

Содержание

Предисловие к третьему изданию	15
Предисловие ко второму изданию	15
ГЛАВА 1. ОСНОВЫ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ	17
1.1. Введение	17
1.2. Дистанционное зондирование Земли.....	17
1.2.1. Интерпретация снимков.....	25
1.2.2. Спектральные диапазоны съемки.....	26
1.3. Спектральные образы объектов.....	33
1.4. Системы дистанционного зондирования.....	37
1.4.1. Пространственные и радиометрические характеристики	37
1.4.2. Спектральные характеристики	50
1.4.3. Временные характеристики	53
1.4.4. Группировки искусственных спутников Земли.....	56
1.5. Системы отображения снимков	58
1.6. Системы обработки данных.....	61
1.7. Выводы.....	65
1.8. Упражнения.....	68
ГЛАВА 2. ИЗЛУЧЕНИЕ В ОПТИЧЕСКОМ ДИАПАЗОНЕ СПЕКТРА.....	69
2.1. Введение	69
2.2. Видимый и коротковолновой инфракрасный диапазоны спектра	69
2.2.1. Солнечное излучение	69
2.2.2. Компоненты излучения	71
Отраженное солнечное излучение, распространяющееся	
без рассеяния, L_{λ}^{su}	72
Отраженное рассеянное излучение, L_{λ}^{sd}	78
Рассеянное излучение, распространяющееся без отражения, L_{λ}^{sp}	79
Суммарная плотность потока солнечного излучения, L_{λ}^s	79
2.2.3. Примеры снимков в области доминирования	
солнечного излучения.....	82
Теневая отмывка рельефа	82
Эффекты затенения	84
Атмосферная коррекция.....	85
2.3. Средний и тепловой инфракрасные диапазоны спектра.....	87
2.3.1. Тепловое излучение.....	87

2.3.2. Компоненты собственного излучения Земли	88
Излучение поверхности Земли (L_{λ}^{eu}).....	88
Атмосферное излучение, отраженное от поверхности Земли (L_{λ}^{ed})	92
Прямое излучение атмосферы (L_{λ}^{ep}).....	92
Суммарная спектральная плотность энергетической светимости, L_{λ}^e	93
2.3.3. Плотность суммарного потока регистрируемого излучения.....	93
2.3.4. Примеры снимков в тепловом ИК-диапазоне спектра	94
2.4. Выводы.....	96
2.5. Упражнения.....	98
ГЛАВА 3. МОДЕЛИ ДАТЧИКА	100
3.1. Введение	100
3.2. Общая модель датчика	100
3.3. Разрешение	100
3.3.1. Отклик прибора.....	101
3.3.2. Пространственное разрешение.....	102
3.3.3. Спектральное разрешение	108
3.4. Пространственный отклик	111
3.4.1. Функция рассеяния точки оптической системы.....	113
3.4.2. Функция рассеяния точки детектора.....	114
3.4.3. Функция рассеяния точки, связанная со смещением изображения.....	114
3.4.4. Функция рассеяния точки электронной схемы	115
3.4.5. Общая функция рассеяния точки.....	117
3.4.6. Сравнение функций рассеяния точки различных датчиков.....	117
3.4.7. Моделирование съёмочной системы.....	118
3.4.8. Измерение функции рассеяния точки.....	124
Измерение функции рассеяния линии для съёмочной системы ALI	127
Измерение функции рассеяния линии для съёмочной системы QuickBird	128
3.5. Спектральный отклик	132
3.6. Усиление сигнала	134
3.7. Дискретизация и аналого-цифровое преобразование	136
3.8. Упрощенная модель датчика	138
3.9. Геометрические искажения	140
3.9.1. Модели положения датчика.....	140
3.9.2. Модели ориентации датчика	141

3.9.3. Модели сканирующих систем.....	142
3.9.4. Модель Земли	145
3.9.5. Геометрия съемки при использовании линейных сканирующих систем и поперечных ПЗС-сканеров	150
3.9.6. Геометрия съемки при использовании продольных ПЗС-сканеров	152
3.9.7. Топографические искажения	153
3.10. Выводы.....	156
3.11. Упражнения	157
ГЛАВА 4. МОДЕЛИ ДАННЫХ.....	159
4.1. Введение	159
4.2. Замечание о форме записи.....	159
4.3. Одномерный статистический анализ изображений	161
4.3.1. Гистограмма.....	161
Нормальное распределение.....	162
4.3.2. Кумулятивная гистограмма	162
4.3.3. Статистические характеристики.....	163
4.4. Многомерный статистический анализ изображений	164
4.4.1. Сведение задачи к одномерной	171
4.5. Модели шума	171
4.5.1. Статистическая оценка качества изображения.....	176
Контрастность.....	176
Коэффициент модуляции.....	178
Отношение сигнал/шум	179
Национальная шкала дешифрируемости снимков (США).....	181
4.5.2. Сигнал, эквивалентный шуму	184
4.6. Пространственный статистический анализ данных	184
4.6.1. Способы представления пространственной ковариации.....	185
4.6.2. Ковариационная функция и семивариограмма.....	185
Мультипликативность и анизотропия	192
4.6.3. Спектральная плотность мощности	193
4.6.4. Матрица сочетаний	195
4.6.5. Фрактальная геометрия.....	197
4.7. Влияние рельефа и конструкции датчика	200
4.7.1. Рельеф местности и спектральные диаграммы рассеяния	201
4.7.2. Пространственная статистика и характеристики датчиков	204
4.7.3. Характеристики датчиков и спектральные диаграммы рассеяния.....	208
4.8. Выводы.....	212
4.9. Упражнения.....	214

ГЛАВА 5. СПЕКТРАЛЬНЫЕ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ	215
5.1. Введение	215
5.2. Пространство спектральных признаков.....	215
5.3. Многозональные индексы	216
5.3.1. Вегетационные индексы	219
5.3.2. Примеры изображений	223
5.4. Метод главных компонент	226
5.4.1. Стандартизованный метод главных компонент.....	232
5.4.2. Метод главных компонент с минимизацией шума.....	237
5.5. Преобразование «колпак с кисточкой»	237
5.6. Повышение контрастности снимков	240
5.6.1. Общие преобразования	242
Линейное растяжение	242
Нелинейное растяжение	245
Нормальное растяжение	246
Референтное растяжение	247
Разделение по пороговому значению.....	251
5.6.2. Локальные преобразования	251
5.6.3. Цветные снимки	256
Минимаксное растяжение.....	256
Нормальное растяжение	256
Референтное растяжение	257
Декорреляционное растяжение.....	257
Преобразование цветового пространства	258
Пространственное смешивание	261
5.7. Выводы.....	262
5.8. Упражнения	263
ГЛАВА 6. ПРОСТРАНСТВЕННЫЕ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ	265
6.1. Введение	265
6.2. Модель изображения при пространственной фильтрации	265
6.3. Фильтры-свертки	266
6.3.1. Линейные фильтры	267
Свертка	268
Фильтры низких и высоких частот.....	269
Фильтр усиления высоких частот.....	269
Полосовые фильтры	271
Направленные фильтры	271
Граничная область	271
Характеристики обработанных изображений.....	274

Применение алгоритма совмещения к пространственной фильтрации	274
Алгоритм расчета усредняющего фильтра	275
Последовательность линейных фильтров	277
6.3.2. Статистические фильтры	278
Морфологические фильтры	279
6.3.3. Градиентные фильтры	281
6.4. Преобразования Фурье	282
6.4.1. Фурье-анализ	282
6.4.2. Дискретное преобразование Фурье для двумерного случая	285
6.4.3. Формы представления Фурье-образа	289
6.4.4. Фильтрация с помощью преобразования Фурье	290
Функция передачи модуляции	292
6.4.5. Использование преобразования Фурье для моделирования съемочной системы	295
6.4.6. Пространственный спектр мощности сигнала	299
6.5. Многомасштабные преобразования	301
6.5.1. Пирамиды изображений	301
6.5.2. Фильтры нулевого уровня	305
Фильтры LoG (лапласиан гауссовой функции)	308
Фильтры DoG (разность гауссовых функций)	310
6.5.3. Вейвлет-преобразования	312
6.6. Выводы	317
6.7. Упражнения	318
ГЛАВА 7. КОРРЕКЦИЯ И КАЛИБРОВКА	320
7.1. Введение	320
7.2. Устранение искажений	320
7.2.1. Полиномиальная модель искажений	323
Наземные контрольные точки	325
7.2.2. Преобразование координат	334
Картографические проекции	334
7.2.3. Повторная дискретизация	335
7.3. Компенсация функции передачи модуляции датчика	343
7.3.1. Примеры компенсации функции передачи модуляции	346
7.4. Устранение шума	349
7.4.1. Глобальный шум	351
Сигма-фильтр	351
Фильтр Нагао — Мацуямы	351
7.4.2. Локальный шум	353
Использование метода главных компонент	355

7.4.3. Периодический шум	358
7.4.4. Полосовой шум	359
Глобальное линейное согласование детекторов	360
Нелинейное согласование детекторов	361
Рандомизация	361
Создание маски пространственного фильтра	362
Десегментация	366
7.5. Радиометрическая калибровка	370
7.5.1. Многозональные съемочные системы и снимки	372
Калибровка по излучению у датчика	372
Атмосферная коррекция	374
Поправка на угол восхождения Солнца и рельеф местности	376
Примеры коррекции снимков	377
7.5.2. Гиперспектральные съемочные системы и снимки	380
Калибровка по излучению у датчика	380
Атмосферная коррекция	381
Методы нормировки	384
Примеры изображений	390
7.6. Выводы	391
7.7. Упражнения	392
ГЛАВА 8. СОВМЕЩЕНИЕ И ОБЪЕДИНЕНИЕ ИЗОБРАЖЕНИЙ	394
8.1. Введение	394
8.2. Процедура совмещения изображений	394
8.3. Автоматизированное определение положения наземных контрольных точек	396
8.3.1. Корреляция площадных объектов	396
Связь с пространственными статистическими характеристиками	401
8.3.2. Использование других пространственных элементов	401
8.4. Ортотрансформирование	402
8.4.1. Цифровые модели рельефа с низким разрешением	403
8.4.2. Цифровые модели рельефа с высоким разрешением	404
Алгоритм иерархического деформирования	406
8.5. Объединение изображений	411
8.5.1. Объединение изображений в пространстве признаков	415
8.5.2. Объединение изображений в пространственной области	416
Модуляция высоких частот	417
Разработка фильтра для модуляции высоких частот	418
Повышение резкости изображения с помощью модели датчика	418

