром в надирных наблюдениях.



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

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

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

<i>AMSR-2</i>	<i>Усовершенствованный микроволновый сканирующий радиометр – 2 (AMSR-2)</i>
Спутник	ГКОМ-В
Программа исследований	Формирование многоцелевых изображений в МКВ-диапазоне для определения интенсивности осадков на поверхности (в жидкой и твердой фазе), температуры поверхности океана, морского ледового покрова и типа льда, скорости ветра (у поверхности), биомассы, содержания жидкой воды в облаках, интегрального содержания водяного пара, температуры поверхности почвы, снежного покрова и водного эквивалента снежного покрова, влажности поверхности почвы и т. д.
Основные характеристики	Спектральный диапазон: 6,9–89 ГГц, 7 частот, 16 каналов, только каналы-окна, коническое сканирование
Дополнительная информация	<a href="https://space.oscar.wmo.int/instruments/view/amr2">https://space.oscar.wmo.int/instruments/view/amr2</a>

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

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

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

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

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

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

### 3.2.6 Лимбовые зондировщики

Семейство приборов этого типа имеет следующие основные характеристики:

- сканирование лимба Земли: определяет вертикальное разрешение (в диапазоне 1—3 км), наблюдаемый атмосферный слой (в диапазоне 10—80 км) и пространственное разрешение (около 300 км вдоль линии визирования);
- спектрометры, использующие или УФ/ВИД/БИК/КВИК-области спектра (200—3 000 нм), или СВИК/ТИК-области спектра (3—16 мкм), либо высокочастотный микроволновый диапазон (100—3 000 ГГц);
- пространственное разрешение: от нескольких десятков километров до нескольких сотен километров в поперечном направлении;
- горизонтальная выборка ограничена одним или несколькими азимутальными направлениями;
- предназначены только для использования на НОО.

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

- коротковолновые спектрометры для ряда компонентов в зависимости от покрываемой части спектра; для полного (УФ/ВИД/БИК/КВИК-диапазонов) основными компонентами являются: BrO, CH<sub>4</sub>, ClO, CO, CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O, HCHO, N<sub>2</sub>O, NO, NO<sub>2</sub>, NO<sub>3</sub>, O<sub>2</sub>, O<sub>3</sub>, O<sub>4</sub>, OClO, SO<sub>2</sub> и аэрозоль;
- ИК-спектрометры для ряда компонентов в зависимости от покрываемой части спектра; для полных СВИК/ТИК-областей спектра основными компонентами являются: C<sub>2</sub>H<sub>2</sub>, C<sub>2</sub>H<sub>6</sub>, CFCs (CCl<sub>4</sub>, CF<sub>4</sub>, F11, F12, F22), CH<sub>4</sub>, ClONO<sub>2</sub>, CO, COF<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O, HNO<sub>3</sub>, HNO<sub>4</sub>, HOCl, N<sub>2</sub>O, N<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, NO, NO<sub>2</sub>, O<sub>3</sub>, OCS, SF<sub>6</sub> и аэрозоль;
- микроволновые спектрометры для ряда компонентов в зависимости от покрываемой части спектра; в диапазоне 100—3 000 ГГц основными компонентами являются: BrO, ClO, CO, H<sub>2</sub>O, HCl, HCN, HNO<sub>3</sub>, HO<sub>2</sub>, HOCl, N<sub>2</sub>O, O<sub>3</sub>, OH и SO<sub>2</sub>;
- затменные датчики, следящие за Солнцем, Луной и звездами, для ряда компонентов в зависимости от покрываемой части спектра; для полного спектра УФ/ВИД/БИК/КВИК-диапазонов основными компонентами являются: H<sub>2</sub>O, NO<sub>2</sub>, NO<sub>3</sub>, O<sub>3</sub>, OClO и аэрозоль.

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

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

<i>СКИАМАЧИ-лимб</i>	<i>Сканирующий абсорбционный спектрометр с формированием изображений для составления атмосферных карт – устройство сканирования в лимбовом режиме</i>
Спутник	Envisat
Программа исследований	Химия верхней атмосферы Отслеживаемые компоненты: BrO, CH <sub>4</sub> , ClO, CO, CO <sub>2</sub> , H <sub>2</sub> O, HCHO, N <sub>2</sub> O, NO, NO <sub>2</sub> , NO <sub>3</sub> , O <sub>2</sub> , O <sub>3</sub> , O <sub>4</sub> , OclO, SO <sub>2</sub> и аэрозоль
Основные характеристики	Дифракционный спектрометр в УФ/ВИД/БИК/КВИК-диапазонах, восемь полос, 8 192 каналов, с 7 каналами поляризации
Дополнительная информация	<a href="https://www.wmo-sat.info/oscar/instruments/view/477">https://www.wmo-sat.info/oscar/instruments/view/477</a>

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

<i>MIPAS</i>	<i>Интерферометр Михельсона для пассивного зондирования атмосферы</i>
Спутник	Envisat
Программа исследований	Химия верхней атмосферы Отслеживаемые компоненты: C <sub>2</sub> H <sub>2</sub> , C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> , ХФУ (CCl <sub>4</sub> , CF <sub>4</sub> , F11, F12, F22), CH <sub>4</sub> , ClONO <sub>2</sub> , CO, COF <sub>2</sub> , H <sub>2</sub> O, HNO <sub>3</sub> , HNO <sub>4</sub> , HOCl, N <sub>2</sub> O, N <sub>2</sub> O <sub>5</sub> , NO, NO <sub>2</sub> , O <sub>3</sub> , OCS, SF <sub>6</sub> и аэрозоль
Основные характеристики	ИК-спектрометр: интерферометр Михельсона, диапазон 685–2 410 см <sup>-1</sup> (4,15–14,6 мкм), спектральное разрешение 0,035 см <sup>-1</sup> (без аподизации) 60 000 каналов/спектр NESR: 50 нВт·см <sup>-2</sup> ·ср <sup>-1</sup> ·см при 685 см <sup>-1</sup> , 4,2 нВт·см <sup>-2</sup> ·ср <sup>-1</sup> ·см при 2 410 см <sup>-1</sup>
Дополнительная информация	<a href="https://www.wmo-sat.info/oscar/instruments/view/286">https://www.wmo-sat.info/oscar/instruments/view/286</a>

