ГЛАВА 3

СЕНСОРЫ И ПЛАТФОРМЫ

3.1. Введение

Информацию о расположенных на земной поверхности объектах и их свойствах можно получить, измеряя параметры собственного излучения Земли и отраженного электромагнитного излучения Солнца, которые зависят от физических, химических и биологических свойств изучаемых объектов. Измерения проводят с помощью сенсоров, которые устанавливают на стационарных или движущихся платформах. Поскольку характеристики получаемых данных зависят от комбинации «сенсор — платформа», для решения разных прикладных задач используют разные сенсоры, а платформами для их размещения могут служить искусственные спутники Земли или воздушные летательные аппараты.

3.2. Общая классификация сенсоров и платформ

По отношению к источнику энергии все сенсоры можно разделить на пассивные и активные. *Пассивные сенсоры* служат для измерения характеристик излучения внешнего источника, в качестве которого обычно выступает Солнце. *Активные сенсоры* сами являются источником излучения. В частности, самый обычный фотоаппарат может, в зависимости от условий съемки, выступать в роли как активного, так и пассивного сенсора. Пока съемка ведется при естественном освещении, фотоаппарат работает как пассивный сенсор, но как только мы начинаем применять вспышку, тот же самый фотоаппарат становится активным сенсором.

В зависимости от поставленной задачи сенсоры могут размещаться на наземных, воздушных или космических платформах.

Наиболее точные данные об объектах получают с помощью наземных станций. В дальнейшем эту информацию можно использовать в качестве опорных данных при анализе космических или аэроснимков. Сенсоры, установленные на воздушных летательных аппаратах (самолетах и вертолетах), позволяют получать детальные снимки практически любой области Земли. Наконец, космические платформы, в качестве которых используют искусственные спутники Земли, предназначены, прежде всего, для периодической съемки изучаемой территории. В данный момент работает около 15 спутников. Съемка производится в широком спектральном диапазоне и с различным пространственным разрешением от долей метра до нескольких километров. Благодаря этому космические снимки нашли широкое

применение в самых разных областях научной и хозяйственной деятельности человечества.

Орбиты спутников должны соответствовать возможностям сенсоров и целям запуска. Тип орбиты зависит от ее высоты и ориентации относительно поверхности Земли, а также от направления движения спутника по орбите.

Если орбита спутника расположена в экваториальной плоскости на высоте около 36000 км, а направление его движения совпадает с направлением вращения Земли, то положение такого спутника относительно земной поверхности будет постоянным. Такие спутники называют геостационарными; они идеально подходят для метеорологических наблюдений и обеспечения связи.

Субполярные орбиты, у которых остается постоянным угол между плоскостью орбиты и направлением на Солнце, называют *солнечно-синхронными*. Спутники, выведенные на такие орбиты, используют для периодической сезонной съемки объектов при одинаковых условиях освещения, соответствующих одному и тому же местному времени. Благодаря постоянству условий съемки отпадает необходимость в коррекции снимков по освещенности и упрощается анализ изменений наблюдаемых свойств объектов во времени.

Спутники на солнечно-синхронных орбитах используют, в основном, для картографирования территорий. Вместе с тем, возможность проведения с помощью этих спутников периодической обзорной съемки обширных территорий делает их незаменимыми при решении многих задач мониторинга окружающей среды.

3.3. Ресурсные спутники

Основные запуски ресурсных спутников осуществлялись в рамках американской программы LANDSAT, французской SPOT и индийской IRS. Спутники этих серий выводились на низкие орбиты высотой не более 1000 км. Установленные на них сенсоры предназначены для получения снимков с относительно низким пространственным разрешением и спектральным разрешением менее 0,1 мкм.

Спутники серии LANDSAT

Первый спутник LANDSAT-1 (первоначальное название ERTS-1 — *Earth Resources Technology Satellite*) был запущен Национальным управлением США по аэронавтике и исследованию космического пространства (НАСА) 23 мая 1972 года. В 1983 году программа LANDSAT была передана в ведение Национального управления по исследованию океана и атмосферы (НОАА), а с 1985 года снимки из фонда LANDSAT стали предоставляться потребителям на коммерческой основе.

Все спутники LANDSAT выводились на субполярные солнечно-синхронные орбиты. Высота орбит первых трех спутников составляла 900 км, а период повторяемости съемки равнялся 18 дням. Следующие

Табл. 3.1. Характеристики спутников LANDSAT

Спутник	Дата запуска	Высота орбиты, км	Тип орбиты	Наклонение, град.	Период обращения, мин	Время пересечения плоскости экватора	Период повторяемости съемки, дни	Сенсор	Размер сцены, км	Разрешение, м	Кол-во спектральных каналов
LANDSAT-1	23 июля 1972 г.	900	Солнечно-синхронная	91	103	9:42	18	MSS, RBV	185 185	80 80	4 3
LANDSAT-2	22 января 1975 г.	900	Солнечно-синхронная	91	103	9:42	18	MSS, RBV	185 185	80 80	4 3
LANDSAT-3	5 марта 1978 г.	900	Солнечно-синхронная	91	103	9:42	18	MSS, RBV RBV RBV	185 185	80 (120 тепловой канал) 40	5 1
LANDSAT-4	16 июля 1982 г.	705	Солнечно-синхронная	98,2	99	9:45	16	MSS TM	185 185	80 (120 для теплового канала) 30	4 7
LANDSAT-5	1 января 1984 г.	705	Солнечно-синхронная	98,2	98,9	9:45	16	MSS TM	185 185	80 (120 для канала 6) 30	4 7
LANDSAT-6	5 октября 1993 г.	705	Солнечно-синхронная	98,2	98,9	10:00	16	PAN TM (ETM)	- 185 -	В 1-5,7 каналах разрешение на местности 30 м, в 6 канале — 120 м, в 8 канале — 15 м	1 7
LANDSAT-7	15 апреля 1999 г.	705	Солнечно-синхронная	98,2	98,9	10:00	16	ETM + TM Thermal PAN	- 185 - 	30 60 15	6 1 1

спутники этой серии выводились на орбиты высотой 700 км с периодом повторной съемки 16 дней. Для достижения оптимальных условий освещенности запуски проводили так, чтобы время пересечения экваториальной плоскости у всех спутников было примерно одинаковым.

Табл. 3.2. Сенсоры, установленные на спутниках Landsat

Сенсор	Канал	Спектральный диапазон, мкм	Области применения снимков
RBV	1	0,475—0,575	
	2	0,580—0,680	
	3	0,690—0,830	
MSS	1	0,500—0,600	Гидрология: выделение водных потоков, насыщенных наносами, и определение границ мелких водоемов
	2	0,600—0,700	Сельское хозяйство
	3	0,700—0,800	Определение границ водной и земной поверхности, растительности. Дешифрирование структур рельефа
	4	0,800—1,100	Окно прозрачности при атмосферной дымке
	5	10,400—12,600	Гидротермальное картографирование
TM	1	0,450—0,520	Картографирование прибрежных вод, дешифрирование границ растительного покрова, хвойной и лиственной растительности
	2	0,520—0,600	Отраженное излучение от «здорового» растительного покрова в зеленой части спектра
	3	0,630—0,690	Зона поглощения хлорофилла для дифференциации посевов
	4	0,760—0,900	Оценка биомассы, определение границ водных поверхностей
	5	1,550—1,750	Растительный покров и влажность почв
	6	10,400—12,500	Гидротермальное картографирование
	7	2,080—2,350	Температурное картографирование, определение тепловой нагрузки на посевы
ETM	Спектральные диапазоны, аналогичные съемочной аппаратуры TM		Те же, что у TM
	PAN	0,500—0,900	
ETM+	Все спектральные диапазоны съемочной аппаратуры ETM, но с разрешением теплового канала 60 м		Те же, что у ETM

В разное время на борту спутников LANDSAT устанавливали различные съемочные системы: RBV (*Return Beam Vidicon*), MSS (*Multi-Spectral Scanner*), TM (*Thematic Mapper*), ETM (*Enhanced Thematic Mapper*) и ETM+ (*Enhanced Thematic Mapper Plus*). Эти съемочные системы обеспечивали широкий охват съемки с размерами сцены 185 × 185 км и позволяли получать снимки среднего разрешения в нескольких спектральных диапазонах. Характеристики спутников серии LANDSAT представлены в табл. 3.1, а параметры соответствующих сенсоров — в табл. 3.2. Пример космического снимка со спутника LANDSAT показан на рис. 3.1; время работы различных спутников на орбите проиллюстрировано на рис. 3.2.

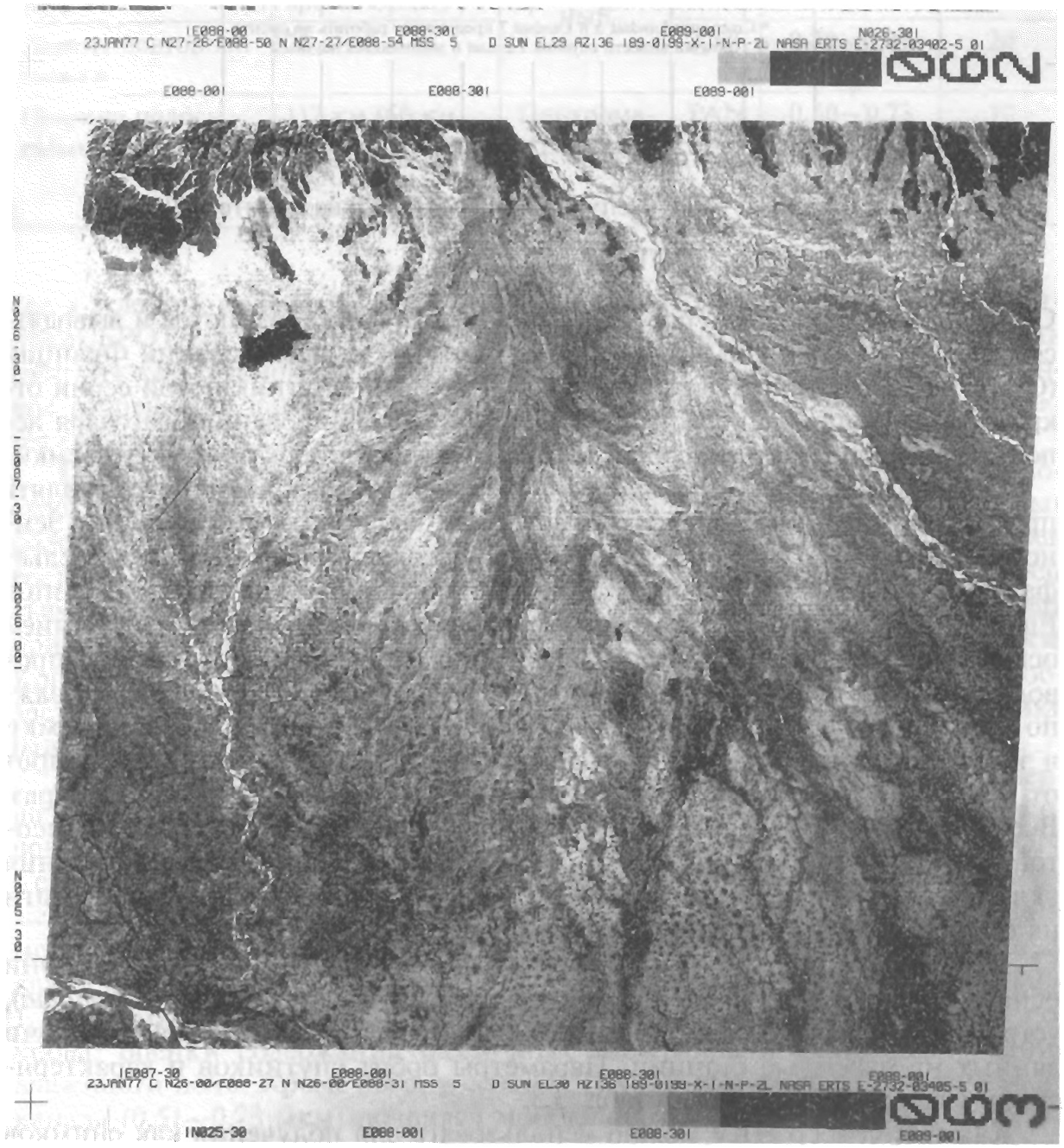

Рис. 3.1. Снимок со спутника LANDSAT

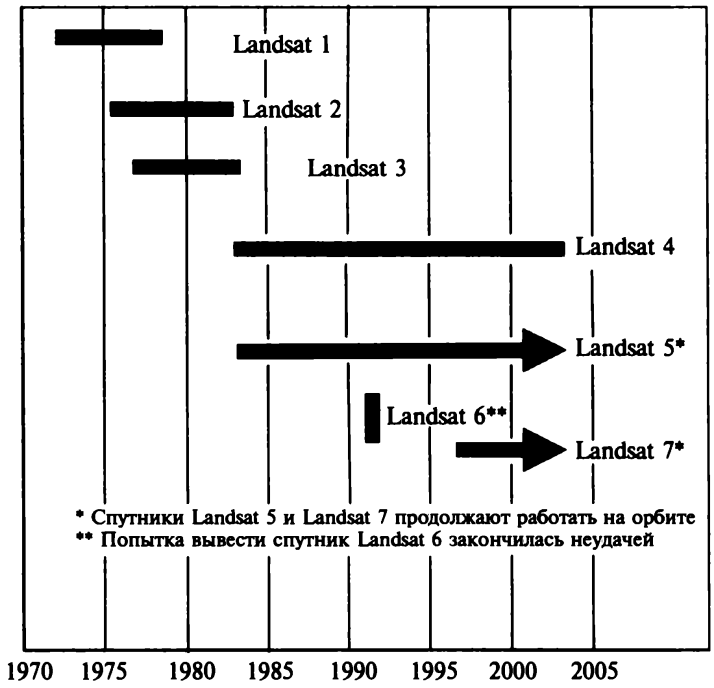

Рис. 3.2. Периоды работы спутников LANDSAT на орбите [92]