8.5.3. Многомасштабное объединение.....	421
8.5.4. Примеры объединения изображений.....	422
8.6. Выводы.....	426
8.7. Упражнения.....	427
ГЛАВА 9. ТЕМАТИЧЕСКАЯ КЛАССИФИКАЦИЯ.....	428
9.1. Введение.....	428
9.2. Процесс классификации.....	428
9.2.1. Важность масштаба и разрешения снимка.....	431
9.2.2. Понятие сходства.....	434
9.2.3. Сравнение жесткой и мягкой классификации.....	435
9.3. Выделение признаков.....	437
9.4. Обучение классификатора.....	437
9.4.1. Контролируемое обучение.....	438
Анализ разделимости.....	439
9.4.2. Неконтролируемое обучение.....	442
Алгоритм кластеризации методом К-средних.....	443
Примеры кластеризации.....	444
9.4.3. Гибридное контролируемое/неконтролируемое обучение.....	446
9.5. Непараметрическая классификация.....	449
9.5.1. Классификатор срезов слоев.....	449
9.5.2. Классификатор на основе анализа гистограммы.....	450
9.5.3. Классификатор ближайших соседей.....	451
9.5.4. Классификатор искусственной нейронной сети (ANN).....	452
Алгоритм обратного распространения.....	453
9.5.5. Примеры непараметрической классификации.....	457
9.6. Параметрическая классификация.....	460
9.6.1. Оценка параметров модели.....	462
9.6.2. Дискриминантные функции.....	463
9.6.3. Модель нормального распределения.....	463
9.6.4. Классификатор ближайшего среднего.....	466
9.6.5. Примеры параметрической классификации.....	467
9.7. Пространственно-спектральная сегментация.....	474
9.7.1. Нарращивание областей.....	474
9.8. Классификация подпикселей.....	477
9.8.1. Модель линейного смешивания.....	480
Примеры разделения смеси.....	483
Связь фракций с выходом нейронной сети.....	487
Определение конечного члена.....	488

9.8.2. Классификация нечеткого множества	489
Нечеткие С-средние (FCM) кластеризации	489
Нечеткая управляемая классификация.....	491
9.9. Анализ гиперспектрального изображения	492
9.9.1. Визуализация образа куба	493
9.9.2. Обучение классификации	493
9.9.3. Извлечение признака из гиперспектральных данных	495
Остаточные изображения	495
Параметры полосы поглощения	496
Отношения спектральных производных	496
Спектральные опознавательные признаки	497
9.9.4. Алгоритмы классификации для гиперспектральных данных	498
Двоичное кодирование	500
Спектрально-угловое картирование	502
Ортогональная проекция подпространства (ОПП).....	502
9.10. Выводы.....	504
9.11. Упражнения	505
ПРИЛОЖЕНИЕ А. АББРЕВИАТУРЫ ДАТЧИКОВ	506
ПРИЛОЖЕНИЕ В. ОДНОМЕРНЫЕ И ДВУМЕРНЫЕ ФУНКЦИИ.....	508
<i>О.Н. Гершензон, В.Е. Гершензон. Российские космические технологии</i> <i>в сфере космосъемки: реалии и перспективы</i>	<i>512</i>
<i>В.В. Лавров. Космические съемочные системы сверхвысокого разрешения</i>	<i>544</i>

Предисловие к третьему изданию

Спустя почти десять лет после выхода второго издания книги «Дистанционный контроль: модели и методы обработки изображения», ее третье издание представляется всесторонне обновленным и давно ожидаемым.

Изменения коснулись:

- информации о передатчиках, включая спутники НАСА – Terra, Aqua и EO-1, а также о коммерческих спутниках IKONOS, OrbView и QuickBird, информация сопровождается множеством иллюстраций;
- научной литературы по всем темам:
 - моделирование и измерение твердотельных датчиков изображения,
 - МПФ-коррекция,
 - атмосферная коррекция,
 - мультиспектральный синтез,
 - методы снижения шумов;
- 32 цветные вставки, 20 из которых в этом издании новые, 15 новых упражнений, больше 40 новых рисунков и 20 поправленных рисунков;
- многих мест в тексте и в схемах, которые были внесены для того, чтобы способствовать процессу обучения и понимания;
- а также многих рисунков, которые будут легче восприниматься.

При подготовке третьего издания я был потрясен (а может быть, оно того и не стоило) двумя вещами. Одна – растущее количество действующих зондов, которые производятся все большим числом стран. На практике это создавало большие трудности при занесении самой свежей информации в таблицу 1.1, и в результате она так и осталась неполной, представляя доступные только на тот момент системы дистанционного зондирования земли. А некоторые системы, такие как Национальная система спутников для контроля окружающей среды на полярных орбитах (NPOESS), не попали в таблицу, поскольку их техническое содержание было окончательно сформировано перед самым запуском на орбиту.

Другой поразительной вещью стал тот впечатляющий объем информации, который доступен сегодня в Интернете, и который охватывает широкий спектр вопросов — от подробной технической документации для датчиков до информации об устройстве самих датчиков. Кое-кто потратил немало времени сидя за компьютером и занимаясь поиском почти всего, что нужно для написания книги, вроде этой. Например, разыскивая многоспектральный образец зондирования земли, снега и облаков с помощью спектрорадиометра MODIS, я использовал для поиска подходящих изображений и скачивания последних в рис. 1.22 интерактивное изображение с сайта Геологической службы США (<http://modisdb.usgs.gov/>). Другим примером является изображение, сделанное со спутника Landsat-7 сканирующим радиометром ETM+, и размещенное на рис. 2.20; поиск в

Интернете аналогичного изображения озера Анна привел на сайт Университета Штата Мэриленд (<http://glcf.umiacs.umd.edu/>). Больше того, почти все мои «библиотечные» изыскания были проведены онлайн с помощью журнала и базы данных по бумажным носителям, а также с помощью государственных и коммерческих спутниковых сайтов. Тут возникает вопрос, а не устарели ли все эти книги!

Как и в случае со вторым изданием, я многим обязан своим коллегам за помощь в подготовке третьего издания. Среди них Кен Андо и Джон Вампола из корпорации Рейтеон, Билл Раппопорт из компании Электро-оптические системы Goodrich, которые предоставили иллюстрации и информацию о фокальной плоскости с датчиком передачи сигнала в реальном времени, а также Джордж Лимишевски из Геологической службы США за образцы изображений и консультации по вопросам совмещения многоспектральных изображений и их восстановления, Джим Стори из Центра исследования природных ресурсов (USGS EROS / SAIC) за обсуждения и технические консультации по множеству тем книги, а также Джеймс Шеферд из Исследовательского центра по охране земельных ресурсов в Manaaki Whenua, Новая Зеландия, и д-р Рудольф Рихтер из Центра дистанционного зондирования DLR / DFD, Германия, за любезное предоставление цифровых изображений для публикации в этой книге. Я также хочу поблагодарить рецензентов моей книги за предложения, которые оказались весьма полезны при формировании содержания книги и организации работы над ней, а также коллег, которые нашли время, чтобы отправить поправки ко второму изданию и которые я включил в этот том. Но в итоге именно я несу полную ответственность за фактические и любые другие ошибки третьего издания.

Я также благодарю редакторов и издательство Элзвивер, особенно Алана Роуз и Тима Донара из департамента науки, за их терпение и сотрудничество в подготовке третьего издания. Несмотря на мощное компьютерное обеспечение и доступность источников для авторов, создание книги из серии «не-выпускай-из-рук» требует совместной работы многих одаренных и надежных профессионалов.

Закончив работу над третьим изданием, мне особенно хочется отметить тех наставников, которые помогали мне на протяжении моей жизни и карьеры, прежде всего это мои родители, которые наставили меня на путь истинный, это – мой научный руководитель проф. Фил Слейтер, который направлял мои изыскания в правильном направлении и нередко прокладывал путь, вдохновляя преподавателей и студентов, и своих коллег из университета Аризоны, НАСА и Геологической службы США, и многих других организаций, которые превратили научный поиск в приятное и увлекательное путешествие. Я с грустью вспоминаю двух друзей и соавторов, проф. Стива Парка и Джима Фанестока, которые слишком рано ушли из жизни. Наконец, я высоко ценю ту поддержку, которую оказала мне моя семья при подготовке всех трех изданий. Огромное спасибо всем вместе и каждому в отдельности!

Роберт А. Шовенгердт

*Туксон, Аризона
Июнь, 2006*

Предисловие ко второму изданию

Эта книга начиналась как достаточно консервативная переработка моего ранее вышедшего учебника «Методы обработки изображения и классификация дистанционного зондирования». Однако, как и многие усилия «с ограниченной целью» эта работа вскоре превратилась в нечто гораздо большее! Когда стало ясно, что простого редактирования недостаточно, я серьезно задумался о новой возможности представить предмет обработки изображений в контексте дистанционного зондирования. После долгих колебаний, стало понятно, что существует некая общая тема, затрагивающая многие методы дистанционного зондирования при обработке изображений, она прямо или опосредовано связана с *моделями* физических процессов. В ряде случаев существует прямая зависимость, например, с физическими моделями, по которым рассчитывается орбита или пространственное отражение. В других случаях эта зависимость косвенная. Например, сходство общих данных подразумевает, что соседние пиксели в пространстве или спектральные области, скорее всего, имеют близкие значения. Корни этого сходства кроются в физических процессах, имеющих отношение к сбору данных, а также к процессу сбора как таковому. Почти во всех случаях, мотивацию и обоснование алгоритмов обработки изображений с помощью дистанционного зондирования можно проследить на примере одной или нескольких таких моделей. Таким образом, я выбрал именно такую точку зрения для написания этой книги.

С самого начала было очевидно, что книга должна быть полностью сделана «в цифре». Мощности современных издательских «desktop» систем могут легко решить эту задачу, а с учетом предмета, такая задача становится почти обязательной. В результате, в книге широко использовалась компьютерная графика и обработка изображений. Почти все рисунки совершенно новые и созданы специально для этого издания. Для визуализации многомерных данных использовались трехмерные графические программы, а при обработке изображений использовались различные компьютерные программы. Среди них, в частности, IPT – разработанное моей лабораторией программное обеспечение для обработки изображений MacSADIE, и MultiSpec – многоспектральная программа классификации из лаборатории Дэвида Ландгреба, университет Пердью.

Чтобы облегчить использование книги для занятий в классе, к каждой главе были добавлены упражнения. Они варьируются от концептуальных, «незавершенных» экспериментов до математических производных. Упражнения предназначены для более легкого усвоения материалов, представленных в конкретной главе. Обширная библиография представлена в виде таблиц для экономии места и является лаконичным источником дополнительной информации. Я даю ссыл-

ки на архивные документы, поскольку простым читателям, как правило, их легче достать.