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

<i>MLS</i>	<i>Микроволновый лимбовый зондировщик</i>
Спутник	EOS-Aura
Программа исследований	Химия верхней атмосферы Отслеживаемые компоненты: BrO, ClO, CO, H <sub>2</sub> O, HCl, HCN, HNO <sub>3</sub> , HO <sub>2</sub> , HOCl, N <sub>2</sub> O, O <sub>3</sub> , OH и SO <sub>2</sub>
Основные характеристики	МКВ-спектрометр: 5-полосный, 36 субполосный, 1 000 канальный Миллиметровый-субмиллиметровый гетеродинный радиометр на частотах 118 ГГц (9 полос), 190 ГГц (6 полос), 240 ГГц (7 полос), 640 ГГц (9 полос) и 2 500 ГГц (5 полос)
Дополнительная информация	<a href="https://www.wmo-sat.info/oscar/instruments/view/293">https://www.wmo-sat.info/oscar/instruments/view/293</a>

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

<i>SAGE-III МКС</i>	<i>Эксперимент по стратосферному аэрозолю и газам-III для МКС</i>
Спутник	Международная космическая станция (МКС)
Программа исследований	Атмосферная химия в стратосфере Отслеживаемые компоненты: H <sub>2</sub> O, NO <sub>2</sub> , NO <sub>3</sub> , O <sub>3</sub> , OClO и аэрозоль
Основные характеристики	УФ/ВИД/БИК/КВИК-диапазоны (290–1 550 нм), 9-полосный дифракционный спектрометр солнечного и лунного затмения
Дополнительная информация	<a href="https://www.wmo-sat.info/oscar/instruments/view/693">https://www.wmo-sat.info/oscar/instruments/view/693</a>

### 3.2.7 Радиозатменные зондировщики Глобальной навигационной спутниковой системы

Приборы этого типа имеют следующие основные характеристики:

- приемники ГНСС используют по крайней мере две частоты L-диапазона около 1 180 ГГц, 1 250 ГГц и 1 580 ГГц;
- наблюдения лимба Земли от земной поверхности до высоты спутника во время фазы затмения спутников, входящих в группировки ГНСС (таких как ГСOM, ГЛОНАСС, Galileo и Compass/BeiDou);
- направленные антенны: смотрящие назад (для заходящих аппаратов ГНСС), вперед (для восходящих аппаратов ГНСС) и тороидальные (для навигации);
- эффективное пространственное разрешение составляет около 300 км вдоль направления «спутник на НОО – затмевающий спутник ГНСС»; несколько десятков километров в поперечном направлении;
- горизонтальная выборка ограничена числом событий затмений за день: от 250 до 1 500 событий для спутника в зависимости от числа систем ГНСС, сигнал от которых он получает, и технических возможностей отслеживания вперед/назад;
- поддерживаются комплексной системой наземных станций (см. рисунок 3.11);
- предназначены только для использования на НОО.

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

- временной интервал дискретизации сигнала определяет вертикальное разрешение профилей температуры, влажности и плотности;
- чувствительность измерений в нижних слоях атмосферы определяется размером антенн затмения и методом временной выборки;
- количество используемых частот влияет на точность двух измерений параметров ионосферы: общее содержание электронов и профиль плотности электронов;
- число событий затмений в день зависит от количества задействованных группировок ГНСС (ГСOM, ГЛОНАСС, Galileo, BeiDou), числа принимающих каналов для параллельного слежения дополнительных спутников ГНСС и возможностей размещения антенны: ее ориентации только назад, только вперед, или и то, и другое.