Спутники серии SPOT

Спутники SPOT (*System Pour L Observation de la Terre*) создаются и выводятся на орбиту Национальным центром космических исследований Франции (CNES) в сотрудничестве с Бельгией и Швецией. Спутники этой серии открыли новую эпоху в области дистанционного зондирования благодаря использованию линейки сенсоров, обеспечивающей широкую полосу съемки.

Установленные на спутниках SPOT сенсоры позволяют осуществлять прицельную съемку. Это дает возможность выполнять стереосъемку земной поверхности с соседних витков, что позволяет создавать модели рельефа и имеет огромное значение для дешифрирования и картографирования. Еще одним преимуществом оптической системы сенсора с отклонением оси съемки на 27 град. от направления в надир является возможность проводить съемку одного и того же участка с наибольшей частотой. Это важно при мониторинге динамических явлений. В результате, период съемки в экваториальных областях сокращается до трех дней. В интервале широт от 40 до 45 град. количество повторных съемок увеличивается в 11 раз. Все спутники SPOT выводились на солнечно-синхронные орбиты высотой 822 км с периодом съемки 26 дней и местным временем пересечения экваториальной плоскости 10 ч 30 мин. К моменту написания этой книги на орбиту было выведено пять спутников серии SPOT.

Первые три спутника этой серии были полностью идентичны. Они оснащались съемочной оптической системой HRV (*Visible High Resolution*), устройствами записи данных на магнитную ленту и системой передачи данных на наземные станции. Параметры орбит спутников и характеристики сенсоров приведены в табл. 3.3.

Каждый сенсор HRV можно использовать для получения как снимков во всей видимой части спектра (режим P), так и многоспектральных сним-

Табл. 3.3. Спутники SPOT-1, SPOT-2 и SPOT-3 [91]

Параметры орбиты		**Характеристики сенсоров**			
Тип орбиты	Солнечно-синхронная	HRV			
Высота орбиты	822 км				
Наклонение	98,7 град.	Режим съемки	Канал	Спектральный диапазон, мкм	Разрешение, м
Период обращения	101,4 мин	Многоспектральный	XS1	0,50—0,59	20
Время пересечения плоскости экватора	10:30 (местное стандартное время США)		XS2	0,61—0,68	20
Период повторной съемки	26 дней		XS3	0,78—0,89	20
Ширина полосы съемки	117 км (60 км на каждый сенсор HRV, 3 км перекрытие)	Панхроматический	PAN	0,50—0,73	10

ков в зеленом, красном и инфракрасном диапазонах (режим XS). На спутниках SPOT-2 и SPOT-3 было установлено два сенсора HRV, которые могли работать как автономно, так и согласованно друг с другом. Пространственное разрешение панхроматических снимков составляет 10 м, многоспектральных — 20 м.

Главным элементом оптической системы сенсора HRV является плоское зеркало, которое может поворачиваться на угол ±27 град. (45 угловых положений с интервалом 0,6 град.). В результате, каждый сенсор способен вести съемку в полосе 475 км по обе стороны от трассы. Ширина полосы съемки, при этом, зависит от угла отклонения оси съемки. Так, например, при максимальном угле 27 град. ширина полосы съемки составляет 60 км. Когда два сенсора направлены так, чтобы вести съемку двух соседних областей с перекрытием 3 км в надире, суммарная ширина полосы съемки равняется 117 км.

На спутнике второго поколения, SPOT-4, была установлена усовершенствованная съемочная система, состоящая из двух оптических сенсоров HRVIR (Visible and Infrared High-Resolution) и сенсора VEGETATION. Сенсоры HRVIR обеспечивают то же пространственное разрешение и те же возможности отклонения угла съемки, что аппаратура HRV. Различие между ними состоит в том, что у сенсора HRVIR есть дополнительный канал регистрации излучения в среднем инфракрасном диапазоне (1,980—1,730 мкм). Этот канал используют для мониторинга растительного покрова, оценки содержания различных минералов и картографирования влажности почв. Кроме того, у сенсора HRVIR вместо панхроматического канала (0,51—0,73 мкм) появился моноканал B2 (0,61—0,68 мкм), который можно использовать для получения черно-белых снимков с разрешением

Табл. 3.4. Параметры орбиты и характеристики сенсоров спутника SPOT-4 [91]

<table>
<tr><th colspan="2">Параметры орбиты characteristics</th><th colspan="4">Характеристики сенсоров</th></tr>
<tr><td>Тип орбиты</td><td>Солнечно-синхронная</td><td colspan="4" rowspan="2">HRVIR</td></tr>
<tr><td>Высота орбиты</td><td>822 км</td></tr>
<tr><td>Наклонение</td><td>98,7 град.</td><td>Режим съемки</td><td>Канал</td><td>Спектральный диапазон, мкм</td><td>Разрешение, м</td></tr>
<tr><td>Период обращения</td><td>101,4 мин</td><td rowspan="4">Многозональный</td><td>Bl</td><td>0,50—0,59</td><td>20</td></tr>
<tr><td>Время пересечения экватора</td><td>10:30 (местное стандартное время США)</td><td>B2</td><td>0,61—0,68</td><td>20</td></tr>
<tr><td rowspan="2"></td><td rowspan="2"></td><td>B3</td><td>0,78—0,89</td><td>20</td></tr>
<tr><td>Период повторной съемки</td><td>26 дней</td><td>MIR</td><td>1,58—1,75</td><td>20</td></tr>
<tr><td>Ширина полосы съемки</td><td>117 км (60 км на каждый HRVIS, 3 км перекрытие)</td><td>Панхроматический</td><td>M</td><td>0,61—0,68</td><td>10</td></tr>
<tr><td colspan="2" rowspan="6"></td><td colspan="4">VEGETATION</td></tr>
<tr><td colspan="2">Канал съемки</td><td>Спектральный диапазон, мкм</td><td>Разрешение, м</td></tr>
<tr><td colspan="2">BO</td><td>0,45—0,52</td><td>1000</td></tr>
<tr><td colspan="2">B2</td><td>0,61—0,68</td><td>1000</td></tr>
<tr><td colspan="2">B3</td><td>0,78—0,89</td><td>1000</td></tr>
<tr><td colspan="2">MIR</td><td>1,58—1,75</td><td>1000</td></tr>
</table>

10 м либо многозональных снимков с разрешением 20 м. Параметры орбиты и характеристики сенсоров спутника SPOT-4 приведены в табл. 3.4.

Новый сенсор, получивший название VEGETATION, в основном предназначен для измерения характеристик растительного покрова. Он был создан под руководством CNES в рамках программы VEGETATION, финансируемой Европейским союзом, Бельгией, Францией, Италией и Швецией. С помощью этого сенсора ежедневно получают снимки всей поверхности Земли с разрешением 1 км, что позволяет вести наблюдение за глобальными и региональными изменениями окружающей среды. Сенсоры VEGETATION и HRVIR работают независимо друг от друга. Сенсор VEGETATION оснащен широкоугольной радиометрической камерой для получения снимков в четырех спектральных диапазонах: синем, красном, ближнем и среднем инфракрасном (табл. 3.4). Благодаря широкой полосе охвата в 2250 км можно провести съемку практически всей поверхности Земли всего за один день.

На спутнике SPOT-5 вместо сенсоров HRVIR были установлены два сенсора HRG (*High Resolution Geometric*), которые регистрируют данные в тех же спектральных диапазонах, что и сенсоры HRVIR. Одно из отличий новых сенсоров состоит в увеличении разрешения снимков с 20 до 10 м в диапазонах B1, B2 и B3 (табл. 3.5). Кроме того, спектральный диапазон панхроматического канала стал снова таким же, как и у первых трех спутников серии SPOT, но разрешение черно-белых снимков увеличилось при этом до 5 и даже 2,5 м. Таким образом, все снимки HRG можно разделить в зависимости от их разрешения на четыре категории:

1. Снимки в коротковолновом инфракрасном диапазоне (канал SWIR) с разрешением 20 м.
2. Многозональные снимки в зеленом, красном и ближнем инфракрасном диапазонах с разрешением 10 м.
3. Панхроматические снимки с разрешением 5 м.
4. Искусственно синтезированные панхроматические снимки с разрешением 2,5 м.

С помощью нового сенсора HRS (*High Resolution Stereoscopic*) получают стереопары снимков (с отклонением оси съемки вперед-назад) с разреше-

Табл. 3.5. Параметры орбиты и характеристики сенсоров спутника SPOT-5 [91]

<table>
<tr><th colspan="2">Параметры орбиты</th><th colspan="4">Характеристики сенсоров</th></tr>
<tr><td>Тип орбиты</td><td>Субполярная солнечно-синхронная</td><td colspan="4">HRG</td></tr>
<tr><td>Высота орбиты</td><td>832 км</td><td colspan="4"></td></tr>
<tr><td rowspan="2">Наклонение</td><td rowspan="2">98,7 град.</td><td>Режим съемки</td><td>Канал</td><td>Спектральный диапазон, мкм</td><td>Разрешение, м</td></tr>
<tr><td rowspan="4">Многозональный</td><td>B1</td><td>0,50—0,59</td><td>10</td></tr>
<tr><td>Период обращения</td><td>101 мин</td><td>B2</td><td>0,61—0,68</td><td>10</td></tr>
<tr><td rowspan="2">Время пересечения экватора</td><td rowspan="2">10:30 (местное стандартное время США)</td><td>B3</td><td>0,78—0,89</td><td>10</td></tr>
<tr><td>Период повторного выхода на точку</td><td>26 дней</td><td>SWIR</td><td>1,58—1,75</td><td>20</td></tr>
<tr><td>Ширина полосы съемки</td><td>117 км (60 км на каждый HRG, 3 км перекрытие)</td><td>Панхроматический</td><td>PAN</td><td>0,548—0,710</td><td>5 и 2,5 (искусственно синтезированный)</td></tr>
<tr><td colspan="2" rowspan="3"></td><td colspan="4">HRS</td></tr>
<tr><td>Панхроматический</td><td>PAN</td><td>0,51—0,73</td><td>10</td></tr>
<tr><td colspan="4">Сенсор VEGETATION такой же, как на спутнике SPOT-4</td></tr>
</table>

нием 10 м при ширине полосы охвата 120 км и полосе съемки 600 км. Эти снимки используются для построения цифровых моделей. Максимальный угол отклонения оси съемки у сенсоров HRS составляет 20 градусов (см. табл. 3.5). Сенсоры VEGETATION, установленные на спутнике SPOT-5, ничем не отличаются от своего аналога на спутнике SPOT-4.