Глава 1 содержит обзор науки дистанционного зондирования и технологии на 1996 год. В ней даются основные характеристики оптического дистанционного зондирования, а также основные типы датчиков сканирования. В главе 2 математическими методами описаны наиболее важные процессы оптического излучения при дистанционном зондировании. К ним относятся солнечное излучение, атмосферное рассеивание, поглощение и трансмиссионность, а также отраженное излучение. Подробно рассмотрена волновая природа от 400 нм до теплового ИК-диапазона. В главе 3 рассматриваются датчики радиометрического и пространственного отражения. В ней также представлена траектория космической съемки, поскольку она важна для корректировки изображения и геокодирования, и для извлечения данных из стерео-изображений.

В Главе 4 модели данных представляют собой как бы переход от моделей основных физических процессов глав 2 и 3 к методам обработки изображений в последующих главах. Здесь же описаны статистические спектральные и пространственные модели дистанционного зондирования. Серия моделей изображений иллюстрирует и объясняет влияние характеристик датчика на данные, полученные путем дистанционного зондирования.

Глава 5 начинается с рассмотрения методов обработки изображений и охватывает тему спектральных преобразований, в том числе вегетационные индексы, основные компоненты и повышение контрастности. Глава 6 включает операции свертки и преобразования Фурье, многомасштабные изображения пирамид и технику космической съемки такую как вейвлеты. Последние виды анализа изображений могут эффективно использоваться для извлечения пространственных данных. Здесь же описывается концепция декомпозиции пространственного изображения на два или более компонента, чтобы связать между собой различные пространственные трансформации. В главе 7 приведено несколько примеров обработки изображений для радиометрической и геометрической калибровки. Особое внимание уделяется важности калибровки для изображений с высоким спектральным разрешением («гиперспектральных»). Тема совмещения нескольких изображений рассматривается в главе 8 со ссылкой на пространственную концепцию декомпозиции Главы 6. Различные подходы объясняются и иллюстрируются на примере обработки многоспектральных и панхроматических изображений со спутников Landsat TM и SPOT. Большое место уделяется пирамидам изображений для извлечения цифровой модели рельефа из изображений. Глава 9 посвящена тематическим классификациям дистанционного зондирования, в том числе традиционным статистическим подходам и новым нейронным сетям и методам классификации нечетких изображений. В этой главе описываются и методы, специально разработанные для гиперспектральных изображений.

Из этой книги были намеренно исключены темы, которые обычно бывают представлены в книгах по обработке изображений дистанционного зондирования, такие, например, как анализ классификации картографических ошибок. Это было сделано не только из соображений экономии печатного слова, но также и потому, что я чувствовал, что они слишком далеко отошли от основной темы. По этим же соображениям были опущены и вопросы методов классификации, таких как правило-устанавливающие системы, которые используют более высокий уровень абстракции данных, хотя они и являются достаточно эффективными и перспективными во многих случаях. Я также рассматриваю Географические информационные системы (ГИС) выходящими за рамки данной работы.

Я считаю себя обязанным многим своим коллегам за их советы и помощь. В некоторых случаях их вклад был весьма существенным: Фил Слейтер и Курт Торн (University of Arizona) много помогли при работе над главами 2 и 3, а Дженнифер Дунган (NASA/Ames Research Center) при работе над главой 4. Многие мои коллеги предоставили обзоры по отдельным темам, среди них Чак Хатчинсон и Стюарт Марш (Office of Arid Lands Studies, University of Arizona), а также Крис Хлавка (NASA / Ames Research Center). Мне также хотелось бы выразить признательность Эрику Криту (Environmental Research Institute of Michigan) за отзыв по теме преобразования «колпак с кисточкой». Многие из моих бывших и нынешних студентов представили ценные данные и примеры, среди них Дэн Филиберти (Science Applications International Corporation), Стив Гойсман (University of Arizona), Пер Лисне (University of Arizona), Джастин Паола (Oasis Research Center) и Хо-Юан Панг (University of Arizona). Герхард Мельдау (Photogrammetrie GmbH) помог мне в обновлении версии IPT. Коллеги по геологической службе США Уильям Асеведо, Сьюзен Бенджамин, Брайан Беннетт, Рик Чемпион, Лен Гейдос и Джордж Ли, а также Джефф Мейерс из NASA/Ames Research Center, любезно предоставили изображения и цифровые данные, которые стали интересными примерами в этой книге. Я также хотел бы поблагодарить Питера В. Кинана, моего давнего друга и коллегу, который помог мне увидеть землю во всей ее красе во время велосипедной прогулки в один из прекрасных дней в районе залива Сан-Франциско!

Я благодарен редакторам и сотрудникам Academic Press за содействие при работе над рукописью и макетом, в том числе Лоре Асбери, Сандре Ли и Брюсу Вашберну из Сан-Диего, Диане Гроссман, Эбби Хайме и Цви Рудеру из Честнат Хилл.

Наконец, я должен поблагодарить мою семью, Эми, Андреа и Дженнифер, потому что их вклад оказался гораздо больше того, который внес я во время долгих часов, отданных работе над этой книгой. Надеюсь, что результат хотя бы в некоторой степени оказался достойным их поддержки.

ГЛАВА I

ОСНОВЫ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ

I.1. Введение

Современный этап развития космических методов дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) начался в 1972 году с запуска искусственного спутника Landsat с установленной на его борту аппаратурой MSS (Multispectral Scanner System), которая позволяла вести съемку в четырех спектральных диапазонах, ширина каждого из которых составляла около 100 нм. При этом каждый пиксел космического снимка соответствовал площадке размером 80 метров на поверхности Земли. Современные системы дистанционного зондирования отличаются большим разнообразием, а их технические характеристики существенно превосходят характеристики аппаратуры MSS. Сегодня на орбите работают искусственные спутники Земли (ИСЗ), которые ведут съемку в десятках различных диапазонов электромагнитного спектра с разрешением от одного километра до одного метра или даже нескольких десятков сантиметров. Используются также гиперспектральные системы ДЗЗ, устанавливаемые на воздушных летательных аппаратах. Такие системы охватывают уже сотни спектральных зон шириной около 10 нм каждая. Основные характеристики этой электронно-оптической аппаратуры и получаемых с ее помощью данных описываются в настоящей главе ниже.

I.2. Дистанционное зондирование Земли

Дистанционное зондирование можно определить как метод измерения свойств объектов на земной поверхности, в котором используются данные, полученные с помощью воздушных летательных аппаратов и искусственных спутников Земли. Из этого определения видно, что суть метода заключается в том, чтобы вместо проведения *измерений по месту расположения* объекта попытаться измерить его характеристики *на расстоянии*. Поскольку непосредственный контакт с объектом в этом случае невозможен, нам остается полагаться только на ту информацию, которая содержится в регистрируемом сигнале, например в оптическом, акустическом или микроволновом. В этой книге мы ограничимся обсуждением тех ме-

тодов ДЗЗ, в которых используются оптические сигналы. Хотя данные дистанционного зондирования могут соответствовать и отдельным точкам на поверхности Земли, и некоторым линейным профилям, больше всего нас будут интересовать измерения на двумерной пространственной сетке, представленные в виде *снимков*. Аппаратура ДЗЗ, особенно та, которая устанавливается на ИСЗ, позволяет проводить периодическую съемку земной поверхности и таким образом наблюдать за изменениями окружающей среды и влияния на нее человека. Перечислим некоторые области применения методов ДЗЗ:

- мониторинг и оценка состояния окружающей среды (анализ развития городской инфраструктуры, контроль за опасными отходами производства);
- наблюдение за глобальными изменениями (истощение озонового слоя атмосферы, обезлесение, глобальное потепление);
- сельское хозяйство (анализ состояния сельскохозяйственных культур, прогноз урожая, исследование эрозии почв);
- добыча полезных ископаемых (минералы, нефть, природный газ);
- наблюдение за возобновляемыми природными ресурсами (заболоченные территории, почвы, леса, океаны);
- метеорология (исследование динамики атмосферы, прогноз погоды);
- картография (топография, землепользование, гражданское строительство);
- военная область: разведка и рекогносцировка (стратегические задачи, тактический анализ);
- средства массовой информации (иллюстративный материал, анализ).

Для удовлетворения нужд различных категорий специалистов было разработано множество систем ДЗ, с помощью которых изучают пространственные, спектральные и временные параметры самых разнообразных объектов. Каждая из этих систем ориентирована на определенный круг задач и имеет свои особенности. Так, например, в метеорологии используется частая съемка территории с относительно низким пространственным разрешением¹. В картографии, наоборот, основным требованием является максимальное пространственное разрешение, а периодичность съемки может быть относительно низкой. В ряде задач, например в военной разведке, возникает необходимость обеспечить не только высокое пространственное разрешение и высокую повторяемость съемки, но и очень быструю передачу данных наземным службам. Правильно откалиброванные данные ДЗЗ можно использовать также для проверки глобальных климатических моделей, предназначенных для моделирования и прогноза развития природной среды. Интересно, что в этом случае высокое пространствен-

¹ Термин «разрешение» в этой книге используется в своем традиционном значении расстояния на земной поверхности, которое соответствует интервалу между соседними пикселями цифрового снимка (рис. 1.11). Подробнее этот термин обсуждается в гл. 3.

ное разрешение является нежелательным из-за вычислительных ограничений, а наиболее важными требованиями становятся точность и постоянство калибровки датчиков во времени и пространстве. Пример использования данных ДЗ для мониторинга состояния растительного покрова показан на цветной вкладке 1.1.

Как уже было сказано в начале этой главы, современный этап дистанционного зондирования Земли начался с запуска искусственного спутника Landsat с установленной на его борту сканирующей аппаратурой MSS. В 1972 году с этого спутника были получены первые обзорные снимки высокого разрешения. Аппаратура MSS позволяла вести съемку в нескольких спектральных диапазонах (интервалах электромагнитного спектра шириной² около 100 нм) с относительно высоким для своего времени разрешением (80 метров), большой площадью съемки (185 на 185 км) и периодом повторения 18 дней. Значительным достижением было также то, что снимки со спутника передавались на Землю сразу в цифровом формате. Основные методы обработки многоспектральных снимков были разработаны в начале 70-х годов XX века такими организациями, как Национальная ассоциация по авионавтике и исследованию космического пространства (НАСА), Лаборатория реактивных двигателей (Jet Propulsion Laboratory, JPL), Геологическая служба США (USGS), Научно-исследовательский институт исследования окружающей среды штата Мичиган (ERIM) и Лаборатория прикладных методов дистанционного зондирования Университета Пурдю (Laboratory for Applications of Remote Sensing, LARS). Превосходное изложение истории запуска ИСЗ Landsat и развития методов обработки данных приводится в книге Дэвида Лэндгребе (Landgrebe, David, 1997).