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

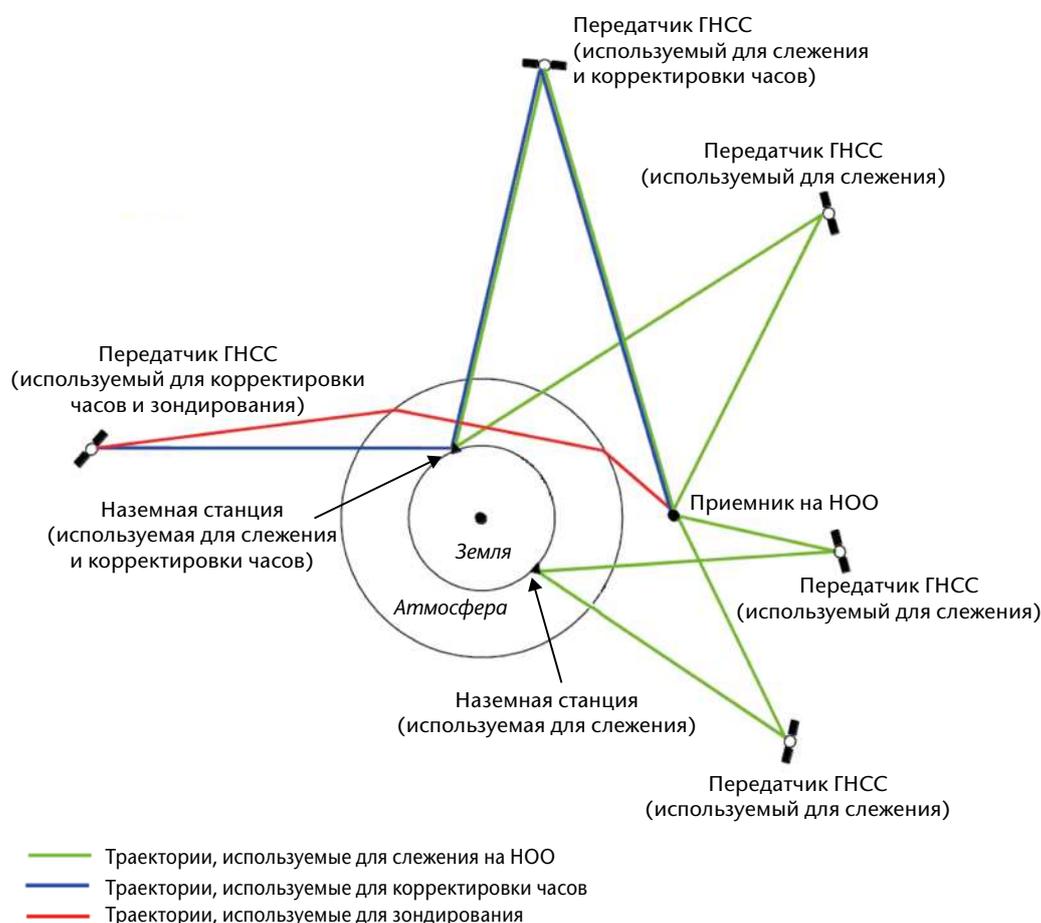


Рис. 3.11. Общий вид системы радиозатменения

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

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

### 3.2.8 Широкополосные радиометры

Приборы этого типа имеют следующие основные характеристики:

- a) длины волн в диапазонах общего излучения, исходящего от Земли и атмосферы (0,2—300 мкм), а также частично отраженной солнечной радиации (0,2—4,0 мкм);
- b) один широкополосный канал, интегрирующий по каждому из двух диапазонов, и добавочные узкополосные каналы в ВИД- и/или ТИК-диапазонах для сбора информации об облаках в пределах IFOV;
- c) сканирование поперек трассы со сплошной и смежной дискретизацией для охвата полосы захвата в несколько тысяч километров с пространственным разрешением порядка 10 км;
- d) предназначены для использования как на НОО, так и на ГСО; возможно также наблюдение из точки либрации (точки Лагранжа) L1.

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

- a) максимально возможное продление коротковолновой области спектра в ультрафиолетовую часть, а длинноволновой области спектра в ДИК-область спектра как можно дальше с предельно максимальными плоскими характеристиками в диапазонах;
- b) встроенные средства с несколькими режимами обзора для перехода от детектирования излучения к детектированию облученности;
- c) дополнительные узкополосные каналы для сбора информации об облаках в пределах IFOV.

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

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

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

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

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

### 3.2.9 Приборы для мониторинга солнечного излучения

Приборы имеют следующие основные характеристики:

- длины волн в диапазоне солнечной радиации (0,15–50 мкм);
- интегрирование по всему диапазону (общее солнечное излучение) и/или спектроскопия в диапазоне 0,15–3,00 мкм;
- общее солнечное излучение (ОСИ) измеряется абсолютными методами, такими как при помощи активных резонансных радиометров, ориентированных на Солнце;
- предназначены для использования как на НОО, так и на ГСО.

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

- расширение чувствительности в солнечном диапазоне излучения;
- способность предоставлять в конкретных условиях спектральную информацию в УФ/ВИД/БИК/КВИК-диапазонах.

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

### 3.2.10 Формирователи изображений молний

Приборы этого типа имеют следующие основные характеристики:

- детекторная матрица (ПЗС): непрерывное наблюдение за Землей в очень узком  $O_2$ -диапазоне на 777,4 нм;
- измерение частоты появления вспышек молний, пространственной протяженности (области) и их интенсивности в IFOV;
- пространственное разрешение 5–10 км;

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

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

- d) сплошная и смежная горизонтальная выборка: полный диск с ГСО и полоса захвата несколько сотен километров с НОО;
- e) предназначены для использования на НОО и ГСО.

Изображения молний и тенденции частоты вспышек могут быть полезны как косвенное свидетельство усиления восходящих потоков/конвекционной силы, конвективных осадков, непрерывного тока и образования NO<sub>x</sub>. Выборка будет различной на НОО и ГСО:

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

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

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

<i>LIS</i>	<i>Датчик изображений молний</i>
Спутник	Проект по измерению осадков в тропиках (TRMM)
Программа исследований	Косвенное свидетельство усиления конвекционных процессов и развития сильных бурь, косвенное свидетельство конвективных осадков, косвенное свидетельство образования NO <sub>x</sub>
Основные характеристики	ПЗС камера, работающая на 777,4 нм (O <sub>2</sub> ) для подсчета вспышек и измерения их пространственной протяженности и интенсивности
Дополнительная информация	<a href="https://www.wmo-sat.info/oscar/instruments/view/250">https://www.wmo-sat.info/oscar/instruments/view/250</a>