Спутники серии IRS

Спутники IRS являются частью Национальной системы использования природных ресурсов Индии (NNRMS), и их запуски координируются на государственном уровне Комитетом планирования NNRMS. Первым индийским спутником, выведенным на орбиту с целью гражданского применения данных ДЗ, стал IRS-1A, запуск которого состоялся 17 марта 1988 года. На спутнике были установлены два сенсора LISS (*Linear Imaging Self-scanning*), предназначенные для крупномасштабной съемки. Такие же сенсоры были установлены и на втором спутнике этой серии — IRS-IB, который был выведен на орбиту 29 августа 1991 года. Дальнейшее развитие

Табл. 3.6. Характеристики некоторых спутников IRS

Характеристики	IRS-1A и IRS-1B	IRS-1C	IRS-1D
Тип орбиты	Субполярная солнечно-синхронная	Полярная солнечно-синхронная	Полярная солнечно-синхронная
Высота орбиты	914 км	817 км	821 км
Наклонение	99,028 град.	98,69 град.	98,62 град.
Период обращения	103,192 мин	101,35 мин	100,56 мин
Время пересечения экватора	10:25 (местное время)	10:30 (местное время)	10:40 (местное время)
Период повторного выхода на точку	26 дней	24 дня	24 дня, 5 дней для сенсоров PAN и WiFS
Ширина полосы съемки	148 км (LISS-1)	142 км (LISS-3 VIS)	141 км (LISS-3 VIS)
	74 м (LISS-2)	148 км (LISS-3 SWIR)	148 км (LISS-3 SWIR)
		70 км (PAN)	70 км (PAN)
		810 км (WiFS)	812 км (WiFS)
Пространственное разрешение	72,50 м (LISS-1)	23,5 м (LISS-3 VNIR)	23,5 м (LISS-3 VNIR)
	36 м (LISS-2)	70,0 м (LISS-3 MIR)	70,0 м (LISS-3 MIR)
		70,0 м (LISS-3 SWIR)	70,0 м (LISS-3 SWIR)
		5,8 м (PAN)	5,8 м (PAN)
		188 м (WiFS)	188 м (WiFS)

индийской программы связано с запуском спутника IRS-1C 28 декабря 1995 года и спутника IRS-1D в сентябре 1997 года. На этих космических аппаратах были установлены новые сенсоры PAN и WiFS (*Wide Field Sensor*), что позволило с успехом использовать снимки IRS для мониторинга состояния природных ресурсов, планирования развития городской инфраструктуры, инвентаризации лесов, борьбы с природными катастрофами и исследования окружающей среды. Характеристики спутников IRS представлены в табл. 3.6, параметры установленных на них сенсоров — в табл. 3.7. Периоды работы спутников IRS на орбите отмечены на рис. 3.3

Следует отметить одну важную характеристику сенсора PAN. Как и у сканирующих систем спутников SPOT, у этого сенсора предусмотрена возможность отклонение полосы съемки в обе стороны от трассы спутника на 398 км (угол отклонения съемочной оси ±26 градусов). Благодаря этому период повторной съемки составляет всего 5 дней.

Новый этап космической программы Индии начался с запуска спутников серии IRS-P. Спутники IRS-P3 и IRS-P4 были выведены на орбиту с космодрома Шрихарикота ракетой PSLV (*Polar Satellite Launched Vehicle*). Высота субполярной солнечно-синхронной орбиты спутника IRS-P3 составила

Табл. 3.7. Параметры сенсоров, установленных на борту спутников IRS

Сенсор	IRS-1A и IRS-1B		IRS-1C	IRS-1D	Область применения
	Номер канала	Спектральный диапазон, мкм			
LISS	1	0,45—0,52			Мониторинг состояния окружающей среды в прибрежной зоне, полоса поглощения хлорофилла
	2	0,52—0,59	0,52—0,59	0,52—0,59	Дешифрирование зеленой растительности; разделение почв и горных пород
	3	0,62—0,68	0,62—0,68	0,62— 0,68	Полоса поглощения хлорофилла различных видов растений
	4	0,77—0,86	0,77—0,86	0,77—0,86	Определение границ водных поверхностей
	5		1,55—1,70	1,55—1,70	Картографирование растительного покрова
PAN			0,50—0,75	0,50—0,75	Идентификация природных ресурсов
WiFS	1		0,62—0,68	0,62—0,68	Глобальное картографирование растительного покрова
	2		0,77—0,86	0,77—0,86	Глобальное картографирование растительного покрова
	3			1,55—1,75	Глобальное картографирование растительного покрова

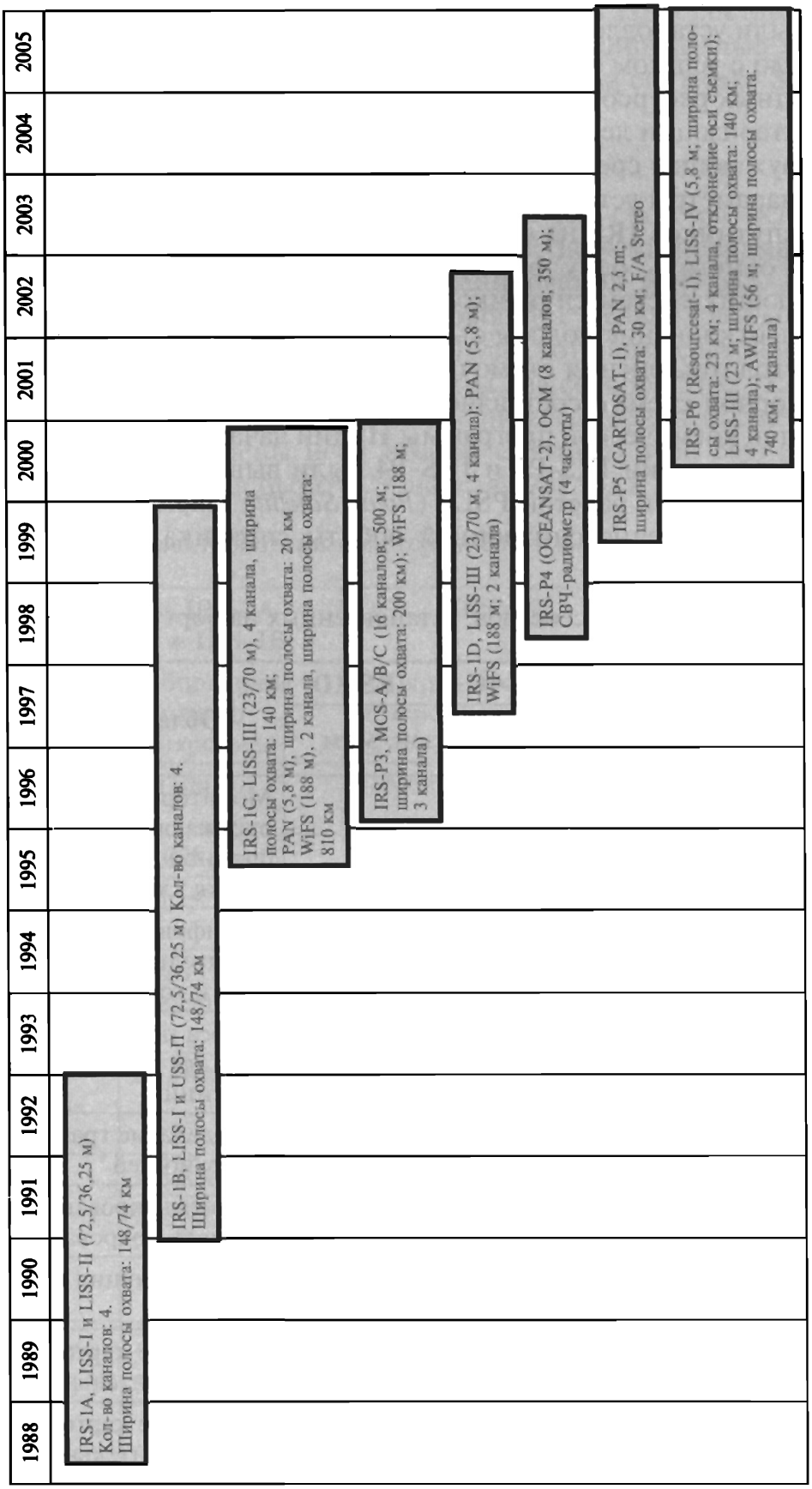

Рис. 3.3. Индийские спутники

817 км с временем прохождения экватора — 10 ч 30 мин. На его борту был установлен рентгеновский телескоп и два сенсора ДЗ: WiFS и MOS (*Modular Opto-electronics Scanner*). Сенсор WiFS на этом спутнике имеет по сравнению со своим аналогом на спутнике IRS-1C дополнительный канал регистрации в среднем инфракрасном диапазоне (MIR, *Middle Infra-Red*), предназначенный для исследования временных изменений растительного покрова. Сенсор MOS в основном предназначен для океанологических исследований [93]. Характеристики сенсоров на борту IRS-P3 представлены в табл. 3.8.

Следующим спутником этой серии стал IRS-P4, известный также под названием *Oceansat*. Этот спутник был выведен на орбиту ракетой PSLV 26 мая 1999 года с космодрома Шрихарикота. Характеристики установленных на этом спутнике съемочных систем OCM (*Ocean Colour Monitor*) и MSMR (*Multi-frequency Scanning Microwave Radiometer*) представлены в табл. 3.9.

Следующий спутник этой серии IRS-P6 (другое название — *ResourceSat*-1) был запущен 17 октября 2003 года. Задачи этого спутника не ограничиваются только сбором данных для мониторинга состояния земельных, водных и сельскохозяйственных ресурсов. Благодаря установленному на его борту записывающему устройству данные с этого спутника передаются на наземные комплексы по всему миру в режиме почти реального времени. По сравнению со съемочными системами спутников IRS-1C и IRS-1D сенсоры *ResourceSat*-1 отличаются следующими характеристиками

1. Сенсор LISS-4 ведет съемку в четырех спектральных диапазонах видимой и ближней инфракрасной области спектра (VNIR) с разрешением 5,8 м и возможностью отклонения оси съемки на угол ±26 град., что позволяет получать стереопары снимков и сократить период повторяемости съемки до 5 дней.
2. Сенсор LISS-3 ведет съемку в трех диапазонах видимой и ближней инфракрасной области спектра, а также в коротковолновом инфракрасном диапазоне (SWIR) с разрешением 23,5 м.
3. Сенсор AWIFS (*An Advanced Wide Field Sensor*) ведет съемку в тех же диапазонах, что и LISS-3, но с пространственным разрешением 56—70 м.

Табл. 3.8. Характеристики сенсоров, установленных на спутнике IRS-P3 [94]

Параметр	MOS-A	MOS-B	MOS-C	WiFS
Разрешение, м	1598 × 1395	523 × 523	523 × 644	188 × 188 (B3 и B4) 188 × 246 (B5)
Ширина полосы съемки, км	195	200	192	770
Период повторной съемки, дни	24	24	24	24
Спектральный диапазон, мкм	0,755—0,768	0,408—1,01	1,5—1,7	0,62—0,68 (B3) 0,77—0,68 (B4) 1,55—1,69 (B5)

Табл. 3.9. Характеристики съемочных систем OCM и MSMR [95]

OCM		MSMR
Канал	Спектральный диапазон, нм	Частота, ГГц
1	402—422	6,60
2	433—453	10,65
3	480—500	18,00
4	500—520	21,00
5	545—565	
6	660—680	
7	745—785	
8	845—888	
Пространственное разрешение, м	360 × 236	Вертикальная и горизонтальная поляризация для всех частот. Пространственное разрешение: 120, 80, 40 и 40 км соответственно
Ширина полосы съемки, км	1360	1360
Радиометрическое разрешение, бит	12	12

Сенсор LISS-4 отличается от сенсора LISS-3 увеличением разрешения снимков в диапазоне B5 до 23,5 м. Разрешение в диапазонах B2, B3 и B4 составляет 5,8 м (в надире). Сенсор LISS-4 можно использовать в двух режимах съемки:

1. Многозональный режим с шириной полосы съемки 23 км в каждом из трех спектральных диапазонов.
2. Панхроматический режим с шириной съемки 70 км в одном из спектральных диапазонов, который выбирается по команде с наземной станции управления.

В многозональном режиме количество передаваемых на Землю значений пикселов в каждом диапазоне составляет 4000. Поскольку эти данные можно выбрать произвольным образом в интервале из 12000 пикселов, для определения исследуемой области необходимо задать ее географические координаты, то есть интервалы значений широты и долготы. Возможность отклонения оси съемки на угол ±26 град. сокращает период повторяемости съемки до 5 дней. Подробные характеристики сенсора LISS-4 представлены в табл. 3.10.