На спутниках серии Landsat, запущенных после 1972 года, было установлено еще четыре системы MSS, а также два комплекта съемочной аппаратуры Thematic Mapper (TM) и съемочная система Enhanced Thematic Mapper Plus (ETM+). Кроме того, на орбиту были выведены пять французских спутников SPOT с аппаратурой высокого разрешения, несколько съемочных систем AVHRR и GOES, обладавших более низким разрешением, и ряд датчиков НАСА, установленных на ИСЗ Terra и Aqua в рамках программы Earth Observing System (EOS). Сегодня на орбите находится множество систем дистанционного зондирования, которые работают в рамках национальных программ Канады, Индии, Израиля, Японии, Южной Кореи и Тайваня, а также таких международных организаций, как Европейское космическое агентство (European Space Agency, ESA). Наглядное представление о технических характеристиках некоторых из этих систем можно получить из диаграммы, представленной на рис. 1.1, по осям которой отложены два

² Спектральный диапазон чувствительности можно определить несколькими разными способами (см. гл. 3). Этим диапазоном определяется спектральное разрешение датчика.

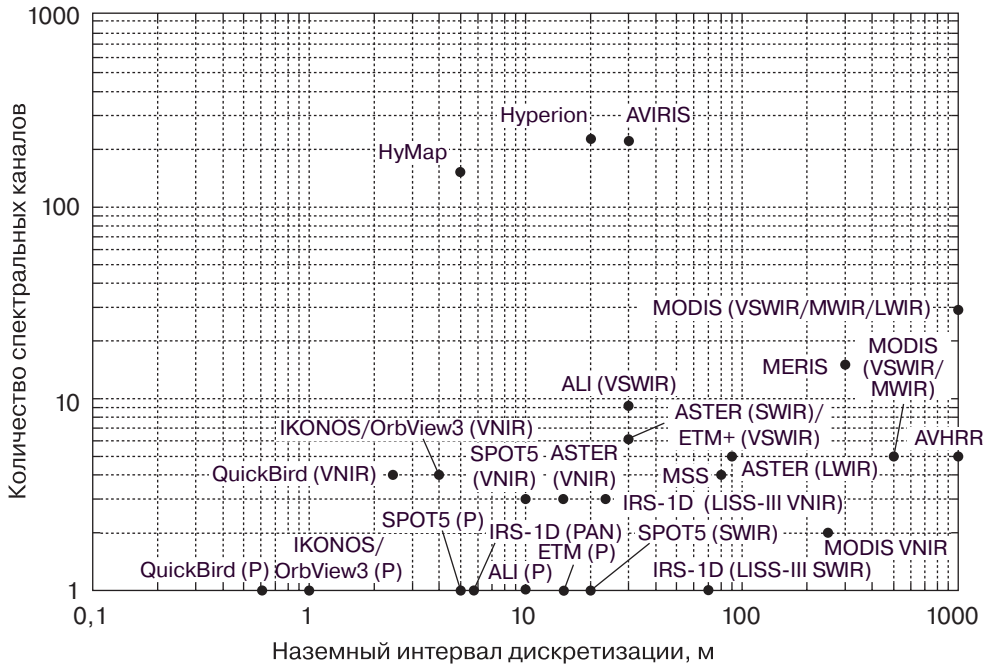


Рис. 1.1. Двумерная диаграмма, представляющая ряд систем дистанционного зондирования. Аббревиатуры названий съемочных систем расшифрованы в приложении А; спектральные диапазоны на диаграмме обозначены следующим образом: V — диапазон видимого света, NIR — ближний инфракрасный (ИК) диапазон, LWIR — тепловой (длинноволновой) ИК-диапазон, MWIR — средневолновой ИК-диапазон, SWIRK — коротковолновой ИК-диапазон, P — панхроматический канал. Более подробное описание спектральных диапазонов приведено в этой главе ниже. Все изображенные на диаграмме системы, за исключением AVIRIS и HyMap, устанавливались на искусственных спутниках Земли. Помимо указанных систем, для ДЗЗ использовалась также аппаратура на воздушных летательных аппаратах, в частности MODIS Airborne Simulator (MAS), Airborne MISR (AirMISR) и Thematic Mapper Simulator (TMS). Системы этого типа на диаграмме не изображены. Список обозначений этих и многих других съемочных систем см. в приложении А. Подробный обзор систем ДЗЗ можно найти в книге Крамера (Kramer, 2002)

основных параметра: количество спектральных каналов и *наземный интервал дискретизации*³. Пример космического снимка, полученного с помощью аппаратуры ТМ, показан на цветной вкладке 1.2. Технические характеристики различных съемочных систем обсуждались также в специальных выпусках научных журналов (см. табл. 1.1).

³ Значение термина «наземный интервал дискретизации» совпадает с принятым в данной книге значением термина «пространственное разрешение».

Таблица 1.1. Специальные выпуски научных журналов, содержащие статьи с описаниями конструкции, технических характеристик, калибровочных параметров и областей применения некоторых съемочных систем

ИСЗ и съемочная аппаратура	Библиографическая ссылка
Aqua	IEEE Transactions on Geoscience и Remote Sensing, Vol. 41, No 2, 2003
ASTER (научные данные)	Remote Sensing of Environment, Vol. 99, No 1—2, 2005
ASTER (калибровочные и технические характеристики)	IEEE Transactions on Geoscience и Remote Sensing, Vol. 43, No 12, 2005
EO-1	IEEE Transactions on Geoscience и Remote Sensing, Vol. 41, No 6, 2003
IKONOS	Remote Sensing of Environment, Vol. 88, Nos 1—2, 2003
Landsat-4	IEEE Transactions on Geoscience и Remote Sensing, Vol. GE-22, No 3, 1984
	Photogrammetric Engineering и Remote Sensing, Vol. LI, No 9, 1985
Landsat-5,-7 (обсуждение технических характеристик)	IEEE Transactions on Geoscience и Remote Sensing, Vol. 42, No 12, 2004
MERIS	International Journal of Remote Sensing, Vol. 20, No 9, 1999
MODIS (науки о Земле)	Remote Sensing of Environment. Vol. 83, Nos 1—2, 2002
MTI	IEEE Transactions on Geoscience и Remote Sensing, Vol. 43, No 9, 2005
Terra	IEEE Transactions on Geoscience и Remote Sensing, Vol. 36, No 4, 1998

Верхнюю часть диаграммы 1.1 занимают так называемые *гиперспектральные* датчики. К этой группе относятся в первую очередь спектрометры Advanced Visible/InfraRed Imaging Spectrometer (AVIRIS) и HyMap, которые устанавливаются на воздушных летательных аппаратах для съемки в спектральных каналах шириной около 10 нм (суммарный диапазон регистрации отраженного солнечного излучения: 400—2400 нм). Еще одной гиперспектральной системой является аппаратура NuRegion, которая была установлена на спутнике НАСА Earth-Observing-1 (EO-1). Это была первая гиперспектральная система, предназначенная для гражданского использования. Несколько меньше спектральных каналов используется в спектрометре MERIS (MEdium Resolution Imaging Spectrometer), выведенном на орбиту Европейским космическим агентством. Разделение сигнала по спектральным каналам в перечисленных системах осуществляется с помощью оптических элементов — призм или дифракционных решеток. Представленный на диаграмме

радиометр MODerate Imaging Spectroradiometer (MODIS) установлен на ИСЗ Terra и Aqua и позволяет получать изображения в 36 спектральных каналах в диапазоне от 0,4 до 14 мкм. Благодаря разработке перечисленных выше датчиков удалось существенно повысить количество и качество информации, которая собиралась методами ДЗЗ (табл. 1.2). Примеры снимков, полученных с помощью систем AVIRIS и Hyperion, приведены на цветных вкладках 1.3 и 1.4, а примеры снимков, полученных аппаратурой MODIS, — на рис. 1.22.

Постоянно увеличивающееся количество снимков и их возрастающее разрешение влекут за собой определенные проблемы, связанные с хранением и компьютерной обработкой данных. Чтобы представить себе характер этих проблем, достаточно, например, вспомнить, что объем данных в архиве LP DAAC Центра изучения природных ресурсов (EROS) Геологической службы США в городе Су-Фолс, шт. Южная Дакота, превысил в 2003 году 1 петабайт⁴. В последние годы открыт также бесплатный доступ к некоммерческим данным, которые распространяются через интернет-сайты университетов и других организаций. Такой порядок предоставления данных, вероятно, сохранится и в будущем.

Хотя в настоящее время в дистанционном зондировании Земли преобладают электронно-оптические съемочные системы и цифровые снимки, прежние методы не утратили своего значения. Так, важным источником данных ДЗЗ по-прежнему является аэросъемка, преимущества которой заключаются прежде всего в высоком разрешении и почти произвольном охвате съемкой. Не утратили своей роли и старые космические фотоснимки. Различные компании (например, «Совинформспутник», SPOT Image и GAF AG) предоставляют оцифрованные фотоснимки, полученных с помощью российской панхроматической камеры KVR-1000 с разрешением 2 метра и камеры ТК-350, использовавшейся для стереосъемки с разрешением 10 метров. Правительство США рассекретило архив фотоснимков, полученных с первых разведывательных спутников CORONA, ARGON и LANYARD (McDonald, 1995a; McDonald, 1995b).

Этот архив насчитывает более 800 000 снимков, значительная доля которых уже преобразована в цифровую форму. За исключением небольшого количества цветных снимков и стереопар большая часть архива — это черно-белые снимки больших областей земной поверхности, полученные с разрешением от 2 до 8 метров. Архив охватывает период с 1959 по 1972 год, и хотя представленная в нем общая площадь съемки уступает площади съемки ИСЗ Landsat, основная ценность этого архива заключается в том, что он относится к 12-летнему периоду, который чрезвычайно важен для изучения окружающей среды. Эти данные предоставляются Центру изучения природных ресурсов Геологической службой США.

⁴ Один петабайт равен 1 125 899 906 842 624 байт.