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

<i>GLM</i>	<i>Геостационарный картограф молний</i>
Спутник	GOES-R (GOES-16), GOES-S (GOES-17), GOES-T, GOES-U
Программа исследований	Косвенное свидетельство конвективных осадков и турбулентности, косвенное свидетельство образования NO <sub>x</sub> , изучение электрического поля Земли
Основные характеристики	ПЗС-камера, работающая на 777,4 нм (O <sub>2</sub> ) для подсчета вспышек и измерения их интенсивности
Дополнительная информация	<a href="https://www.wmo-sat.info/oscar/instruments/view/157">https://www.wmo-sat.info/oscar/instruments/view/157</a>

### 3.2.11 Радиолокаторы обнаружения облаков и осадков

Приборы этого типа имеют следующие основные характеристики:

- рабочие частоты в  $K_u$  (~14 ГГц),  $K_a$  (~35 ГГц) или  $W$  (~94 ГГц) диапазонах;
- частота повторения импульсов обеспечивает вертикальное разрешение в несколько сотен метров;
- пространственное разрешение от 2 до 5 км;
- сплошная и смежная горизонтальная выборка; полоса захвата — только из надира до нескольких сотен километров;
- предназначены только для использования на НОО.

Рабочая частота определяет возможные применения:

- $K_u$ -диапазон подходит для интенсивных дождевых осадков (жидкие осадки с размером капель, превышающим 1 см). Не дающие осадков облака (капли размером менее < 0,1 мм) полностью прозрачны, а легкие осадки с трудом поддаются обнаружению. На относительно низких частотах электронное коммутирование, которое необходимо для того, чтобы не допустить механического движения больших антенн, осуществляется достаточно легко. Поэтому могут быть реализованы достаточно большие полосы захвата (несколько сотен километров);
- $K_a$ -диапазон подходит для слабого дождя (из слоистых облаков) и осадков в виде снега. Электронное коммутирование еще возможно и можно реализовать полосы захвата в несколько сотен километров;
- $W$ -диапазон подходит для облаков, не дающих осадки (капли размером менее < 0,1 мм). В ряде работ сообщалось также о его применении для наблюдений за системами облаков, дающих осадки, в особенности на границах зон с осадками/или в случаях без осадков, включая глаз тропического циклона.

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

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

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

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

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

### 3.2.12 Радиолокационные скаттерометры

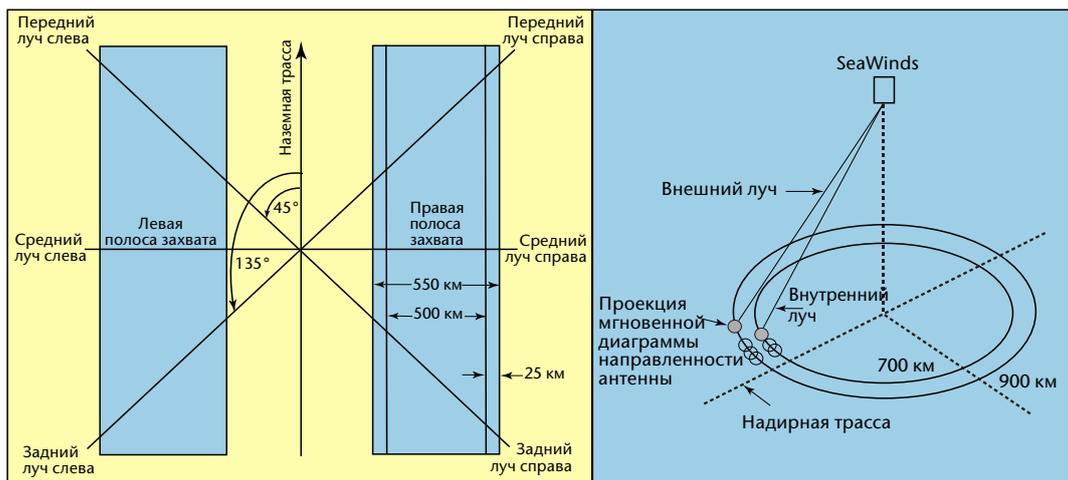
Приборы этого типа имеют следующие основные характеристики:

- рабочие частоты в С- (~5 ГГц) или  $K_u$ - (~14 ГГц) диапазонах;
- очень точная калибровка для измерения коэффициентов обратного рассеяния ( $\sigma^0$ ) от капиллярных волн в океане;
- пространственное разрешение: 10–50 км;
- сплошная и смежная горизонтальная выборка; полоса захвата около 1 000 км;
- предназначены только для использования на НОО.

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

- электронное сканирование: с боковым обзором, в основном с использованием С-диапазона и обеспечением трех азимутальных проекций дифференциального  $\sigma^0$ . Это более точный метод для приводного ветра низкой интенсивности и влажности почвы;
- коническое сканирование: как правило, используется  $K_u$ -диапазон, с двумя лучами и двумя поляризациями, что позволяет получить четыре азимутальных проекции дифференциальных  $\sigma^0$ .

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



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

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

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

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

SeaWinds	
Спутник	Программа быстрых скаттерометров (QuikSCAT)
Программа исследований	Вектор привёрдного ветра
Основные характеристики	K <sub>u</sub> -диапазон (13,4 ГГц), коническое сканирование, два луча, две поляризации
Дополнительная информация	<a href="https://www.wmo-sat.info/oscar/instruments/view/482">https://www.wmo-sat.info/oscar/instruments/view/482</a>

### 3.2.13 Радиолокационные альтиметры

Приборы этого типа имеют следующие основные характеристики:

- a) рабочие частоты в  $K_u$ -диапазоне ( $\sim 14$  ГГц), вместе с дополнительными частотами в С- ( $\sim 5$  ГГц) или  $K_a$ - ( $\sim 35$  ГГц) диапазонах;
- b) очень точное измерение расстояния между спутником и поверхностью Земли;
- c) пространственное разрешение в диапазоне 20 км;
- d) только надирная ориентация;
- e) предназначены только для использования на НОО.