Сенсор AWiFS является усовершенствованным вариантом сенсора WiFS, который устанавливали на борту спутников IRS-1C и IRS-1D. Новый сенсор ведет съемку в тех же трех спектральных диапазонах, что и LISS-3, но с разрешением снимков от 56 м и шириной полосы съемки 740 км. Для увеличения охвата камера AWiFS разделена на два оптико-электронных модуля, AWiFS-A и AWiFS-B, которые расположены под углом 11,94 град. друг

Табл. 3.10. Характеристики сенсора LISS-4 [97]

Параметр	Значения
Спектральные диапазоны	B2 0,52—0,59 мкм B3 0,62—0,68 мкм B4 0,77—0,86 мкм
Пространственное разрешение	5,8 м (в надире)
Радиометрическое разрешение	10 бит

относительно друга. Более подробный перечень характеристик сенсора AWiFS приведен в табл. 3.11.

Сравнение характеристик сенсоров, установленных на спутниках серии *Landsat*, SPOT и IRS, спектральных диапазонов и областей применения соответствующих космических снимков приводится в табл. 3.12.

Спутники CARTOSAT-1

Цифровые космические снимки IRS-1C и IRS-1D можно использовать для обновления топографических карт городов масштаба от 1:10000. Данные о высотах рельефа, получаемые в результате обработки стереопар, имеют точность порядка 10 м. Все это послужило стимулом к дальнейшему развитию аппаратуры высокого разрешения, ориентированной на решение задач картографии. С помощью двух камер PAN, которые установлены на новом спутнике CARTOSAT-1, получают снимки с разрешением 2,5 м. Для получения стереопар снимков ось одной камеры отклонена на угол 26 град., а ось второй — на угол минус 5 град. Основные характеристики съемочной системы CARTOSAT-1 приведены в табл. 3.13 (см. [43]).

Запуск спутника CARTOSAT-1 состоялся 5 мая 2005 года. Спутник был выведен на полярную солнечно-синхронную орбиту высотой 618 км с наклонением 97,87 град. Спутник пересекает экватор в 10 ч 30 мин по местному времени. Период орбиты составляет 116 дней, а минимальный период повторной съемки — 5 дней. Последнее достигается благодаря возможности отклонения оси съемки на 26 град.

Табл. 3.11. Характеристики сенсора AWiFS [98]

Параметр	Значения
Спектральные диапазоны	B2 0,52—0,59 мкм B3 0,62—0,68 мкм B4 0,77—0,86 мкм B5 1,55—1,70 мкм
Полоса съемки	370 км для каждого модуля 740 км — для обоих
Радиометрическое разрешение	10 бит

Основная цель запуска спутника CARTOSAT-1 состояла в получении данных для картографирования, которые планируется предоставлять потребителям в нескольких форматах: в виде снимков, картографической продукции и цифровых моделей местности. Все снимки при этом подразделяются на несколько категорий в зависимости от области применения, детализации, времени поступления, стерео- или монорежима обработки (табл. 3.14)

Картографическая продукция (IMDP, *Image Map Data Products*) состоит из ортотрансформированных снимков CARTOSAT-PAN и одного или не-

Табл. 3.12. Спектральные диапазоны различных сенсоров [99]

Диапазон	Тип сенсора	Области применения
Синий	TM канал 1	Батиметрия прибрежных вод и озер, картографирование флювиальных отложений, дешифрирование границы между почвенным и растительным покровами, хвойной растительностью и лиственной. Фрагментарные и зернистые горные породы (сланцы, фосфаты, эвапориты) рассеивают излучение в синей области спектра, соответствующей каналу 1 (иногда 2)
Зеленый	TM канал 2 MSS канал 1 SPOT XS/X1 канал 1 IRS LISS канал 1	Измерение пика спектральной яркости растительного покрова в зеленом диапазоне для оценки его состояния, картографирование содержания осадков в воде. Яркость железистых горных пород выше яркости пород, содержащих окись железа
Красный	TM канал 3 MSS каналы 2 и 3 SPOT XS/X1 канал 2 IRS LISS канал 2	Окно поглощения хлорофилла. Используется для выделения различных видов растительных покровов. Интенсивность излучения в этом диапазоне выше у пород и почв с большим содержанием окиси железа
Ближний ИК	TM канал 4 MSS каналы 3 и 4 SPOT XS/X1 канал 3 IRS LISS канал 3	Используется для оценки состояния растительного покрова и определения границ водоемов. Свойства хлорофилла «здоровой» растительности приводят к появлению так называемой «красной границы» между диапазонами 3 и 4. В отсутствие растительности каналы 1—5 используют для определения относительного содержания железа в горных породах
Коротковолновый ИК	TM канал 5 SPOT XI канал 4 IRS LISS канал 4	Используется для оценки содержания воды в растительности и почве. Более высокая интенсивность излучения в этом диапазоне соответствует низким значениям влажности. Канал также можно использовать для разделения толщины снежного покрова и облачности (низкие значения — для снега, высокие — для облаков). В отсутствие растительности уровень сигнала в канале 5 существенно зависит от присутствия в составе горных пород и почв различных окислов железа

Табл. 3.12. Спектральные диапазоны различных сенсоров [99] *(продолжение)*

Диапазон	Тип сенсора	Области применения
ИК	TM канал 7	Используется для разделения различных горных пород и гидротермальных областей, а также при разведке полезных ископаемых. Наличие гидроксильной группы (OH) в химической структуре минерала приводит к поглощению излучения вблизи длины волны 2,2 мкм. По этому признаку можно отличать, например, глинистые минералы, которым соответствует очень низкая интенсивность сигнала в этом диапазоне. Такой же эффект наблюдается и для карбонатов. В то же время кварцам, частицам пыли в атмосфере и обнаженным почвам часто соответствует высокая интенсивность сигнала в этом канале 7
Тепловой ИК	TM канал 6	Используется для теплового картографирования, оценки тепловой нагрузки на растительный покров и сельскохозяйственные посевы, а также для определения мест теплового загрязнения. Большая интенсивность излучения в этом диапазоне соответствует более темным породам

скольких векторных слоев с картографической информацией, которая может быть собрана заранее или получена в результате дешифрирования снимков CARTOSAT-1. Потребителям также предоставляются текстовые файлы с обозначением векторных элементов и дополнительной информацией. Планируемую к выпуску продукцию можно разделить на три категории:

1. Двумерные данные в стандартной картографической проекции или проекции, указанной потребителем.
2. Картографические данные условной размерности 2,5D.
3. Трехмерные картографические данные и, по отдельному заказу, программное обеспечение, необходимое для их просмотра.

Поставка данных состоит из самих панхроматических снимков CARTOSAT-1, прошедших предварительную коррекцию. По желанию заказчи-

Табл. 3.13. Основные характеристики съемочной системы CARTOSAT-1 [42]

Параметр	Значения
Пространственное разрешение (поперек трассы × вдоль трассы), м	2,5 × 2,78 (съемка вперед) 2,2 × 2,23 (съемка назад)
Спектральное разрешение а) количество каналов б) спектральный диапазон, нм	 1 панхроматический 500—850
Радиометрическое разрешение, бит	10
Ширина полосы съемки, км	30 (стереосъемка) 26,855 (комбинирование модулей в монорежиме)

Табл. 3.14. Уровни коммерческой продукции ДЗ [42]

Уровень продукции	Радиометрическая коррекция	Геометрическая коррекция	Назначение
OA RAW	Не применяется	Не применяется	Для служебного использования
OB RAD	Применяется	Не применяется	Для обработки данных средствами потребителя
1 SYS	Применяется	Вводятся поправки на характеристики сенсора	Быстро предоставляемые цифровые данные приемлемого качества (без учета поправок на рельеф, для данных, полученных в монорежиме)
2 GCP	Применяется	Вводятся поправки на характеристики сенсора с использованием наземных опорных точек	Более точная географическая привязка, приведены к виду картографической системы координат
3A DEM	Применяется	Вводятся поправки на харатеристики сенсора, геопривязка выполняется с использованием наземных опорных точек и грубой цифровой модели рельефа	Ортотрансформированные снимки
3B DEMB	Применяется	Вводятся поправки на характеристики сенсора, геопривязка выполняется с использованием наземных опорных точек и собственной цифровой модели рельефа	Ортотрансформированные снимки. Применяется только для стереосъемки
3C DEMC	Применяется	Поправки на характеристики сенсора с использованием наземных опорных точек и собственной цифровой модели рельефа (на изломы поверхности)	Ортотрансформированные снимки высокой точности

ка эти снимки могут быть совмещены с мультиспектральными снимками сравнимого разрешения.

Цифровые модели рельефа

Планируется выпуск цифровых моделей рельефа (ЦМР) трех типов.

Тип I. Исходный набор данных ЦМР.

- В виде набора исходных данных, соответствующих случайно расположенным точкам измерения высот.

- В формате нерегулярной триангуляционной сети (TIN) с сохранением всех исходных точек.
- В виде набора данных, заданных на прямоугольной сетке, с сохранением всех исходных точек.

Тип II. Исходный набор данных ЦМР с добавлением линий излома поверхности.

- В виде набора нерегулярно расположенных точек измерения высоты рельефа с добавлением линий, указывающих на изломы поверхности.
- В формате нерегулярной триангуляционной сети (TIN) с сохранением всех исходных точек и добавлением линий излома одного из двух типов: 1) линий, совпадающих со сторонами треугольников TIN (изгибы поверхности) и 2) дополнительных линий, указывающих на резкие изменения рельефа (изломы).
- В виде набора данных, заданных на прямоугольной сетке, с сохранением всех исходных точек и вручную выделенными линиями излома.

Тип III. Интерполированная ЦМР

- В виде набора данных на прямоугольной сетке, полученных путем интерполяции исходных нерегулярных данных и линий излома.
- В виде изогипс-линий, соединяющих точки одинаковой высоты (с различными интервалами).
- В виде набора параллельных вертикальных профилей произвольной ориентации, заданной потребителем.

С запуском спутника CARTOSAT-1 появилась дополнительная возможность получения коммерческой съемки в стереорежиме, что позволило создавать цифровую модель рельефа и проводить работы по обновлению топографических карт.

3.4. Снимки высокого разрешения

Стереоснимки со спутников SPOT-5, IRS-1C и IRS-1D можно использовать для обновления карт масштаба 1:25000 и хуже. Дальнейшее усовершенствование съемочной аппаратуры привело к увеличению пространственного разрешения космических снимков. Такие сенсоры установлены на спутниках IKONOS, *QuickBird, WorldView-1* и *OrbView-3*, которые и описываются в этом разделе.

Спутники IKONOS

Исторический запуск коммерческого спутника IKONOS был произведен компанией «Спейс имаджинг» 24 сентября 1999 года с базы Вандерберг Военно-воздушных сил США. Этот космический аппарат, выведенный на орбиту ракетой-носителем *Athena* II, был изготовлен корпорацией «Локхид Мартин». Помимо нее инвесторами программы запуска спутника стали американская компания «Рейтеон», японская «Мицубиси», сингапурская «Ван-дер-Хорст», корейская «Хёндей спейс анд эейркрафт», таиландская компания «Локсли паблик компани» и Шведская космическая корпорация [100].

Слово IKONOS имеет древнегреческое происхождение и означает «изображение». Создание этого коммерческого спутника было вызвано возрастающим запросом потребителей данных ДЗ в самых разных областях применения — от картографии до мониторинга состояния сельскохозяйственных посевов и планирования городской инфраструктуры. IKONOS стал пер-

Табл. 3.15. Характеристики спутника IKONOS [101]

Характеристики спутника IKONOS	
Дата запуска	24 сентября 1999 г., 11:21:08 A.M. PDT
Ракета-носитель	Athena II
Изготовитель	Lockheed Martin
Место запуска	База Военно-воздушных сил США «Вандерберг», шт. Калифорния
Угол съемки	Возможность отклонения угла съемки как вдоль, так и поперек трассы
Масса	725 кг
Орбита	
Высота	681 км
Наклонение	98,1 град.
Скорость полета	7 км/с (26 000 км/ч)
Узловое время на нисходящей ветви	10 ч 30 мин
Период обращения	98 мин
Тип орбиты	Солнечно-синхронная
Сенсоры	Панхроматический и мультиспектральный
Разрешение	1 м для панхроматических снимков (номинальное значение при угле отклонения <26 град.) 4 м для мультиспектральных снимков (номинальное значение при угле отклонения <26 град.)
Спектральный диапазон	Панхроматический: 0,45—0,90 мкм Многозональный: (как у Landsat-7 и Landsat-5 для каналов 1-4 сенсора TM)
Ширина полосы съемки	11 км
Период повторной съемки	3 дня при разрешении снимков 1 м (на широте 40°) 1,5 дня при разрешении 1,5 м (на широте 40°)
Динамический диапазон	11 бит Размер сцены: 11 × 11 км Полоса съемки: 11 × 100 км
Размеры снимков	Мозаика снимков: до 10 000 км^2 До двух смежных областей площадью 10 000 км^2 за один виток Возможность получения стереопар в полосе 22 × 130 км с одного витка

вым спутником, с помощью которого можно одновременно получать панхроматические снимки с разрешением 1 м и мультиспектральные снимки с разрешением 4 м. На цифровых снимках этого спутника, выведенного на солнечно-синхронную орбиту высотой 680 км и вращающегося вокруг Земли со скоростью 7 км/с, можно различить объекты площадью всего 1 м^2. Период обращения спутника вокруг Земли равен 98 мин, период повторной съемки — от 3 дней, время прохождения экватора — 10 ч 30 мин. Благодаря углу отклонения от надира в ±26 град. ширина полосы охвата достигает 700 км, что позволяет проводить съемку больших территорий в короткие сроки. Расчетный срок службы спутника на орбите более семи лет. Характеристики спутника IKONOS приведены в табл. 3.15.