Таблица 1.2. Основные геофизические параметры, измеряемые в различных спектральных каналах съемочной системы EOS MODIS (Salomonson и др., 1995). Обратите внимание на то, что для каналов 1—19 спектральный диапазон указан в нанометрах, а для каналов 20—36 в микрометрах

Геофизические наблюдения		Канал	Спектральный диапазон	Интервал дискретизации, м
Общие	Специальные			
Граница между земной поверхностью и облаками	Хлорофилл растений	1	620—670 нм	250
	Облачность и растительность	2	841—876 нм	
Свойства земной поверхности и облаков	Различие в почвах и растительности	3	459—479 нм	500
	Зеленая растительность	4	545—565 нм	
	Свойства листового полога	5	1230—1250 нм	
	Различия снежного покрова (облачности)	6	1628—1652 нм	
	Параметры земного покрова и облачности	7	2105—2155 нм	
Цвет океана	Наблюдение за хлорофиллом	8	405—420 нм	1000
	Наблюдение за хлорофиллом	9	438—448 нм	
	Наблюдение за хлорофиллом	10	483—493 нм	
	Наблюдение за хлорофиллом	11	526—536 нм	
	Осадки	12	546—556 нм	
	Осадки, атмосфера	13	662—672 нм	
	Флюоресценция хлорофилла	14	673—683 нм	
	Свойства аэрозолей	15	743—753 нм	
	Свойства аэрозолей и параметры атмосферы	16	862—877 нм	
Атмосфера и облака	Параметры облачности и атмосферы	17	890—920 нм	
	Параметры облачности и атмосферы	18	931—941 нм	
	Параметры облачности и атмосферы	19	915—965 нм	
Тепловые свойства	Температура морской поверхности	20	3,66—3,84 мкм	
	Лесные пожары, вулканы	21	3,929—3,989 мкм	
	Температура облаков и поверхности Земли	22	3,929—3,989 мкм	
	Температура облаков и поверхности Земли	23	4,02—4,08 мкм	

Таблица 1.2. (окончание)

Геофизические наблюдения		Канал	Спектральный диапазон	Интервал дискретизации, м
Общие	Специальные			
Тепловые свойства	Температура в тропосфере, состав облаков	24	4,433—4,498 мкм	1000
	Температура в тропосфере, состав облаков	25	4,482—4,549 мкм	
Атмосфера и облака	Перистые облака	26	1,36—1,39 мкм	
	Влажность в средней части тропосферы	27	6,535—6,895 мкм	
	Влажность в верхней части тропосферы	28	7,175—7,475 мкм	
	Температура поверхности Земли	29	8,4—8,7 мкм	
Тепловые свойства	Анализ общего содержания озона	30	9,58—9,88 мкм	
	Температура облаков и поверхности Земли	31	10,78—11,28 мкм	
	Температура облаков и поверхности Земли	32	11,77—12,27 мкм	
	Высота и состав облаков	33	13,185—13,485 мкм	
	Высота и состав облаков	34	13,485—13,785 мкм	
	Высота и состав облаков	35	13,785—14,085 мкм	
	Высота и состав облаков	36	14,085—14,385 мкм	

В конце 90-х годов XX века были разработаны высокоэффективные орбитальные датчики (Fritz, 1996), которые позволили вести панхроматическую съемку с разрешением от 0,5 до 1 метра, а многоспектральную — с разрешением от 2,5 до 4 метров. Благодаря этому данные ДЗЗ стали использоваться в целом ряде новых областей — торговле недвижимостью, проектировании сетей сотовой и беспроводной персональной связи (структура которых зависит от топографии местности и расположения зданий), планировании развития городской инфраструктуры и транспортных сетей, а также для предупреждения природных и антропогенных катастроф и картографирования связанных с ними факторов. Эти системы используются также разведывательными службами и организациями, занимающимися наблюдением за окружающей средой. Первое поколение этих датчиков было установлено на ИСЗ IKONOS, QuickBird и OrbView. По-видимому, дальнейшее развитие этих систем будет связано в основном с увеличением их пространственной разрешающей способности (в соответствии с законодательством и требованиями национальной безопасности различных стран). Пример космического снимка с ИСЗ QuickBird показан на цветной вкладке 1.5.

Наибольшим пространственным разрешением обладают снимки, полученные с помощью фотокамер, установленных на воздушных летательных аппаратах. Вместе с тем разрешение, которое обеспечивается современными цифровыми камерами и ПЗС-сканерами с линейкой или матрицей датчиков, уже настолько высоко, что эти системы вполне могут конкурировать с аппаратурой для аэрофотосъемки, традиционно используемой для картографических целей. Пример снимка, полученного с помощью цифровой аэросъемки, показан на цветной вкладке 1.6.

1.2.1. Интерпретация снимков

Существует два подхода к интерпретации данных дистанционного зондирования. Первый из них (традиционный) можно назвать *пространственным*, поскольку в нем основной задачей является изучение пространственных взаимосвязей между различными объектами земной поверхности и нанесение их на карту. В прошлом для анализа аэрофотоснимков применялись методы *дешифрирования*, требовавшие обширных знаний и громадного опыта специалиста, который должен был определить местоположение различных объектов в зависимости от поставленной задачи. Например, для исследования окружающей среды на карту необходимо нанести реки, геологические структуры и виды растительности, а для военных нужд — расположение аэродромов, транспортных колонн и ракетных шахт. В основном работа заключалась в изучении снимков, иногда с помощью увеличительных приборов или устройств анализа стереопар, определении координат и атрибутов объектов и нанесении их на географическую карту. Для определения высот объектов и изогипс использовались стереопары и различные устройства их анализа (например, *стереоплоттеры*). Примеры дешифрирования фотоснимков можно найти в многочисленных учебниках по дистанционному зондированию (Colwell, 1983; Lillesand и др., 2004; Sabins, 1997; Avery и Berlin, 1992; Campbell, 2002).

Поскольку сегодня большинство материалов ДЗЗ представлено в цифровой форме, стандартным методом извлечения полезной информации стал компьютерный анализ и обработка данных. В частности, с помощью компьютерных программ можно не только *улучшить визуальное восприятие* снимка, но и *классифицировать* представленные на нем объекты для создания цифровой тематической карты (Swain и Davis, 1978; Moik, 1980; Schowengerdt, 1983; Niblack, 1986; Mather, 1999; Richards и Jia, 1999; Landgrebe, 2003; Jensen, 2004). Применение методов компьютерной фотограмметрии позволило в последние годы частично автоматизировать и сами процессы создания географических и тематических карт. Вместе с тем несмотря на то, что применение компьютерных методов позволило существенно ускорить анализ снимков и повысить его точность, результатом такого анализа все равно является карта. Кроме того, ком-

пьютерные методы интерпретации в большинстве случаев не могут полностью заменить собой визуальных.

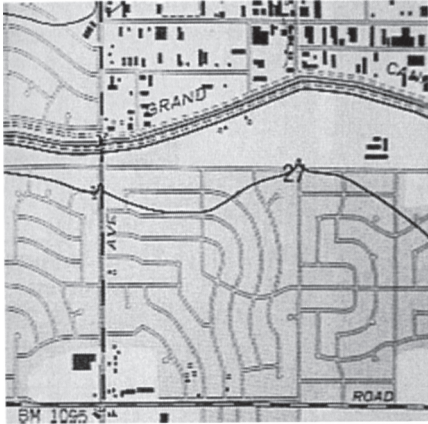
Второй подход к интерпретации снимков можно назвать *функциональным*. В этом случае исследователя интересуют не столько пространственное расположение объектов, сколько различные свойства самих данных. Например, используя данные гиперспектральной съемки и специальные алгоритмы их анализа, можно измерить спектральные параметры поглощения (Rast и др., 1991; Rubin, 1993) и оценить относительное содержание различных материалов для каждого пиксела⁵ (Goetz и др., 1985; Vane и Goetz, 1988). Существует также ряд *алгоритмов восстановления*, в которых исходные интегральные данные используются для решения обратной задачи определения параметров атмосферы и океана. В отличие от пространственного подхода, при функциональном анализе данных большое значение имеет точность абсолютной или относительной радиометрической калибровки. В то же время для полного понимания результатов такого анализа их необходимо рассматривать в контексте обычной пространственной карты.

Потребность в данных дистанционного зондирования возникает прежде всего при исследовании глобальных изменений окружающей среды и при долгосрочном мониторинге влияющих на нее природных и антропогенных факторов (Townshend и др., 1991). При этом оба подхода — пространственный и функциональный — естественным образом дополняют друг друга. Так, например, при мониторинге глобальных изменений нам важно не только получить данные об объектах в спектральной и временной области, но и понять, как эти данные распределены в пространстве. В этом отношении особенно важно выполнить пространственную и радиометрическую калибровку данных, так чтобы они были согласованы между собой во времени и не зависели от индивидуальных особенностей датчиков. В частности, анализ данных, полученных в разное время различными съемочными системами, существенно упрощается после *геопривязки* этих данных к неподвижной относительно Земли координатной сетке (геодезические координаты). В этом случае можно применить специальные алгоритмы и «обратить» исходные данные, рассчитав по ним определенные геофизические параметры.

1.2.2. Спектральные диапазоны съемки

Основные спектральные диапазоны, которые применяются в дистанционном зондировании Земли, перечислены в табл. 1.3. Эти диапазоны характеризуется тем, что в них содержатся окна прозрачности атмосферы, через которые можно «увидеть» поверхность Земли, и тем, что именно для этих диапазонов разработаны эффективные детекторы излучения. Вне окон прозрачности излучение погло-

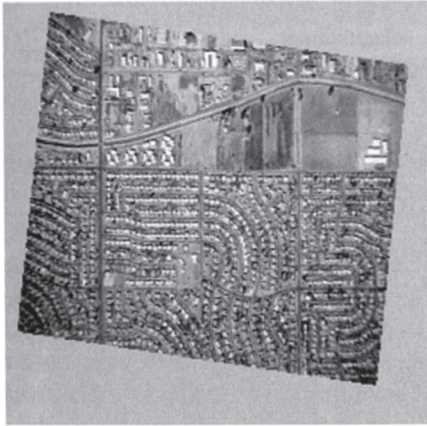
⁵ Пиксел — элемент цифрового изображения, элементарная ячейка обработки данных.



Карта



Аэроснимок



Результат наложения снимка на карту



Композитный снимок

Рис. 1.2. Пример того, как карта и снимок могут дополнять друг друга. На рисунке представлена карта одного из районов города Феникс, шт. Аризона, созданная в результате дешифрирования стереопары аэрофотоснимков, а затем преобразованная с помощью сканера в цифровой растровый формат. На карте содержится только та информация, которую посчитал нужным отобразить картограф: оросительный канал вверху карты, дороги, изогипсы (изогнутая линия в центре карты) и крупные здания коммерческого или общественного назначения. С помощью программы обработки изображений на эту карту можно наложить снимок и проанализировать отличия между двумя изображениями. Аэрофотоснимок содержит информацию о землепользовании, которая отсутствует на карте. Так, например, слева от центра снимка хорошо различима группа больших белых зданий — жилой комплекс, который либо не существовал на момент создания карты, либо по какой-то причине не был нанесен на карту. На снимке справа от жилого комплекса отчетливо видны сельскохозяйственные поля, которые не указаны на карте, так же, впрочем, как и множество частных домов, которые располагаются в нижней половине снимка

щается различными составляющими атмосферы. Так, например, пары воды и двуокись углерода поглощают излучение в диапазонах от 2,5 до 3 мкм и от 5 до 8 мкм. В микроволновом диапазоне небольшое окно поглощения парами воды лежит вблизи частоты 22 ГГц (длина волны 1,36 см)⁶. Коэффициент пропускания излучения в этом окне равен приблизительно 0,85 (Curlander и McDonough, 1991). Основное окно поглощения кислородом начинается выше 50 ГГц (длина волны менее 0,6 см) и занимает часть спектра примерно до 80 ГГц (Elachi, 1988). Замечено также, что в диапазонах с высоким коэффициентом пропускания микроволновые датчики и радары способны регистрировать излучение через облака, туман и дождь. Такие датчики, являющиеся одновременно и источниками излучения, используются также для регистрации отраженного излучения в ночное время суток.