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

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

- a) относительно высокой не-солнечно-синхронной орбиты (например, 1 336 км), когда наклонение обеспечивает высокую устойчивость орбиты (например,  $66^\circ$ ); особенно подходит для твердой оболочки Земли (геоида) и циркуляции океана;
- b) обработка эхо-сигналов аналогично РСА для синтезирования более высокого пространственного разрешения вдоль подспутниковой трассы (см. рисунок 3.13);
- c) параллельные антенны для выполнения функций альтиметрии с более широкой полосой обзора при помощи интерферометрии, что особенно полезно для землепользования, включая внутренние воды (такие как озера);
- d) двойная частота (С- и  $K_u$ -диапазоны), которая позволяет получить информацию об общем содержании электронов между спутником и поверхностью Земли.

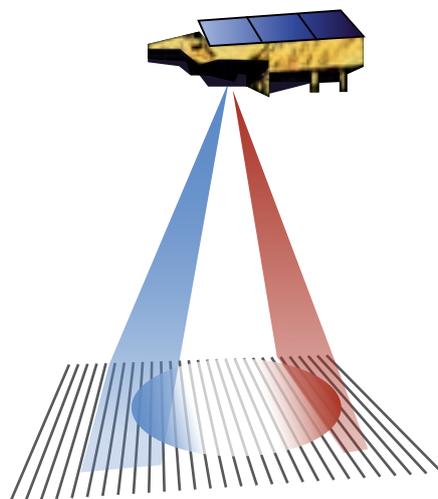


Рис. 3.13. Повышение разрешения альтиметра вдоль трассы спутника путем обработки сигнала аналогично РСА

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

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

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

### 3.2.14 Радиолокатор с получением изображений (радиолокатор с синтезированной апертурой)

Целый ряд приборов этого типа имеет следующие характеристики:

- рабочие частоты в P- (~0,4 ГГц), L- (~1,3 ГГц), S- (~2,7 ГГц), C- (~5,3 ГГц), X- (~9,6 ГГц) или  $K_u$ - (~17,2 ГГц) диапазонах. Наиболее часто используются L-, C- и X-диапазоны;
- Различные комбинации поляризаций для передачи и приема: HH, VV, VV/HH, HH/HV и VV/VH;
- обеспечивается оптимальное соотношение между пространственным разрешением и полосой захвата: разрешение 1–30 м соответствует полосе захвата 30–100 км; но разрешение 100–1 000 м соответствует полосе захвата 300–500 км;
- боковой обзор, обычно с одной стороны, обеспечивающий высокое разрешение в пределах зоны обзора, составляющей несколько сотен километров;
- предназначены только для использования на НОО.

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

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

- P-диапазон больше всего подходит для мониторинга биомассы и гидрологического картирования;
- L-диапазон больше всего подходит для наблюдений за волнением и определения объемного содержания почвенной влаги;
- S-диапазон больше всего подходит для определения объемного содержания почвенной влаги;
- C-диапазон охватывает широкий спектр применений: морской лед, волновые параметры по спектральному анализу фрагментов изображений, влажность поверхностного слоя почвы, характеристики снежного покрова, ледники, подземные воды и т.п. Однако оптимальные наблюдения за каждым отдельным параметром могут проводиться на других частотах;

- е) X-диапазон обеспечивает наилучшее пространственное разрешение и следовательно лучше всего подходит для наблюдений;
- ф)  $K_a$ -диапазон особенно подходит для снега, который является прозрачным на более низких частотах;
- г) интерферометрия сигналов от одного РСА в различные моменты времени или двух РСА, работающих во время полета в последовательном режиме, позволяет получать цифровую модель рельефа и обнаруживать изменения очертаний (таких как береговой линии и водоемов) и высоты (например, верхнего уровня вулкана).