Один снимок IKONOS при съемке в надир захватывает область размерами 11 × 11 км. Заказ архивной или новой съемки можно делать как полными сценами, так и территорией произвольной формы. Данные с этого спутника предоставляются с разным уровнем обработки:

1. Данные, пересчитанные в соответствии с эллипсоидом и проекцией, которые необходимы заказчику.
2. Ортотрансформированные снимки, полученные с использованием ЦМР, созданной на основе стереоснимков IKONOS (наземный контроль осуществляется только для данных наивысшей категории точности).

Различные виды коммерческих данных IKONOS и их назначение приведены в табл. 3.16.

Табл. 3.16. Уровни обработки снимков и области применения [101]

Название	Точность плановой привязки, м	Соответствие масштабу	Сферы применения
Geo	±50	—	Дешифрирование и анализ снимков, не требующие высокой пространственной точности
Reference	± 25,4	1:50 000	Картографирование больших территорий и использование в ГИС по заказам средств массовой информации, страховых компаний и других коммерческих организаций
Map	±12	1:24 000	Планирование городской инфраструктуры, оценка взаимного влияния разных факторов
Pro	±10	1:12 000	Изучение окружающей среды, планирование городской инфраструктуры и развития транспортных сетей, сельское хозяйство, телекоммуникации
Precision	±4	1:4 800	Картографирование городских территорий, использование в ГИС для решения задач, требующих высокой пространственной точности
Precision Plus	±2	1:2 400	Картографирование городских территорий, использование в ГИС для решения задач, требующих высокой пространственной точности

Табл. 3.17. Характеристики спутника IKONOS-2 [102]

Характеристики	
Ракета-носитель	Athena II
Разрешение снимков	1 м (панхроматические), 4 м (многозональные)
Ширина полосы съемки	11 км в надире
Размеры сцены	Отдельный снимок: 11 × 11 км Полоса: от 11 × 100 до 11 × 1000 км Полный охват: до 12000 км^2
Период повторной съемки	3 дня для экваториальных территорий при съемке в надир
Тип орбиты	Солнечно-синхронная

Со спутника IKONOS-2 получают панхроматические снимки с пространственным разрешением 1 м, многозональные снимки с пространственным разрешением 4 м и синтезируют цветные снимки с разрешением 1 м. Пространственное разрешение в основном зависит от интервала дискретизации данных (GSD). Для панхроматической съемки этот параметр равен 0,82 м, а для мультиспектральной — 3,2 м (в надире). Период съемки с указанным разрешением для экваториальной области составляет около 3 дней.

Управление полетом спутника IKONOS-2 осуществляется из двух центров — основного, расположенного в городе Торнтон, и вспомогательного в городе Норман, США. Передача данных съемки полярных областей ведется на наземную станцию компании «Спейс имаджинг» неподалеку от города Фейрбенкса и на совместно используемую станцию, предоставленную Шведской космической корпорацией. Основные характеристики спутника IKONOS-2 перечислены в табл. 3.17

Спутник QuickBird

Запуск коммерческого спутника *QuickBird* был осуществлен компанией «Диджитал глоб» в октябре 2002 года. Разрешение панхроматических снимков, полученных с этого спутника, составляет от 61 см, а разрешение мультиспектральных (4 спектральных канала) — от 2,44 м. Каждый снимок охватывает территорию размером 16,5 × 16,5 км [105]. Характеристики спутника *QuickBird* приведены в табл. 3.18. Со спутника получают панхроматические, мультиспектральные снимки с радиометрическим разрешением 11 бит. Одновременность выполнения съемки в панхроматическом и мультиспектральном режимах позволяют синтезировать цветные снимки с пространственным разрешением панхроматических, что дает возможность проводить анализ в четырех спектральных диапазонах. Существует четыре уровня обработки снимков *QuickBird* в зависимости от задач потребителей.

Панхроматические снимки получают в 11-битном формате (2048 оттенков серого цвета), а потребителям предоставляют либо в 8-битном (256 оттенков),

Табл. 3.18. Характеристики спутника *QuickBird* [103]

Тип орбиты	Солнечно-синхронная
Высота орбиты	450 км
Ширина полосы съемки	16,5 км
Радиометрическое разрешение	11 бит
Размер снимка	16,5 × 16,5 км
Период повторной съемки	От 3,5 дней
Дата запуска	18 октября 2001 г.
Тип сенсора	PAN
Разрешение снимков	0,61 м
Кол-во каналов	1
Спектральный диапазон	0,45—0,90 мкм
Тип сенсора	MSI
Разрешение снимков	2,44 м
Кол-во каналов Канал 1 Канал 2 Канал 3 Канал 4	4 Синий: 0,45—0,52 мкм Зеленый: 0,52—0,60 мкм Красный: 0,63—0,69 мкм Ближний ИК: 0,76—0,90 мкм

либо в 16-битном формате, который необходим для более точного дешифрирования. Оба формата поддерживаются ГИС и картографическими программами. Мультиспектральные снимки в синем, зеленом, красном и ближнем инфракрасном диапазонах предоставляются также в 16- или 8-битном формате. Искусственно синтезированные снимки с разрешением 60 или 70 см предоставляются в виде цветных (красный, синий и зеленый диапазоны), псевдоцветных (красный, зеленый и инфракрасный диапазоны) или совмещенных (красный, синий, зеленый и инфракрасный диапазоны) снимков.

Продукция *QuickBird* разделена на три категории в зависимости от уровня обработки исходных данных:

1. Уровень *Basic*.
2. Уровень *Standard*.
3. Уровень *Ortho-rectified*.

Снимки уровня Basic

Снимки *QuickBird* этого уровня предназначены для тех потребителей, у которых есть все необходимые средства для обработки изображений. В состав набора данных включают информацию, необходимую для фотограмметрической обработки, — сведения о модели камеры и пространственных параметрах съемки. Снимки уровня *Basic* проходят радиометрическую коррекцию и процедуру внесения поправок, вызванных искажениями камеры. В то же время, они не трансформированы в картографическую проекцию, и к ним не применялась геометрическая коррекция. Фактическое разрешение панхро-

матических снимков — от 61 см при съемке в надир до 72 см при отклонении в 25 град. Для многозональных снимков соответствующие значения равны 2,44 и 2,88 м. Снимки уровня *Basic* характеризуются как «геометрически необработанные», однако при их дальнейшей обработке с учетом вспомогательных данных ISD (*Image Support Data*) можно добиться среднеквадратичной точности горизонтальной привязки 14 м (без учета влияния рельефа).

Снимки уровня Standard

Снимки этого уровня предназначены тем потребителям, которых устроит средняя точность привязки. В дополнение к процедурам обработки, которые проходят снимки уровня *Basic*, также применяется геометрическая коррекция. Данные трансформируются в картографическую проекцию, необходимую заказчику. Пространственное разрешение выровнено по всему полю снимка. При геометрической коррекции устраняются эффекты, связанные с особенностями орбиты спутника, вращением и кривизной поверхности Земли, а также искажения, возникающие при панорамной съемке. Потребителям предоставляются две разновидности таких снимков.

Табл. 3.19. Основные характеристики снимков со спутников *QuickBird* [104]

	Уровень *Basic*	**Уровень *Standard***	**Уровень *Ortho***
Разрешение			
Панхроматические снимки	61 см (в надире) 72 см (при отклонении 25 град.)	61 см (в надире) 72 см (при отклонении 25 град.)	61 см (в надире) 72 см (при отклонении 25 град.)
Многозональные снимки	2,44 м (в надире) 2,88 м (при отклонении 25 град.)	2,44 м (в надире) 2,88 м (при отклонении 25 град.)	2,44 м (в надире) 2,88 м (при отклонении 25 град.)
Снимки повышенной контрастности	—	0,6 или 0,7 м	0,6 или 0,7 м
Радиометрическая коррекция	Да	Да	Да
Поправки на характеристики сенсора	Да	Да	Да
Геометрическая коррекция	Нет	Да	Да
Ортотрансформирование	Нет	Нет	Да
Точность привязки	Без геометрической коррекции	14 м (СКО) без учета искажений за рельеф	7,7 м (СКО), соответствует масштабу 1:25 000
Границы области заказчика пересекают несколько сцен	Мозаика: нет Гистограммная коррекция: нет	Мозаика: нет Гистограммная коррекция: нет	

Уровень *Standard*. Для внесения поправок на рельеф относительно используют грубую цифровую модель рельефа (ЦМР). Геометрическую коррекцию проводят без учета наземных опорных точек только на основании пространственного положения спутника. Результирующие поправки невелики, поэтому, несмотря на коррекцию, такие снимки не относятся к разряду ортотрансформированных.

Уровень *Ortho Ready Standard*. В снимки этого уровня не внесены поправки на рельеф, и они предназначены для тех потребителей, которые хотят самостоятельно выполнить работы по ортотрансформированию с использованием ЦМР высокого разрешения. В других случаях рекомендуется выбирать продукцию уровня *Standard*.

Снимки уровня Ortho-rectified

К этой категории относятся ортотрансформированные снимки, которые готовы к применению в ГИС, в том числе в качестве основного слоя карты или базы данных. Этот тип снимков характеризуется очень высокой геометрической точностью. Для ортотрансформирования снимков необходима цифровая модель рельефа и информация о наземных опорных точках (НОТ). В некоторых случаях такую информацию предоставляет заказчик.

Табл. 3.20. Параметры орбиты спутника и характеристики снимков *QuickBird-1* [103]

Тип орбиты	Не солнечно-синхронная с наклонением 66 град.
Высота орбиты	Переменная
Ширина полосы съемки	22 км
Кол-во бит на пиксел	11
Область снимка	22 × 22 км^2
Период повторяемости съемки	1—5 дней (в зависимости от широты)
Узловое время пересечения плоскости экватора	Переменное
Дата запуска	—
Тип сенсора	PAN
Разрешение	1 м
Кол-во каналов	1
Спектральный диапазон	0,45—0,90 мкм
Тип датчика	MSI
Разрешение	4 м
Кол-во каналов Канал 1 Канал 2 Канал 3 Канал 4	4 Синий: 0,45—0,52 мкм Зеленый: 0,52—0,60 мкм Красный: 0,63—0,69 мкм Ближний ИК: 0,76—0,90 мкм

Все перечисленные виды снимков имеют разные свойства и предназначены для различных целей. Для ортокоррекции снимков уровня *Basic* необходима модель камеры QuickBird RPC (*Rigourous Sensor Model*). Снимки уровня *Standard* ориентированы на те области применения, в которых достаточно точная географическая привязка без поправок на рельеф. Поскольку для получения таких снимков используется грубая цифровая модель рельефа, они не пригодны для последующего ортотрансформирования. Снимки уровня *Ortho Ready Standard* отнесены к нулевой высоте над уровнем моря, поэтому для их использования необходимо внести поправки на рельеф. Наиболее важные характеристики всех рассмотренных выше снимков приведены в табл. 3.19.

Следующим спутником этой серии стал *QuickBird-1*. Основные характеристики этого спутника приведены в табл. 3.20.

Спутник OrbView-1

Спутник *OrbView-1*, запущенный в апреле 1995 года, в настоящее время не эксплуатируется. На его борту были установлены две камеры наблюдения за атмосферой, которые передавали информацию, необходимую для прогноза погоды по всему миру. Со спутника ежедневно получали несколько метеорологических снимков в дневное и ночное время. Эти данные использовали также для долгосрочного прогноза погоды.