При *пассивном* методе ДЗ измеряется отраженное солнечное излучение и собственное излучение земной поверхности, атмосферы и облаков. В видимой, ближней инфракрасной и коротковолновой инфракрасной области спектра (от 0,4 до

Таблица 1.3. Основные спектральные диапазоны, используемые в дистанционном зондировании Земли. Границы некоторых атмосферных «окон» определены не всегда четко. Именно этим определяется тот разброс значений, который можно встретить в научной литературе

Название	Диапазон длин волн	Источник излучения	Анализируемый параметр поверхности
Видимый (V)	0,4—0,7 мкм	Солнце	Отражательная способность
Ближний инфракрасный (NIR)	0,7—1,1 мкм	Солнце	Отражательная способность
Коротковолновой инфракрасный (SWIR)	1,1—1,35 мкм 1,4—1,8 мкм 2,0—2,5 мкм	Солнце	Отражательная способность
Средневолновой инфракрасный (MWIR)	3—4 мкм 4,5—5 мкм	Солнце, источники тепла	Отражательная способность, температура
Тепловой (длинноволновой) инфракрасный канал (TIR или LWIR)	8—9,5 мкм 10—14 мкм	Источники тепла	Температура
Микроволновой канал, радар	от 1 мм до 1 мт	Тепловой (пассивная система), искусственный (активная система)	Температура (пассивная система), рельеф (активная система)

⁶ Частота ν электромагнитных волн измеряется в герцах (Гц) и определяется формулой $\nu = c/\lambda$, где c — скорость света (в вакууме: $2,998 \times 10^8$ м/с), λ — длина волны (м) (Slater, 1980; Scott, 1996). На рис. 1.4 представлена номограмма в виде логарифмического графика зависимости λ от ν .

3 мкм) превалирует *отраженное солнечное* излучение. Средневолновая зона является переходной — в ней существенный вклад вносят все составляющие излучения. При длине волны больше 5 мкм обычно доминирует *собственное тепловое излучение* Земли. Поскольку оно не зависит от Солнца, съемку в этом диапазоне можно вести как в дневное, так и в ночное время суток. Собственное тепловое излучение Земли можно регистрировать и в микроволновом диапазоне. В этом случае характеристикой излучения является *яркостная температура*, которая измеряется такими пассивными системами, как Special Sensor Microwave/Imager (SSM/I) (Hollinger и др. 1987; Hollinger и др., 1990). Пример многоспектрального снимка (VSWIR и TIR) показан на рис. 1.3.

При *активном* методе дистанционного зондирования каждый датчик используется также в качестве искусственного источника излучения. В результирующем сигнале содержится информация либо о земной поверхности, либо об атмосфере. В частности, по рассеянию и поглощению в атмосфере лазерного излучения определенной длины волны можно судить о ее молекулярном составе (например, о содержании озона). В микроволновом диапазоне используется технология радаров с синтезированной апертурой (*SAR*), при которой сканирующий луч генерируется движущимся датчиком, а регистрируется излучение, отраженное от земной поверхности. Движение платформы датчика создает, по существу, большую антенну, в результате чего увеличивается пространственное разрешение снимков.

Пространственное распределение параметров можно реконструировать по амплитуде и фазе отраженного сигнала с помощью специальных программ обработки данных. Рабочие диапазоны длин волн для активных и пассивных систем ДЗЗ представлены в табл. 1.4. Связь между длинами волн и соответствующими частотами проиллюстрирована на рис. 1.4. Пример изображения, полученного с помощью SAR-системы, показан на рис. 1.5.

На рис. 1.6 показана кривая спектральной плотности энергетической освещенности внешней границы атмосферы Земли вместе с кривой чувствительности человеческого глаза в дневное время суток. Как видно из графика, то, что мы видим, относится лишь к малой части солнечного спектра, который, в свою очередь, составляет лишь небольшую долю спектра всего электромагнитного излучения. Таким образом, хотя мы и можем отобразить любую часть спектра на экране монитора, большая часть данных ДЗЗ лежит вне видимой области. Задача интерпретация данных, полученных в тепловом и микроволновом диапазоне, многими считается довольно сложной именно потому, что мы с трудом можем представить себе, как должно выглядеть то, что регистрирует датчик за пределами видимой части спектра.

Большинство оптических систем ДЗЗ являются многоспектральными, то есть такими, которые позволяют практически одновременно получать снимки в не-

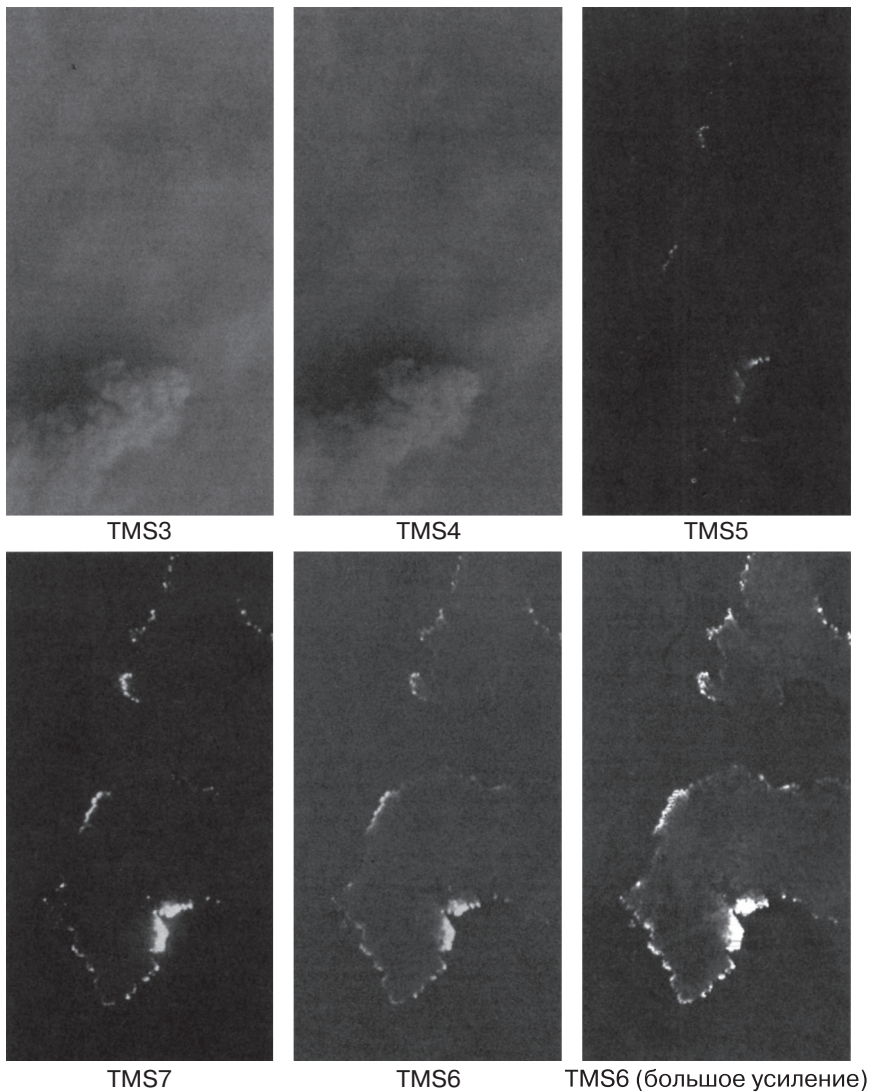


Рис. 1.3. Аэроснимок опустошительного пожара в Йеллоустонском национальном парке, шт. Вайоминг, полученный 2 сентября 1988 года с помощью съемочной аппаратуры Thematic Mapper Simulator (TMS), в которой используются те же каналы съемки, что и в системе ТМ. При съемке в видимом и ближнем инфракрасном диапазоне (каналы TMS3 и TMS4) виден только дым от пожара. Сам огонь начинает проявляться в канале TMS5 (1,55—1,75 мкм) и становится отчетливо виден в каналах TMS7 (2,08—2,35 мкм) и TMS6 (8,5—14 мкм). Высокий уровень сигнала в тепловом ИК-диапазоне (правый нижний снимок) достигается благодаря большому коэффициенту усиления. Снимки предоставлены Джефри Майерсом, лаборатория обработки данных аэросъемки, Научно-исследовательский центр Эймса, НАСА

Таблица 1.4. Рабочие длины волн и частоты микроволнового излучения, используемого при ДЗЗ. (По данным работ Sabins, 1987; Hollinger и др., 1990; Way и Smith, 1991 и Curlander и McDonough, 1991.)