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

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

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

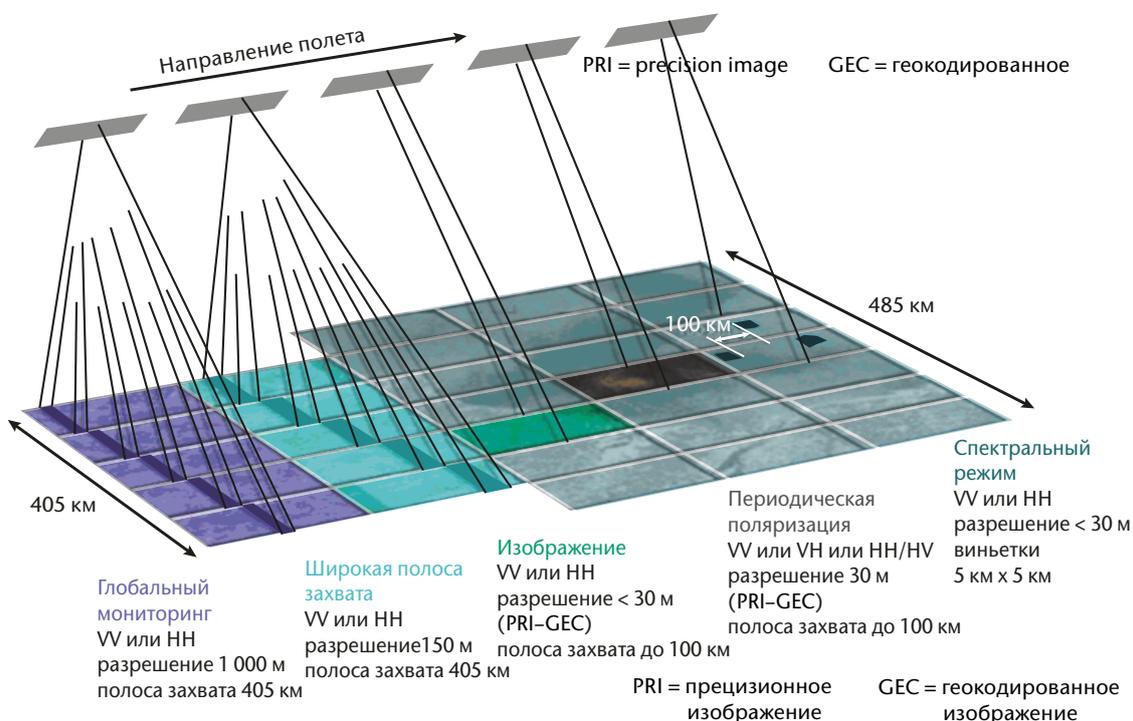


Рис. 3.14. Режимы функционирования ASAR на борту Envisat. В режимах глобального мониторинга и широкой полосы захвата полоса захвата составляет 405 км для 1 000 м или 150 м разрешения. В режимах «изображение» и «периодическая поляризация» 100-километровая полоса захвата с 30-метровым разрешением может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

**3.2.15 Лидарная аппаратура**

Ряд приборов этого типа имеет следующие основные характеристики:

- a) рабочие длины волн в УФ- (например, 355 нм), ВИД- (например, 532 нм), БИК- (например, 1 064 нм) или КВИК- (например, 1 600 нм) диапазонах;
- b) возможно использование двух длин волн, двух приемников (для рассеяния Ми и Рэлея); поляриметрия;
- c) горизонтальное разрешение в 100-метровом диапазоне, которое часто может снижаться до 50 км для получения достаточного количества декоррелированных выборок;
- d) вертикальное разрешение в 100-метровом диапазоне (примерно 10 см для лидарных альтиметров);
- e) сканирование не проводится: наблюдения в надир или под углом.

Космический лидар представляет собой массивное устройство, которое требует оптимизации в зависимости от конкретных видов применения:

- a) доплеровские лидары в основном функционируют в УФ-диапазоне, используя как рассеяние Ми, так и рассеяние Рэлея, и предназначены для слежения за аэрозолем и молекулами воздуха; позволяют получить косую проекцию радиальной составляющей для скорости ветра в безоблачной атмосфере и аэрозоля;
- b) лидары обратного рассеяния функционируют на одной (в УФ-диапазоне) или двух (ВИД- и БИК-диапазоны) длинах волн, часто имеют более одной поляризации; наблюдения в надир, позволяющие определить профиль аэрозоля, высоту верхней границы облака и атмосферные неоднородности, такие как высота верхней границы планетарного пограничного слоя и тропопауза;
- c) лидарные альтиметры обычно функционируют на двух длинах волн (ВИД- и БИК-диапазоны); наблюдения в надир используются как очень высокое вертикальное разрешение (для возвышений морского льда) и горизонтальное разрешение (ледовые границы);
- d) лидары дифференциального поглощения функционируют на одной длине волны с центром на максимуме поглощения одной из малых газовых составляющих в УФ-, ВИД-, БИК- или КВИК-диапазонах, а также в близкорасположенных окнах прозрачности; наблюдения ведутся в надир, с высоким вертикальным разрешением за такими компонентами, как O<sub>3</sub>, H<sub>2</sub>O и CO<sub>2</sub>.

В таблицах 3.35—3.38 приводятся характеристики доплеровского лидара (ALADIN), лидара обратного рассеяния (CALIOP), лидарного альтиметра (GLAS) и лидара дифференциального поглощения (CO<sub>2</sub> лидар).

**Таблица 3.35. Пример доплеровского лидара: ALADIN на борту спутника ADM-Aeolus**

<i>ALADIN</i>	<i>Лазерный доплеровский измеритель параметров атмосферы</i>
Спутник	Программа по изучению динамики атмосферы (ADM)-Aeolus
Программа исследований	Профиль ветра в безоблачной атмосфере, профиль аэрозоля, высота верхней границы облаков
Основные характеристики	Одна длина волны (355 нм), боковой обзор: 35° от надира Лазер с высоким спектральным разрешением (ЛВСП) для распознавания типов аэрозолей
Дополнительная информация	<a href="https://www.wmo-sat.info/oscar/instruments/view/17">https://www.wmo-sat.info/oscar/instruments/view/17</a>

**Таблица 3.36. Пример лидара обратного рассеяния: CALIOP на борту спутника CALIPSO**

<i>CALIOP</i>	<i>Лидар с ортогональной поляризацией для наблюдения за облаками и аэрозолями</i>
Спутник	Лидар и инфракрасный радиолокатор для спутниковых наблюдений облаков и аэрозолей (CALIPSO)
Программа исследований	Профиль аэрозоля, высота верхней границы облаков и атмосферные неоднородности (высота верхней границы планетарного пограничного слоя и тропопаузы)
Основные характеристики	Две длины волны (532 и 1 064 нм), измерения с двумя ортогональными поляризациями
Дополнительная информация	<a href="https://www.wmo-sat.info/oscar/instruments/view/73">https://www.wmo-sat.info/oscar/instruments/view/73</a>