На спутнике *OrbView-1* впервые использовали одноканальную съемочную систему с центром в видимой части спектра на длине волны 777 нм и пространственным разрешением снимков 10 м. Полоса охвата составляла 1300 км при наклонении орбиты 70 град. Это обеспечивало съемку почти всей земной поверхности за два дня. Собранные метеорологические данные записывались на борту спутника и дважды в сутки передавались на центральную наземную станцию ORBIMAGE в штате Западная Вирджиния. Затем данные передавались заказчикам через Интернет, причем это происходило почти в режиме реального времени. Параметры спутника *OrbView*-1 приведены в табл. 3.21

Табл. 3.21. Параметры орбиты спутника и характеристики снимков *OrbView-1* [106]

Параметр	Значение
Режим съемки	Монохроматический
Пространственное разрешение	10 км
Кол-во каналов	1
Спектральный диапазон	777 нм
Ширина полосы съемки	1300 км
Область съемки	Непрерывное сканирование
Период повторной съемки	Менее 2 дней
Высота орбиты	740 км
Срок эксплуатации	5 лет (завершена)

Спутник OrbView-2

Со спутника *OrbView*-2, который был выведен на орбиту в августе 1997 года, ежедневно получают многозональные снимки всей поверхности Земли, включая океаны. Снимки *OrbView*-2 применяют для мониторинга биомассы планктона и уровня накопления осадков в океане, а также для оценки общего состояния растительного покрова Земли. Запуск спутника *OrbView*-2 впервые позволил ежедневно получать цветные снимки земной поверхности. Съемка ведется в восьми каналах: шесть в видимой части спектра и два в ближнем инфракрасном диапазоне. Пространственное разрешение снимков составляет 1,1 км.

Съемка со спутника *OrbView*-2, выведенного на полярную орбиту, обеспечивает ежедневный охват всей поверхности Земли, при этом ширина полосы съемки составляет 2800 км. Снимки *OrbView*-2 непрерывно передаются на наземные станции HRPT (*High Resolution Picture Transmission*) в режиме реального времени. Потребители могут получать данные ДЗ непосредственно на свои наземные станции либо приобретать отдельные снимки через оперативную службу компании «Орбиимадж». Снимки *OrbView*-2 используют в различных областях, в частности в рыболовстве, сельском хозяйстве, мореплавании, а также для мониторинга состояния окружающей среды. Параметры орбиты и характеристики снимков *OrbView*-2 приведены в табл. 3.22.

Табл. 3.22. Параметры орбиты спутника и характеристики снимков *OrbView-2* [108]

Параметр	Значение
Режим съемки	Многозональный
Пространственное разрешение	1 км
Кол-во спектральных каналов	8
Спектральный диапазон	402—422 нм
	433—453 нм
	480—500 нм
	500—520 нм
	545—565 нм
	660—680 нм
	745—785 нм
	845—885 нм
Ширина полосы съемки	2800 км
Область снимка	Непрерывная
Макс. скорость передачи данных	2 Мбит/с
Период повторной съемки	1 день
Высота орбиты	705 км
Узловое время	12 ч 00 мин
Срок эксплуатации	7,5 лет

Спутник OrbView-3

Спутник *OrbView-3* стал одним из первых коммерческих спутников, с которого получали космические снимки высокого пространственного разрешения. Разрешение панхроматических снимков *OrbView-3* составляло 1 м, а мультиспектральных — 4 м. На снимках хорошо видны дома, машины и самолеты. С помощью таких снимков можно создавать и обновлять мелкомасштабные карты.

Ширина полосы съемки *OrbView-3* составляла 8 км как для панхроматических, так и для многозональных снимков, а максимальный угол отклонения оси съемки — 45 град. Период повторной съемки — 3 дня. Снимки *OrbView-3* можно было получать в режиме реального времени непосредственно на наземные станции или загружать с компьютеров компании «Орбиимадж», куда данные ДЗ попадают после предварительной записи на борту спутника.

Снимки *OrbView-3* используют в таких областях, как телекоммуникация, нефтяная и газовая промышленность, картография, сельское и лесное хозяйство, мониторинг национальных природных ресурсов. Параметры спутника и характеристики снимков *OrbView-3* приведены в табл. 3.23.

3.5. Спутник EO-1

В 1996 году Национальное агентство США по аэронавтике и исследованию космического пространства начало новую программу, которая получила название Программы нового тысячелетия (*New Millennium Program*, NMP). Ее основная цель заключается в разработке новых технологий, которые помогли бы снизить стоимость космических исследований в XXI веке. Первым спутником, запущенным в рамках этой программы, стал *EO-1* (*Earth Observing*-1)

Табл. 3.23. Параметры спутника и характеристики снимков *OrbView-3* [109]

Параметр	Значение	
Режим съемки	Панхроматический	Мультиспектральный
Пространственное разрешение	1 м	4 м
Количество каналов	1	4
Спектральный диапазон	450—900 нм	450—520 нм 520—600 нм 625—695 нм 760—900 нм
Ширина полосы съемки	8 км	
Период повторной съемки	от 3 дней	
Высота орбиты	470 км	
Узловое время	10 ч 30 мин	
Срок эксплуатации	минимум 5 лет	

Спутник *EO-1* был выведен на орбиту ракетой-носителем *Delta* 7320 с военно-воздушной базы Ванденберг 21 ноября 2000 года. Солнечно-синхронная орбита спутника имеет наклонение 98,7 град. и высоту 705 км. Спутник *EO-1* «движется» по той же орбите, что и *Landsat-7*, с отставанием от последнего на 1 мин. Таким образом поддерживаются одинаковые условия съемки со спутников, что позволяет сравнивать их между собой [111].

На снимках *Landsat-7* и *EO-1* изображены одни и те же области земной поверхности. Три съемочных системы *EO-1* охватывают все сегменты полосы съемки *Landsat-7*. Каждая из них снабжена фильтрами пропускания отраженного излучения в определенных спектральных диапазонах, которые выбираются в зависимости от исследовательской задачи или на основании запросов потребителей.

На спутнике *EO-1* установлены сенсоры трех разных типов: *Advanced Land Imager* (ALI), *Hyperion* и *Linear Etalon Imaging Spectral Array Atmospheric Corrector* (LEISA LAC). Два последних являются гиперспектральными сенсорами, которые ведут съемку в очень узких смежных диапазонах спектра. По сравнению с обычными многозональными сенсорами с их более широкими диапазонами гиперспектральная съемочная система обеспечивает более высокое разрешение. Основные пространственные и спектральные характеристики аппаратуры спутника *EO-1* и системы *Enhanced Thematic Mapper Plus* (ETM+), установленной на спутнике *Landsat-7*, сравниваются в табл. 3.24. Поскольку каждая съемочная система *EO-1* действует как линейка сенсоров, двумерная съемка выполняется просто за счет движения спутника по орбите [86].

Табл. 3.24. Характеристики съемочной системы *EO-1* [86]

Параметр	Landsat-7	EO-1		
	ETM+	ALI	HYPERION	AC
Спектральный диапазон	0,4—2,4 мкм*	0,4—2,4 мкм	0,4—2,5 мкм	0,9—1,6 мкм
Пространственное разрешение	30 м	30 м	30 м	250 м
Ширина полосы съемки	185 км	37 км	7,7 км	185 км
Спектральное разрешение	Переменное	Переменное	10 нм	3—9 нм**
Спектральный охват	Отдельно расположенные диапазоны	Отдельно расположенные диапазоны	Непрерывный	Непрерывный
Разрешение панхроматических снимков	15 м	10 м	—	—
Количество диапазонов	7	10	220	256

* Кроме теплового канала.

** Постоянное разрешение 35 или 55 см.

Съемочная система Advanced Land Imager (ALI)

Установленная на спутнике *EO-1* съемочная система *Advanced Land Imager* (ALI) была разработана в рамках Программы нового тысячелетия (NMP). В фокальной плоскости системы расположена линейка из четырех сенсорных блоков, охватывающих угловой диапазон 3 × 1,625 град. С помощью системы ALI получают снимки с высоты 705 км в тех же спектральных диапазонах, что и снимки *Landsat*. В системе ALI предусмотрено три дополнительных канала регистрации: 0,433—0,453; 0,845—0,890 и 1,20—1,30 мкм (табл. 3.25). Кроме того, в ее состав входит широкоугольная оптическая камера, предназначенная для непрерывной съемки в угловом диапазоне 15 × 1,625 град., с разрешением 30 м для многозональных снимков и 10 м для панхроматических.

Можно ожидать, что в будущем применение технологии ALI позволит снизить стоимость и размеры аппаратуры типа *Landsat в* 4—5 раз. Сравнительные характеристики аппаратуры *EO-1* и *Landsat* приведены в табл. 3.26.

Съемочная система Hyperion

Система *Hyperion* относится к новому классу съемочной аппаратуры, предназначенной для комплексного изучения земной поверхности. Высокий уровень рабочих характеристик, необходимый для научных исследований, достигается благодаря механизму точной калибровки, который был разработан для аппаратуры LEWIS *Hyperspectral Imaging Instrument* (HIS). Более 200 спектральных каналов системы обеспечивают съемку земной поверхности с очень высоким разрешением. Для сравнения напомним, что съемочные системы спутников *Landsat* ведут съемку всего в 10 спектральных диапазонах. Такое увеличение количества каналов съемки вызвано, прежде всего, необходимостью изучения и точной классификации сложных экологических систем [112].

Табл. 3.25. Спектральные диапазоны съемки *EO-1* ALI [111]

Канал	Длина волны, мкм	Разрешение, м
Панхроматический	0,480—0,690	10
MS-1*	0,433—0,453	30
MS-1	0,450—0,515	30
MS-2	0,525—0,605	30
MS-3	0,630—0,690	30
MS-4	0,775—0,805	30
MS-4*	0,845—0,890	30
MS-5*	1,200—1,300	30
MS-6	1,550—1,750	30
MS-7	2,080—2,350	30

* Новые спектральные диапазоны.

Табл. 3.26. Сравнение характеристик *EO-1* и *Landsat-7* [111]

Параметр	ALI	Enhanced Thematic Mapper (ETM+)
Масса, кг	100	425
Мощность, Вт	100	545
Объем, м^3	0,2	1,4
Каналы VNIR и SWIR	10	7
Количество детекторов на канал	6200	16
Тепловой канал	Нет	1
Скорость передачи данных, Мбит/с	300	150
Разрешение панхроматических снимков, м	10	15
Отношение сигнал/шум	4	1

Hyperion является гиперспектральной съемочной системой с 220 каналами (с длиной волны от 0,4 до 2,5 мкм), обеспечивающей пространственное разрешение снимков 30 м. Каждый снимок имеет, кроме того, очень высокое радиометрическое разрешение и охватывает территорию с размерами 7,5 × 100 км. В состав системы входят следующие компоненты:

1. Оптическая система, конструкция которой основана на опыте полетов спутников KOMPSAT EOC. Высокое значение отношения сигнал/шум достигается за счет использования двух независимых спектрометров.
2. Линейка сенсоров в фокальной плоскости системы, созданная на основе аппаратуры, разработанной для программы LEWIS HIS, обеспечивает независимую съемку в коротковолновом инфракрасном диапазоне (SWIR) и в диапазоне видимой и ближней инфракрасной части спектра (VNIR).

Табл. 3.27. Характеристики съемочной системы *Hyperion* [65]

Параметр	Hyperion
Размеры (Д × Ш × В), см	75 × 39 × 65
Масса, кг	49
Средняя потребляемая мощность, Вт	51
Апертура, см	12
Угол обзора, мрад.	0,043
Боковой угол обзора, град.	0,63
Спектральный диапазон, нм	400—2500
Спектральное разрешение, нм	10
Количество спектральных каналов	220
Радиометрическое разрешение, бит	12
Частота кадров, Гц	223,4

3. Криогенная система охлаждения, идентичная той, которая использовалась в программе LEWIS HIS для охлаждения съемочных систем SWIR.

Характеристики съемочной системы *Hyperion* представлены в табл. 3.27. В настоящее время гиперспектральная съемка широко применяется в геологии, горнодобывающей промышленности, лесном и сельском хозяйстве, а также для изучения окружающей среды. Использование снимков *Hyperion* для подробной классификации земельных ресурсов позволит более рационально вести разработку месторождений полезных ископаемых, давать более точные прогнозы и оценки урожайности, а также строить более точные карты.