Канал	Частота, ГГц	Длина волны, см	Примеры аппаратуры (частота в ГГц)
Ка	26,5—40	0,8—1,1	SSM/I (37,0)
К	18—26,5	1,1—1,7	SSJVM (19,35; 22,235)
Ku	12,5—18	1,7—2,4	Cassini (13,8)
X	8—12,5	2,4—3,8	X-SAR (9,6)
C	4—8	3,8—7,5	SIR-C (5,3), ERS-1 (5,25), RADARSAT (5,3)
S	2—4	7,5—15	Magellan (2,385)
L	1—2	15—30	Seasat (1,275), SIR-A (1,278), SIR-B (1,282), SIR-C (1,25), JERS-1 (1,275)
P	0,3—1	30—100	NASA/JPL DC-8 (0,44)

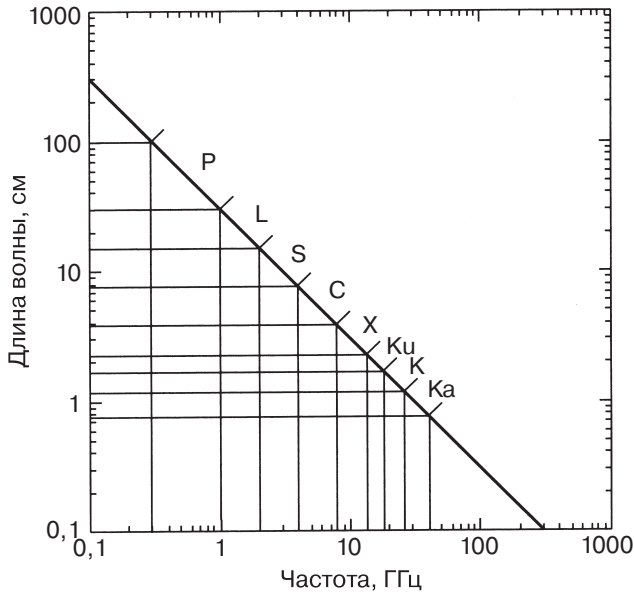
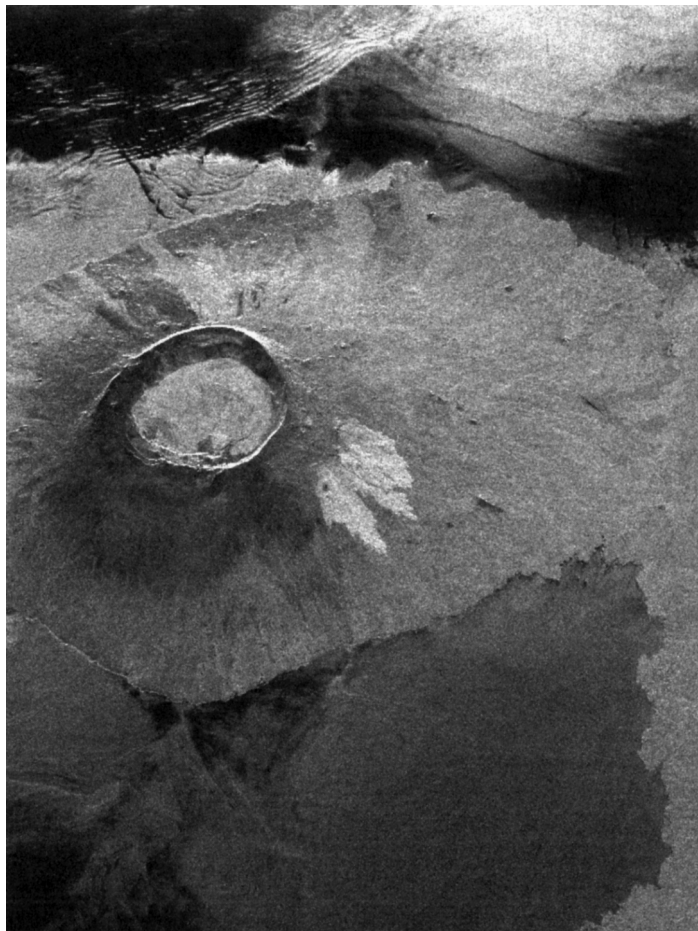


Рис. 1.4. Номограмма, позволяющая определять длину волны по заданной частоте в микроволновой части спектра. На графике указаны также основные каналы радарной съемки. Аналогичные номограммы можно построить для любой части электромагнитного спектра

скольких диапазонах спектра. В таких снимках зачастую содержится гораздо больше информации о спектральных свойствах объектов, чем в однозональных снимках, полученных в одном спектральном диапазоне, или в так называемых панхроматических снимках, соответствующих широкой полосе длин волн. С дру-



Пример снимка потока лавы пахоехое.
(Снимок из архива Геологической службы США.)

Рис. 1.5. Космический снимок острова Изабелла в западной части Галапагосских островов, полученный в L-канале радара SIR-C/X-SAR при НН-поляризации на сороковом витке космического корабля многоразового использования Endeavour 15 апреля 1994 года. Центр снимка соответствует примерно 15° южной широты и 91° западной долготы. Угол падения луча радара в точке, соответствующей центру изображения, равен приблизительно 20° . В западной группе Галапагосских островов, расположенных в южной части Тихого океана приблизительно в 1200 км к западу от Эквадора, находится шесть действующих вулканов. Со времени посещения этого района Чарлзом Дарвином в 1835 году здесь зарегистрировано более 60 извержений. На изображении вулканов Альседо и Сьерра-Негра, полученном с помощью радара SIR-C/X-SAR, менее гладкие потоки лавы видны как более яркие области, а отложения вулканического пепла и гладкие потоки лавы пахоехое — как более темные. (Снимок и его описание предоставлены НАСА/JPL.)

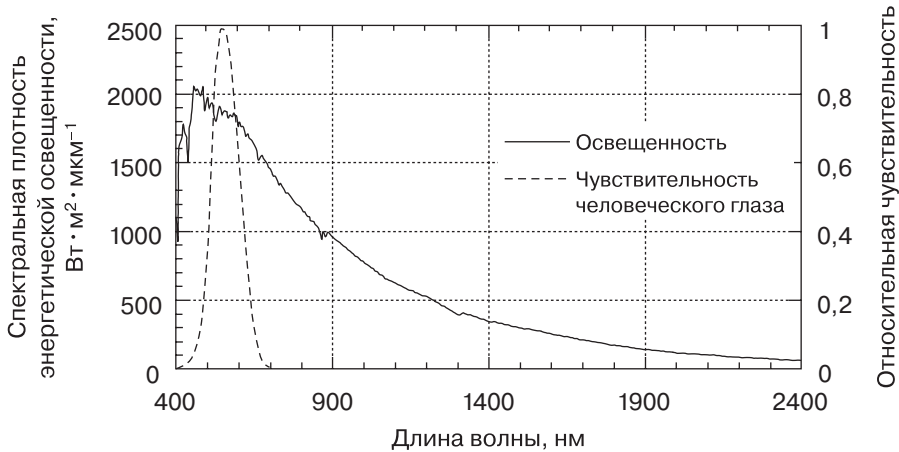


Рис. 1.6. Спектральная плотность энергетической освещенности верхней границы атмосферы и чувствительность человеческого глаза в дневное время суток

гой стороны, микроволновые системы, за исключением пассивной аппаратуры SSM/I, работают, как правило, на одной частоте. SAR-системы излучают сигнал, поляризованный в одной из двух плоскостей: горизонтальной (H) или вертикальной (V), — и регистрируют отраженный сигнал, поляризованный либо в той же плоскости (режимы HH и VV), либо в ортогональной (режимы HV и VH) (Avery и Berlin, 1992; Richards и Jia, 1999). Все чаще для повышения точности интерпретации данных используют комбинации снимков, полученных в разных спектральных диапазонах, различными съемочными системами и с разной поляризацией сигнала. В научной литературе описываются результаты комбинирования данных, полученных в видимой части спектра с тепловыми данными (Haydn и др., 1982), данными радарной съемки (Wong и Orth, 1980; Welch и Ehlers, 1988) и данными гамма-съемки (Schetselaar, 2001), а также результаты комбинирования аэрофотоснимков и гиперспектральных данных (Filiberti и др., 1994).

1.3. Спектральные образы объектов

К сожалению, из-за недостаточно высокого пространственного разрешения космических снимков целый ряд объектов практически невозможно распознать по их форме и другим пространственным деталям. Однако в некоторых случаях такие объекты удается идентифицировать по их спектральным характеристикам. Именно этим объясняется то внимание, которое уделяется определению *спектральных образов* растительного покрова, почв, горных пород и других объектов в спектральном диапазоне, показанном на рис. 1.6. В той части спектра, где доминирует отраженное солнечное излучение, спектральный образ объекта определяется графиком зависимости его отражательной способности от длины волны,

построенным с соответствующим спектральным разрешением. В тепловой части спектра образы объектов определяются их температурой и излучательной способностью, а при использовании радарной съемки — неровностями рельефа земной поверхности. То, что для разделения объектов можно использовать различия в их спектральных образах, является, вообще говоря, основной причиной использования многоспектральной съемки в дистанционном зондировании. Однако на практике эта идеальная ситуация часто нарушается в силу ряда причин, среди которых можно назвать следующие:

- естественные вариации спектральных образов объектов одного класса,
- слишком низкое спектральное разрешение многих систем дистанционного зондирования,
- влияние атмосферы на измерение спектральных характеристик.

Таким образом, нет никакой гарантии того, что измеренное различие в спектральных образах разных природных объектов окажется действительно существенным.

На рис. 1.7 показаны кривые спектральной отражательной способности различных видов трав и листового полога ряда сельскохозяйственных культур. Видно, что у всех кривых есть схожие общие черты: низкая отражательная способность в зеленой и красной зонах спектра⁷, резкое увеличение отражательной способности вблизи длины волны⁸ 710 нм и глубокие провалы около длин волн 1400 и 1900 нм, вызванные поглощением излучения водой в листе растений. Спектральный образ растительности является, пожалуй, наиболее изменчивым, поскольку он полностью зависит от смены времен года. В осенний период цвет растительности приобретает оттенок «увядания», что сопровождается увеличением отражательной способности в красной зоне спектра, вызванным потерей хлорофилла.

Кривые спектральной отражательной способности некоторых геологических пород показаны на рис. 1.8. Как видно из примера, относящегося к сухой и влажной глинистой почве, общее снижение отражательной способности в последнем случае объясняется увеличением количества воды. Отметим также характерные окна поглощения в коротковолновой инфракрасной области, аналогичные тем, которые наблюдаются для растительного покрова. Кривые отражательной способности для других минералов были получены в лабораторных условиях и отличаются высоким спектральным разрешением. На каждой из них видны отчетли-

⁷ Небольшой пик в зеленой области спектра вблизи 550 нм возникает из-за того, что хлорофилл обладает относительно низким поглощением в красной и синей области справа и слева от указанной длины волны. Привычный зеленый цвет растительности объясняется именно этим пиком.

⁸ Так называемая красная граница растительности, которая возникает из-за определенной клеточной структуры листьев.