**Таблица 3.37. Пример лидарного альтиметра: GLAS на борту спутника ICESat**

<i>GLAS</i>	<i>Геофизическая лазерная альтиметрическая система</i>
Спутник	Спутник для изучения льда, облачности и возвышения суши (ICESat)
Программа исследований	Толщина и топография полярного ледового щита, высота верхней границы облаков, аэрозоли
Основные характеристики	Две длины волны (532 и 1 064 нм)
Дополнительная информация	<a href="https://www.wmo-sat.info/oscar/instruments/view/155">https://www.wmo-sat.info/oscar/instruments/view/155</a>

**Таблица 3.38. Пример лидара дифференциального поглощения: лидар CO<sub>2</sub> на борту спутника ASCENDS**

	<i>Лидар CO<sub>2</sub></i>
Спутник	Активное зондирование эмиссии CO <sub>2</sub> в ночное, дневное время и по временам года (ASCENDS)
Программа исследований	Мониторинг CO <sub>2</sub> с беспрецедентной точностью при помощи лазерного локатора
Основные характеристики	Длина волны 1,572 мкм для CO <sub>2</sub> Также рассматривается возможность мониторинга O <sub>2</sub> на 1 260 нм или на 765 нм
Дополнительная информация	<a href="https://www.wmo-sat.info/oscar/instruments/view/86">https://www.wmo-sat.info/oscar/instruments/view/86</a>

### 3.2.16 Градиометры/акселерометры

Знание гравитационного поля является исключительно важным для моделирования Земли как твердого тела. Существуют несколько спутниковых методов для решения этой проблемы:

- a) длинноволновые составляющие гравитационного поля измеряются при помощи радиолокационной или лидарной альтиметрии, либо при помощи высокоточной орбитографии (например, лазерной дальнометрии, радиопозиционирования, ГНСС, слежения за звездами);
- b) коротковолновые составляющие (аномалии и возмущения гравитационного поля) наблюдаются на высоте спутника при помощи акселерометров и градиометров, совмещенных с системами определения расстояния между спутниками. Акселерометр измеряет колебания гравитационного поля вдоль траектории спутника. Градиометр охватывает целый ряд акселерометров, которые измеряют тензор градиента гравитационного поля. Спутниковые дальномерные системы представляют собой приемопередающие системы, работающие, как правило, в К-диапазоне (24 ГГц) и  $K_a$ -диапазоне (32 ГГц). Они предназначены для точного измерения расстояния и изменений в расстоянии между спутниками на скоординированных орбитах. Такие же измерения могут производиться путем приема сигналов с десятков спутников ГНСС: это позволяет определять изменения в местоположении с особой точностью.

В таблицах 3.39 и 3.40 приводятся характеристики градиометра/акселерометра (EGG) и высокоточной системы измерения расстояния между спутниками (HAIRS).

**Таблица 3.39. Пример акселерометра/градиометра: EGG на борту спутника GOCE**

<i>EGG</i>	<i>Трехосный электростатический гравитационный градиометр</i>
Спутник	Исследователь гравитационного поля и установившихся океанских течений (GOCE)
Программа исследований	Твердая оболочка Земли Наблюдение за гравитационным полем Земли вдоль орбиты
Основные характеристики	Три пары трехосных акселерометров, специально сконфигурированных для измерения тензора градиента гравитационного поля, точность: $10^{-12} \cdot \text{м} \cdot \text{с}^{-2}$ , разрешение: $2 \cdot 10^{-12} \cdot \text{м} \cdot \text{с}^{-2} \cdot \text{Гц}^{-1/2}$
Дополнительная информация	<a href="https://www.wmo-sat.info/oscar/instruments/view/127">https://www.wmo-sat.info/oscar/instruments/view/127</a>

**Таблица 3.40. Пример системы измерения расстояния между спутниками: HAIRS на борту спутника по изучению климата и гравитационных возмущений (GRACE)**

<i>HAIRS</i>	<i>Высокоточная система измерения расстояния между спутниками</i>
Спутник	GRACE (2 спутника, одновременно находящиеся в полете на расстоянии 220 км друг от друга)
Программа исследований	«Твердая оболочка Земли» Наблюдения за гравитационным полем Земли вдоль орбиты
Основные характеристики	Двухчастотная дальнометрия в К-диапазоне (24 ГГц) и $K_a$ -диапазоне (32 ГГц), точность: 10 мкм
Дополнительная информация	<a href="https://www.wmo-sat.info/oscar/instruments/view/176">https://www.wmo-sat.info/oscar/instruments/view/176</a>

### 3.2.17 Приборы для мониторинга солнечной активности

Мониторинг солнечной активности осуществляется путем дистанционного зондирования или посредством измерений *in situ* солнечного ветра в глубоком космическом пространстве или с орбиты Земли. Могут быть использованы различные подходы к проведению измерений:

- a) электромагнитное излучение: измеряется радиометрами, спектрометрами и поляриметрами  $\gamma$ -лучей (менее 0,001 нм), X-лучей (0,001—10 нм), самых коротких длин волн УФ-излучения (10—120 нм), УФ-излучения (120—380 нм), ВИД (380—780 нм) и более длинных длин волн, включая радиоволны (более 1 м);
- b) энергетические частицы (электроны, протоны,  $\alpha$ -частицы, ионы, космические лучи, нейтроны): диапазон энергий обычно разбивается на высокоэнергетический, средне-энергетический и низкоэнергетический; при этом границы диапазонов зависят от типа заряженных частиц; измерения могут интегрироваться по всему энергетическому диапазону или части диапазона; внутри диапазона может быть использована спектроскопия;
- c) магнитные и электрические поля, измеряемые непосредственно в солнечном ветре и определяемые по фотосфере; эти поля определяются на основе либо измерений солнечного ветра, либо спектроскопии солнечных изображений в видимом диапазоне на основе эффекта Зеемана, или путем выполнения доплеровского анализа или использования множественной поляризации;
- d) измерения могут проводиться путем интегрирования по всему солнечному диску; получение изображения солнечного диска или получение изображения только одной солнечной короны в результате затенения диска (коронография);
- e) одним из конкретных видов наблюдений является наблюдение за интенсивностью солнечного излучения, либо его интегральной величины или спектрально разрешаемого (см. 3.2.9).