Съемочная система Atmospheric Corrector

Качество снимков иногда существенно снижается из-за поглощения и рассеяния излучения в атмосфере. Для повышения точности регистрации отраженного излучения на спутнике *EO-1* была установлена новая съемочная система — *Atmospheric Corrector* (AC) [112].

Система AC имеет простую и компактную конструкцию и обладает следующими характеристиками:

1. Гиперспектральная система средней разрешающей способности, оснащенная краевым фильтром.
2. Спектральный диапазон: 0,89—1,58 мкм. Каналы съемки выбраны так, чтобы обеспечить оптимальную коррекцию снимков высокого разрешения.
3. Коррекция снимков поверхности Земли в зависимости от временных изменений состава атмосферы (в первую очередь, паров воды).

Систему *Atmospheric Corrector* применяют для решения научных и коммерческих задач, в которых наблюдается снижение качества данных из-за поглощения излучения в результате присутствия в атмосфере паров воды и аэрозолей. Появление этой системы дало возможность использовать измеренные, а не модельные значения коэффициента поглощения и тем самым формировать более точные физические модели дистанционного зондирования. В будущем эта технология позволит не только получать более точную информацию о природных ресурсах, но и создавать более совершенные модели их использования.

3.6. Метеорологические спутники

Мониторинг облачности и прогноз погоды были одними из первых гражданских областей применения космических снимков. Первый метеорологический спутник TIROS-1 (*Television and Infrared Observation Satellite*-1) был запущен США в 1960 году. В следующие пять лет на субполярные орбиты было выведено еще несколько спутников, с которых проводилась регулярная съемка атмосферы Земли. В 1966 году НАСА вывело на орбиту геостационарный спутник ATS-1 (*Applications Technology Satellite*), с которого получают снимки примерно половины поверхности Земли и облачного покрова каждые полчаса.

Запуск этого спутника положил начало регулярным наблюдениям погодных явлений. Сегодня запуски метеорологических спутников осуществляются несколькими странами. По сравнению с аппаратурой ресурсных спутников, съемочные системы метеорологических спутников обеспечивают менее высокое разрешение снимков, но существенно больший охват съемки. Как правило, они обладают достаточно высокой временной разрешающей способностью, позволяющей вести наблюдение за поверхностью Земли, влажностью атмосферы и облачным покровом, обеспечивая тем самым почти непрерывный глобальный мониторинг и возможности прогноза погоды. В следующих разделах приводится обзор наиболее типичных метеорологических спутников и съемочных систем.

Спутник GOES

Спутники GOES (*Geostationary Operational Environmental Satellite*), пришедшие на смену спутникам серии ATS, были разработаны НАСА специально для Национального управления США по исследованию океана и атмосферы (НОАА) для того, чтобы обеспечить частую мелкомасштабную съемку земной поверхности и облачного покрова в интересах Национальной метеорологической службы США. Космические снимки GOES используются метеорологами для мониторинга и прогноза погоды вот уже более 30 лет. Эта серия является частью глобальной сети метеорологических спутников, выведенных на геостационарные орбиты с интервалом по долготе примерно 70 град., обеспечивая почти полных охват земной поверхности. Два спутника GOES выведены на экваториальные геостационарные орбиты высотой 36000 км. Съемочные системы каждого из них охватывают приблизительно треть поверхности Земли. Один спутник расположен на 75 град. з.д. и используется для мониторинга Северной и Южной Америки. Второй находится на 135 град. з.д. и служит для наблюдения за Северной Америкой и бассейном Тихого океана. С помощью двух этих спутников постоянно снимается территория от 20 град. з.д. до 165 град. в.д.

Выделяют два поколения спутников GOES. К первому поколению относятся спутники от GOES-1 (запущен в 1975 году) до GOES-7 (выведен на орбиту в 1992 году). Из-за особенностей конструкции они вели съемку лишь в течение небольшого времени (приблизительно 5% от общего срока эксплуатации). Недостатки первой серии были устранены на спутнике второго поколения — GOES-8, который был выведен на орбиту в 1994 году. Сегодня съемка Земли со спутников GOES ведется с интервалом 15 минут. Улучшается также пространственное и радиометрическое разрешение снимков. Все это дает возможность вовремя получать необходимые данные для метеорологических прогнозов.

Спутники второго поколения оснащены двумя независимыми съемочными системами. Первая ведет съемку в 5 спектральных диапазонах видимой и инфракрасной части спектра. Благодаря инфракрасному каналу можно получать снимки как в дневное, так и в ночное время. Возможность отклонения оси съемки и выбора параметров сканирования позволяет по-

Табл. 3.28. Характеристики снимков GOES

Канал	Спектральный диапазон, мкм	Пространственное разрешение, км	Области применения
1	0,52—0,72 (видимый)	1	Наблюдение за облачностью и туманами, регистрация загрязнения атмосферы, наблюдение за сильными штормами
2	3,78—4,03 (коротковолновый ИК)	4	Распознавание тумана в ночное время суток; дождевых и снежных облаков в дневное время; борьба с пожарами, наблюдение за вулканами; определение температуры океанической поверхности в ночное время
3	6,47—7,02 (водяные пары в верхних слоях атмосферы)	4	Оценка областей со средним уровнем влажности и адвекции; наблюдение за атмосферными движениями среднего масштаба
4	10,2—11,2 (длинноволновый ИК)	4	Определение воздушных потоков, ответственных за перемещение облачности, наблюдение за сильными штормами и ливневыми дождями
5	11,5—12,5 (ИК-диапазон, чувствительный к парам воды)	4	Определение влажности в нижних слоях атмосферы и температуры океанической поверхности; выявление мест концентрации пылевых облаков и вулканического пепла

лучать изображения как всей Земли, так и небольшой ее части. Снимки имеют 10-битное радиометрическое разрешение; их можно передавать непосредственно на наземные станции заказчиков. Спектральные диапазоны и пространственное разрешение снимков GOES, а также их области применения приведены в табл. 3.28.

Вторая съемочная система спутников GOES оснащена 19 каналами для съемки в одном диапазоне видимого спектра и 18 тепловых диапазонах с пространственным разрешением 8 км и радиометрическим разрешением 13 бит. Эти данные используют для наблюдения температуры земной поверхности и верхней части облачного покрова, а также для оценки профилей влажности и анализа распределения озона.

Радиометры AVHRR

В дополнение к геостационарным спутникам Национальное управление по исследованию океана и атмосферы (НОАА) контролирует работу еще двух метеорологических спутников, которые выведены на солнечно-синхронные субполярные орбиты высотой 830—870 км и являются частью серии *Advanced* TIROS. Каждый из этих спутников обеспечивает глобаль-

ный охват поверхности Земли, а благодаря тому, что спутники работают в паре, интервал получаемых данных для любого участка земной поверхности не превышает 6 часов. Один из спутников пересекает экватор с севера на юг ранним утром, второй — в полдень.

Основной съемочной системой на борту спутников НОАА, которую используют и для метеорологических целей, и для целей наблюдения земной поверхности, является радиометр AHVRR (*Advanced Very High Resolution Radiometer*), обеспечивающий съемку в видимом и инфракрасном диапазонах с шириной полосы съемки 3000 км. Спектральные диапазоны съемки, пространственное разрешение снимков AVHRR и основные области их применения перечислены в табл. 3.29.

Для получения и форматирования данных AVHRR используют четыре режима, которые отличаются разрешением и способом передачи данных — непосредственно на наземную станцию или с предварительной записью на борту спутника. Соответствующие форматы данных и их характеристики представлены в табл. 3.30.

Хотя система AVHRR наиболее широко используется для задач прогноза погоды и анализа метеорологических условий, ее также можно применять для мониторинга состояния объектов на земной поверхности. Конечно, снимки AVHRR обладают более низким пространственным разрешением, чем снимки с ресурсных спутников, однако их часто используют для различных региональных наблюдений, включая картографирование распределения температуры поверхности океана, а также наблюдение за состоянием растительного покрова и сельскохозяйственных посевов. Объединяя несколько наборов данных AVHRR, можно получать мозаики снимков, позволяющие создавать мелкомасштабные карты для анализа состояния растительного покрова на обширных территориях.

Табл. 3.29. Диапазоны съемки радиометра AVHRR

Зона	Спектральный диапазон, мкм	Пространственное разрешение, км	Область применения
1	0,58—0,68 (красный)	1,1	Мониторинг облачности, снежного и ледового покровов
2	0,725—1,1 (ближний ИК)	1,1	Наблюдение за состоянием растительности, водных ресурсов и сельскохозяйственных культур
3	3,55—3,93 (средний ИК)	1,1	Определение температуры поверхности океана, наблюдение за вулканами и мониторинг лесных пожаров
4	10,3—11,3 (тепловой ИК)	1,1	Определение температуры поверхности океана и влажности почв
5	11,5—12,5 (тепловой ИК)	1,1	Определение температуры поверхности океана и влажности почв

Табл. 3.30. Форматы данных AVHRR

Формат	Пространственное разрешение, км	Передача и обработка данных
APT (Automatic Picture Transmission — автоматическая передача снимков)	4	Непосредственная передача и отображение данных низкого разрешения
HRPT (High Resolution Picture Transmission — передача снимков высокого разрешения)	1,1	Прямая передача и отображение данных высокого разрешения
GAC (Global Area Coverage — территории глобального масштаба)	4	Данные низкого разрешения, предварительно записанные на борту спутника
LAC (Local Area Coverage — территории регионального масштаба)	1,1	Данные высокого разрешения для небольшой выбранной территории, предварительно записанные на борту спутника

Спутники INSAT

Многоцелевые спутники INSAT используют в трех различных областях: в теле- и радиовещании, для обеспечения связи и в интересах службы погоды. Запуски этих спутников осуществляются в рамках совместного проекта Министерства телекоммуникаций Индии, Индийской метеорологической службы, телевизионной компании «Дурдаршан» и Национального радио Индии. Оперативное управление этим проектом осуществляется Координационным комитетом INSAT [22].

Первый спутник серии INSAT-1 — INSAT-1A — был выведен на орбиту в апреле 1982 года, но уже 6 сентября 1982 прекратил свою работу из-за неисправности оборудования. Следующий спутник, INSAT-1B, был запущен 30 августа 1983 года и стал эксплуатироваться с 15 октября того же года. Этот спутник исправно выполнял возложенные на него функции на протяжении 80-х годов XX века и был выведен с орбиты в июле 1993 года.

Табл. 3.31. Серия геостационарных спутников INSAT-1 [22]

Спутник	Дата запуска	Съемочная система и спектральные диапазоны	Основные области применения
INSAT-1A	10 апреля 1982 г.	VHRR Видимый: 0,55—0,75 мкм (разрешение 2,75 км) ИК: 10,5—12,5 мкм (разрешение 11 км)	Наблюдение за циклонами, муссонами и ветрами, влияющими на движения облаков, оценка длинноволновой части излучения и уровня выпадения осадков
INSAT-1B	30 августа 1983 г.		
INSAT-1C	22 июля 1988 г.		
INSAT-1D	12 июня 1990 г.		

Запуск третьего спутника, INSAT-1C, состоялся 22 июля 1988 года, однако 22 ноября 1989 года в силу ряда технических причин контроль над спутником был утерян. Последний спутник этой серии, INSAT-1D, был выведен на орбиту 12 июня 1990 года и начал эксплуатироваться приблизительно через месяц — 17 июля. Установленная на нем съемочная система VHRR (*Very High Resolution Radiometer*) вела съемку почти 12 лет и прекратила работу только 14 мая 2002 года из-за недостатка топлива, необходимого для коррекции высоты орбиты.

Запуски спутников INSAT второго поколения (серия INSAT-2) начались 9 июля 1992 года, когда на орбиту был выведен первый спутник этой серии — INSAT-2A. Следующий спутник, INSAT-2B, был запущен 22 июля 1993 года. Все спутники INSAT снабжены системой стабилизации по трем осям. Последний спутник этой серии, INSAT-2E, был выведен на орбиту 3 апреля 1999 года и проработал до мая 1999 года (табл. 3.32). На нем была установлена новая аппаратура — ПЗС-камера, дававшая снимки в трех спектральных диапазонах с разрешением 1 км. Была усовершенствована также съемочная система VHRR: к ней добавили дополнительный канал в тепловом ИК-диапазоне, который предназначался для наблюдения за парами воды и давал снимки с разрешением 8 км. К сожалению, система VHRR на борту INSAT-3E так и не заработала из-за отказа механизма сканирования. Радиометр VHRR установлен и на индийском метеорологическом спутнике METSAT (*Kalpana*-1), эксплуатация которого началась 24 сентябре 2002 года. Помимо прочего оборудования, на борту METSAT имеется ретранслятор DRT (*Data Relay Transponder*), который служит для сбора метеорологических и гидрологических данных с автоматических станций наблюдения.

Первый спутник третьей серии, INSAT-3A, был запущен 10 апреля 2003 года. На нем установлена та же метеорологическая аппаратура, что и на спутнике INSAT-2E, т. е. трехканальный радиометр VHRR и трехканальная ПЗС-камера, а в дополнение к ним — ретранслятор DRT. Начало эксплуатации спутника — май 2003 года (табл. 3.33).

Табл. 3.32. Серия геостационарных спутников INSAT-2 [22]

Спутник	Дата запуска	Съемочная система и спектральные диапазоны	Основные области применения
INSAT-2A	9 июля 1992 г.	VHRR Каналы: 0,55—0,75 мкм 10,5—12,5 мкм	Наблюдение за циклонами, муссонами и ветрами, ответственными за направление движения облаков, оценка длинноволновой части излучения и уровня выпадения осадков. Изучение явлений среднего масштаба, борьба с наводнениями, определение границ снежного покрова
INSAT-2B	22 июля 1993 г.	VHRR Каналы: 0,55—0,75 мкм 10,5—12,5 мкм	
INSAT-2E	3 апреля 1999 г.	1. VHRR: как у предыдущих спутников + канал: 5,0—7,1 мкм 2. Каналы ПЗС-съемки: 0,63—0,79 мкм 0,77—0,86 мкм 1,55—1,70 мкм	

Табл. 3.33. Серия геостационарных спутников INSAT-3 [22]

Спутник	Дата запуска	Съемочная система и спектральные диапазоны	Основные области применения
METSAT (Kalpana-1)	Сентябрь 2002 г.	VHRR: аналогично INSAT-2E/3A	Наблюдение за циклонами, муссонами и ветрами, ответственными за направление движения облаков, оценка длинноволновой части излучения и уровня выпадения осадков
INSAT-3A (аналог INSAT-2E)	Апрель 2003 г.	1. VHRR: как у предыдущих спутников + канал: 5,0—7,1 мкм 2. Каналы ПЗС-съемки: 0,63—0,79 мкм 0,77—0,86 мкм 1,55—1,70 мкм	Наблюдение за циклонами, муссонами и ветрами, ответственными за направление движения облаков, оценка длинноволновой части излучения и уровня выпадения осадков. Изучение явлений среднего масштаба, борьба с наводнениями, определение границ снежного покрова, проведение границ между различными видами растительных покровов, исследование аэрозолей, построение температурных профилей и профилей влажности (совместно с INSAT-3D)

На момент выхода оригинала этой книги из печати (2006 г.) метеорологические данные продолжали получать со спутников METSAT (Kalpana-1) и INSAT-3A. Поступали также снимки с разрешением 1 км для трех спектральных каналов со спутников INSAT-3A и INSAT-2E. Отлажены процессы обработки снимков, формирования метеорологической продукции, архивирования данных и их передачи наземным станциям.

Снимки VHRR обычно получают с трехчасовым интервалом, с ПЗС-камеры со спутника INSAT-3A получают также через каждые три часа в дневное время суток. При необходимости изучения отдельных погодных явлений указанные интервалы можно сократить.

3.7. Другие метеорологические спутники

США вывели на субполярные орбиты серию военных спутников DMSP (*Defense Meteorological Satellite Program*), которые используются и в интересах гражданской метеослужбы. Установленная на этих спутниках сканирующая система OLS (*Operational Linescan System*) позволяет получать снимки с полосой охвата 3000 км и пространственным разрешением 2,7 км. Система OLS ведет съемку в двух очень широких диапазонах видимой и ближней инфракрасной области (от 0,4 до 1,1 мкм), а также в тепловой инфракрасной части спектра (от 10,0 до 13,4 мкм). Интересной особенностью этого сенсора является возможность вести ночную съемку в видимом диапазоне при очень низкой освещенности. С помощью этого

прибора можно получать снимки Земли, на которых выделяются огни крупных городов.

Ряд метеорологических спутников был запущен также другими странами и группами стран. Например, Япония вывела на орбиту серию спутников GMS, а Европейский космический консорциум — серию *Meteosat*. Обе серии спутников находятся на геостационарных орбитах: GMS — над Японией, *Meteosat* — над Европой. Так же, как и снимки GOES, снимки с японских и европейских спутников передаются на Землю каждые полчаса. Съемка со спутников GMS ведется в двух диапазонах: 0,5—0,75 мкм (с разрешением снимков 1,25 км) и 10,5—12,5 мкм (с разрешением 5 км), а съемка со спутников *Meteosat* — в трех диапазонах: видимом (0,4—1,1 мкм) с разрешением 2,5 км, среднем ИК (5,7—7,1 мкм) с разрешением 5 км и тепловом инфракрасном (10,5—12,5 мкм) с разрешением 5 км.

3.8. Океанологические спутники

Океаны покрывают более двух третей поверхности Земли и играют важнейшую роль в глобальной климатической системе. Морские организмы и ресурсы океана постоянно подвергаются антропогенному воздействию. Конечно, для мониторинга состояния океанов можно использовать обсуждавшиеся в предыдущих разделах метеорологические и ресурсные спутники, однако существуют и другие типы спутников, специально предназначенные для этих целей.

Первым таким спутником стал *Nimbus*-7, запущенный в 1978 году. На его борту был установлен сенсор CZCS (*Coastal Zone Colour Scanner*), специально разработанный для мониторинга океанов и океанических объектов. Основная цель запуска этого спутника заключалась в наблюдении за окраской и температурой воды для определения степени загрязнения и состава верхних океанических слоев, особенно в прибрежной зоне. Спутник *Nimbus* был выведен на солнечно-синхронную субполярную орбиту высотой 955 км и узловым временем пересечения плоскости экватора 12 часов дня на восходящей части орбиты и 0 часов на нисходящей. Период съемки составлял 6 дней (83 витка). С помощью сенсора CZCS получали снимки в шести спектральных диапазонах видимой, ближней инфракрасной и тепловой части спектра с разрешением 825 м

Табл. 3.34. Спектральные диапазоны съемки сенсора CZCS

Канал	Спектральный диапазон, мкм	Основные измеряемые параметры
1	0,43—0,45	Поглощение хлорофилла
2	0,51—0,53	Поглощение хлорофилла
3	0,54—0,56	Желтый пигмент
4	0,66—0,68	Концентрация хлорофилла
5	0,70—0,80	Характеристики поверхностной растительности
6	10,5—12,50	Температура поверхности

(в надире) с полосой охвата 1566 км. Параметры съемки в каждом диапазоне приведены в табл. 3.34.

Первые четыре диапазона съемки сенсора CZCS были очень узкими и позволяли очень точно определять вариации отражательной способности воды, связанные с концентрацией фитопланктона и взвешенных твердых частиц. Пятую зону использовали для дешифрирования водной растительности и определения границы между водой и сушей перед обработкой данных по другим каналам. Работа сенсора CZCS прекратилась в 1986 году.

Спутники Marine Observation Satellite (MOS)

Первый спутник этой серии MOS-1 был запущен Японией в феврале 1987 года, а следующий MOS-1b — в феврале 1990 года. На этих спутниках было установлено по три независимых сенсора: 4-канальный многозональный радиометр MESSR (*Multispectral Electronic Self-Scanning Radiometer*), 4-канальный радиометр VTIR (*Visible and Thermal Infrared Radiometer*) для съемки в видимой и тепловой части спектра и 2-канальный радиометр MSR (*Microwave Scanning Radiometer*) для съемки в микроволновом диапазоне. Характеристики первых двух систем представлены в табл. 3.35.

Диапазоны съемки MESSR, которые почти совпадают с диапазонами съемки сенсора MSS, установленного на спутниках *Landsat*, используют не только для наблюдения за океанами, но и для тематической съемки поверхности континентов. Высота орбиты спутников MOS составляет около 900 км, а период повторяемости съемки 17 дней.

Съемочные системы SeaWiFS

Сенсоры *SeaWiFS* (*Sea-viewing Wide-Field-of View Sensor*), установленные на борту спутников *SeaStar*, представляют собой усовершенствованный тип аппаратуры для мониторинга состояния океана. Сенсор ведет съемку в восьми узких спектральных диапазонах (табл. 3.36), предназначенных для мониторинга определенных явлений: продуктивности биомассы океана, влияния океана на климат (аккумулирование тепла и формирование аэро-

Табл. 3.35. Спектральные диапазоны съемки со спутника MOS

Сенсор	Спектральный диапазон, мкм	Пространственное разрешение, м	Ширина полосы съемки, км
MESSR	0,51—0,59	50	100
	0,61—0,69	50	100
	0,72—0,80	50	100
	0,80—1,10	50	100
VTIR	0,50—0,70	900	1500
	6,0—7,0	2700	1500
	10,5—11,5	2700	1500
	11,5—12,5	2700	1500

Табл. 3.36. Спектральные диапазоны съемки со спутника *SeaWiFS*

Канал	Спектральный диапазон
1	0,402—0,422
2	0,433—0,453
3	0,480—0,500
4	0,500—0,520
5	0,545—0,565
6	0,660—0,680
7	0,745—0,785
8	0,845—0,885

золей), а также для наблюдения за циклами углерода, серы и азота. Высота орбиты спутников составляет 705 км, а узловое время пересечения плоскости экватора — 0 часов. В каждом диапазоне возможна съемка в двух режимах: с разрешением 1,1 км (в надире) и полосой охвата 2800 км или с меньшим разрешением 4,5 км (в надире) и полосой охвата 1500 км.

Океанологические спутниковые системы наблюдения чрезвычайно важны для мониторинга состояния и загрязнения океана в глобальном и региональном масштабах. Полученные с их помощью данные помогают ученым понять влияние, которое океаны оказывают на климат планеты.

ГЛАВА 4

КОСМИЧЕСКИЕ СНИМКИ

4.1. Введение

Данные дистанционного зондирования, которые распространяются сегодня на коммерческой основе, получены с помощью различных съемочных систем и спутников. Поэтому очень важно, чтобы пользователи данных были хорошо осведомлены о форматах записи, видах коммерческой продукции и ее характеристиках. В этой главе все эти аспекты рассматриваются на примере данных, которые получают со спутников IRS и предоставляют пользователям как в цифровом формате, так и в виде обычных снимков.

4.2. Получение, передача и обработка данных

Существует три основных способа передачи данных со спутника на Землю. Первый способ — это прямая передача данных на наземную станцию, которая находится в зоне прямой видимости спутника (рис. 4.1). Если прямая передача невозможна, можно воспользоваться вторым способом: полученные данные сохраняются на спутнике, а затем передаются с некоторой задержкой по времени на Землю. Наконец, третий способ передачи данных основан на использовании системы геостационарных спутников связи TDRSS (*Tracking and Data Relay Satellite System*). В этом случае данные передаются с одного спутника на другой до тех пор, пока в зоне прямой видимости одного из них не окажется наземная станция.

После того как данные в исходном формате поступают на наземную станцию, выполняется их обработка, в результате которой устраняются систематические ошибки и геометрические искажения, а также искажения,

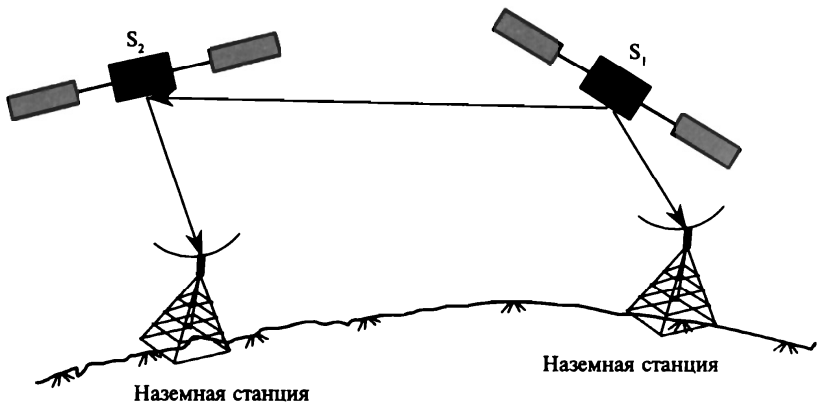

Рис. 4.1. Передача данных ДЗ на Землю