Пример характеристик аппаратного комплекса для мониторинга солнечной активности из точки L1 Лагранжа (точки либрации), SOHO, приводится в таблице 3.41.

**Таблица 3.41. Пример аппаратного комплекса измерения солнечной активности: аппаратура SOHO**

<i>Аппаратура SOHO</i>	
Спутник	Обсерватория для солнечных и гелиосферических исследований (SOHO)
Программа исследований	Наблюдение за Солнцем из точки Лагранжа L1
Основные характеристики	Приборный комплекс для дистанционного зондирования солнечной атмосферы Приборный комплекс для изучения <i>in situ</i> частиц солнечного ветра Гелио-сейсмологический аппаратный комплекс (изучение недр Солнца)
Дополнительная информация	<a href="https://www.wmo-sat.info/oscar/satellites/view/458">https://www.wmo-sat.info/oscar/satellites/view/458</a>

### 3.2.18 Приборы для мониторинга параметров космической среды

Мониторинг параметров космической среды на уровне платформы позволяет получить информацию, которая используется для мониторинга и прогнозирования общих условий космической погоды, а также для обеспечения безопасности платформы. Такая аппаратура обычно включает в себя:

- a) детекторы заряженных частиц, предназначенные для конкретных диапазонов энергии, либо интегральных, либо спектрально разрешаемых;
- b) магнетометры и электрометры.

Пример характеристик аппаратного комплекса для мониторинга *in situ* параметров космической среды ГАК-М приводится в таблице 3.42.

**Таблица 3.42. Пример аппаратного комплекса для мониторинга параметров космической среды: ГАК-М на борту спутника Метеор-М**

ГАК-М	Гелиогеофизический аппаратный комплекс
Спутник	«Метеор-М» № 1, «Метеор-М» № 2, «Метеор-М» № 2-1, «Метеор-М» № 2-2
Программа исследований	Мониторинг параметров космической среды на высоте спутника
Основные характеристики	Аппаратный комплекс: Спектрометр геоактивных излучений (МСГИ-МКА): Потоки электронов в энергетическом диапазоне 0,1—15 кэВ (канал высокой чувствительности) Потоки ионов (протонов) в энергетическом диапазоне 0,1—15 кэВ (канал высокой чувствительности) Потоки электронов в энергетическом диапазоне 0,1—15 кэВ (канал низкой чувствительности) Мониторинг интегральных потоков электронов с пороговой энергией 40 кэВ Система радиационного мониторинга (КГИ-4С): Общий поток протонов с пороговой энергией: 5, 15, 25, 30 и 40 МэВ Общий поток электронов с пороговой энергией: 0,17; 0,7; 1,7; 2,0 и 3,2 МэВ Потоки протонов с пороговой энергией: 25 и 90 МэВ
Дополнительная информация	<a href="https://www.wmo-sat.info/oscar/instruments/view/822">https://www.wmo-sat.info/oscar/instruments/view/822</a>

### 3.2.19 Магнетометры и датчики электрического поля

Магнитное и электрическое поля в магнитосфере могут быть измерены *in situ*, когда спутник движется по своей орбите. Если это высокоэксцентрическая орбита, то она пересекает магнитосферу на различных широтах, обеспечивая получение трехмерных профилей. Градиенты полей лучше наблюдать, когда сразу несколько спутников находятся на скоординированных орбитах. Общепринятыми приборами для этих целей являются:

- a) скалярные или векторные магнетометры;
- b) средства измерения потока электронов (используемые для расчета электрического поля).

Пример характеристик аппаратного комплекса Cluster для трехмерных наблюдений за магнитосферой с использованием четырех спутников приводится в таблице 3.43.

**Таблица 3.43. Пример аппаратного комплекса для мониторинга параметров магнитосферы: аппаратура Cluster**

<i>CIS</i>	<i>Кластерный ионный спектрометр</i>
Спутник	Cluster A, B, C и D (четыре спутника, работающие одновременно на скоординированных орбитах)
Программа исследований	Мониторинг магнитосферы в 3-D
Основные характеристики	Комплекс включает в себя следующие приборы: Феррозондовый магнитометр (FGM), пространственно-временной анализ флуктуаций поля (STAFF), электрические поля и волны (EFW), волны высокой частоты и исследование электронной плотности по релаксации (WHISPER), широкополосные данные (WBD), цифровой волновой процессор (DWP), измеритель электронного смещения (EDI), эксперимент: Кластерный ионный спектрометр (CIS), прибор для исследования плазмы, электронов и токов (PEACE), исследования при помощи адаптивных детекторов частиц (RAPID), прибор активного контроля потенциала космического аппарата (ASPOC)
Дополнительная информация	<a href="https://www.wmo-sat.info/oscar/instruments/view/766">https://www.wmo-sat.info/oscar/instruments/view/766</a>