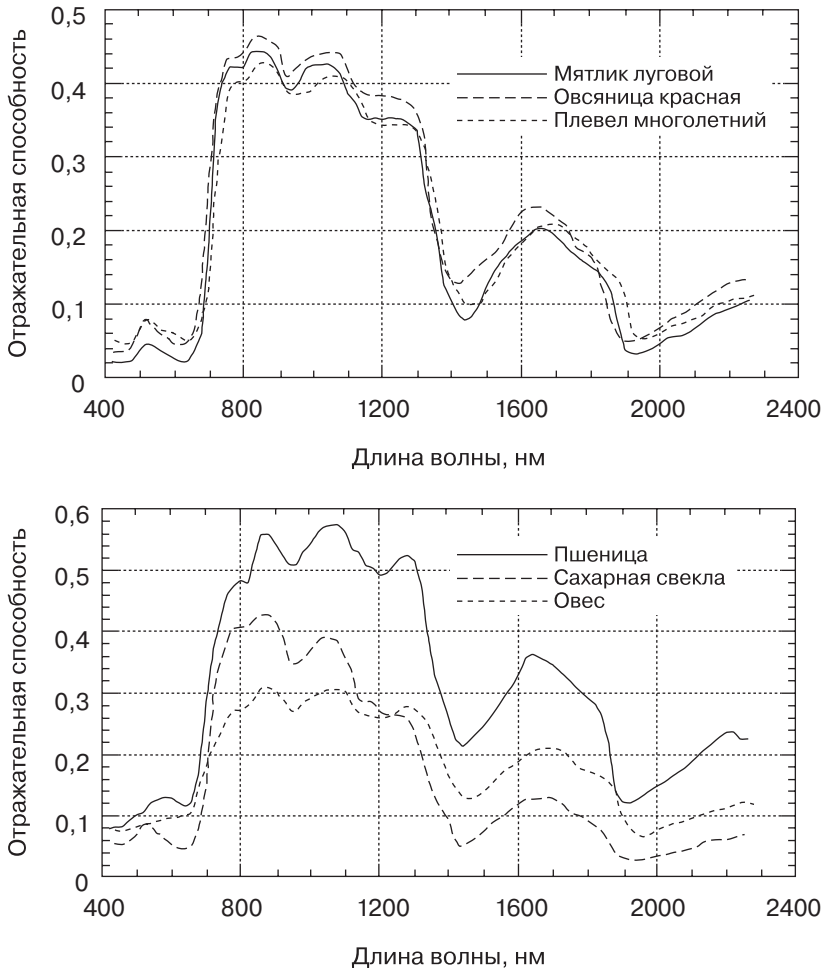


Рис. 1.7. Пример кривых спектральной отражательной способности некоторых растений (Bowker и др., 1985). Кривые, представленные на верхнем графике, иллюстрируют разброс в отражательной способности различных трав. Как видно из нижнего графика, даже в относительно хорошо контролируемых лабораторных условиях отражательная способность листьев кукурузы может варьироваться в пределах $\pm 17\%$ вблизи границы $0,67 \text{ мкм}$ (Landgrebe, 1978)

вые и иногда «дублирующие» друг друга полосы поглощения. Эти полосы были бы не видны при съемке широкополосными датчиками (например, Landsat TM или SPOT). Необходимая детальность регистрации данных может быть обеспечена только гиперспектральными датчиками типа AVIRIS, ведущими съемку в спектральных диапазонах шириной 10 нм. За последние десятилетия было опубликовано несколько эталонных «каталогов» спектральной отражательной способности различных объектов (Clark и др., 1993; Hunt, 1979; Hook, 1998), которые

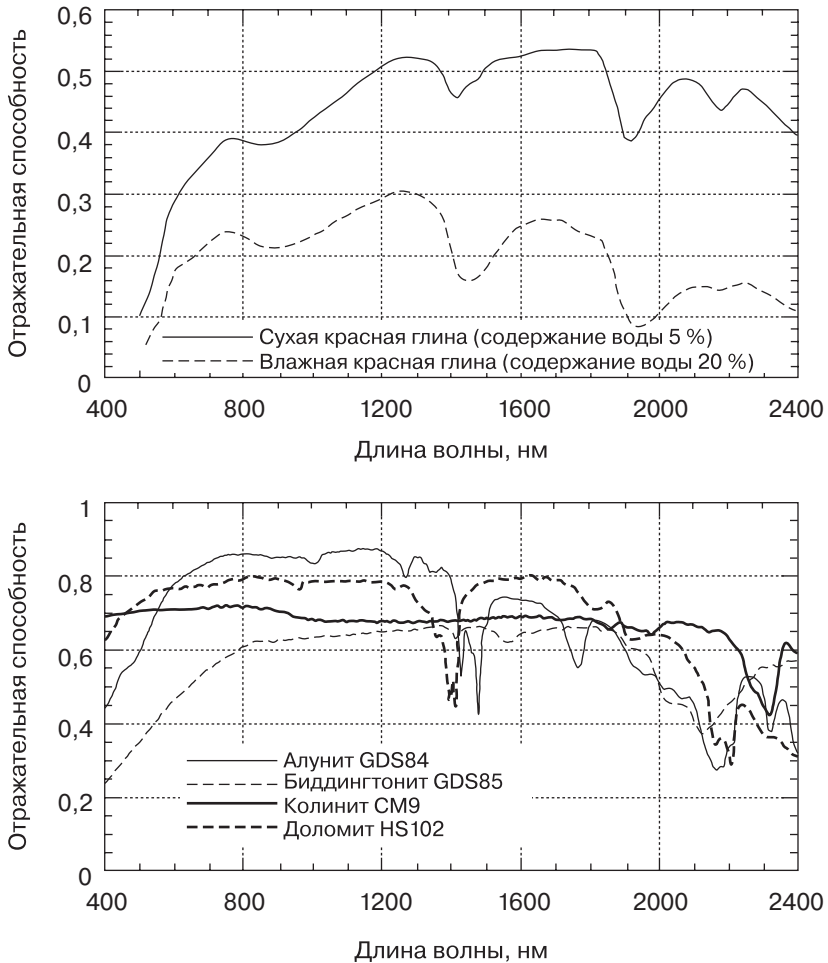


Рис. 1.8. Примеры кривых спектральной отражательной способности для глины (верхний график) и некоторых минералов (нижний график) (Bowker и др., 1985; Clark и др., 1993). Как видно из рисунка, присутствие влаги в любом материале приводит, как правило, к снижению его отражательной способности. Теоретическое объяснение этого эффекта см. в работе Туоми и соавт. (Twomey и др., 1986)

можно использовать для сравнения и классификации новых данных после внесения соответствующих калибровочных поправок (см. гл. 9).

Данные о спектральной отражательной способности являются уникальными для каждой съемки и условий измерения. Образ одного и того же минерала будет изменяться от образца к образцу. Еще больший разброс характерен для растительности, спектральный образ которой зависит от стадии роста, состояния посевов и влажности почвы. Ситуация осложняется еще и тем, что измерение отражательной способности, проведенное в полевых условиях, невозможно повторить в

лаборатории. Даже в том случае, когда эталонные данные получены в условиях полевых измерений, спектральный образ, зарегистрированный датчиком, будет содержать помехи, связанные с влиянием атмосферы, рельефа местности и калибровки (см. гл. 2 и 3) (Marsh, Lyon, 1980). Таким образом, при использовании лабораторных и полевых измерений отражательной способности в качестве эталонных данных следует всегда помнить о том, что эти данные являются лишь приближением к истинному спектральному образу физических объектов. Поэтому при сравнении данных ДЗЗ с эталонными необходимо выполнить тщательную калибровку. Вместе с тем во многих случаях анализ снимков можно упростить, используя вместо абсолютных спектральных характеристик относительные, то есть сравнивая спектральные образы разных объектов, полученные в процессе одной и той же съемки.

1.4. Системы дистанционного зондирования

Поскольку выбор конструктивных решений и материалов для изготовления каждого датчика во многом определяется его рабочим диапазоном длин волн, физические размеры оптических систем зависят от тех технических ограничений, которые характерны для той или иной области спектра. Вместе с тем работа всех пассивных сканирующих датчиков в оптическом диапазоне от видимой до тепловой инфракрасной области спектра основана на одних и тех же законах оптики, принципах формирования изображений и методах регистрации излучения. В этой книге основное внимание уделяется датчикам именно этого типа. Описание микроволновых систем ДЗЗ, как активных, так и пассивных, основанных на существенно иных принципах работы, выходит за рамки данной книги.

1.4.1. Пространственные и радиометрические характеристики

Значение каждого пиксела снимка является результатом усреднения по пространственным координатам, длине волны и времени. Интервал усреднения по времени обычно очень мал и составляет от нескольких микросекунд для сканирующих датчиков типа ТМ до нескольких миллисекунд для ПЗС-сканеров типа SPOT. На практике такой временной интервал почти не сказывается на результатах измерений, чего нельзя сказать об усреднении по пространственным координатам и по длине волны — здесь операция усреднения существенно влияет на характеристики регистрируемых данных.

Рассмотрим трехмерное пространство непрерывных параметров (x, y, λ) , образованное пространственными координатами (x, y) и значениями длины волны (λ) . Значение каждого пиксела можно представить как результат интегрирования по небольшому объему данного пространства (см. рис. 1.9). В действительности, как будет показано в гл. 3, пространство (x, y, λ) делится не совсем так, как

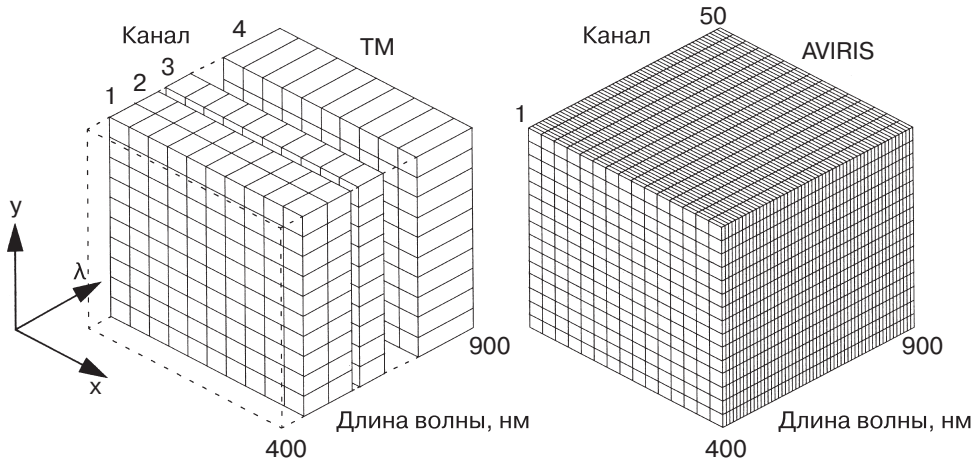


Рис. 1.9. Сравнение пространственной и спектральной дискретизации данных для съемочных систем Landsat TM и AVIRIS в видимой и ближней инфракрасной зонах спектра. Каждый параллелепипед представляет область интегрирования по спектральной и пространственным координатам. Из рисунка видно, что при регистрации данных с помощью датчика TM спектральная ось охватывается не полностью, а для усреднения используются относительно широкие спектральные интервалы. В отличие от этого, спектральное разбиение данных, регистрируемых датчиками AVIRIS, является в этом диапазоне почти непрерывным. По сравнению с датчиками TM аппаратура AVIRIS обеспечивает и более высокое пространственное разрешение (ср. 20 метров у AVIRIS при 30 метрах у TM). Показанный на рисунке способ представления данных называют пространственно-спектральным кубом (п. 9.9.1)

изображено на рис. 1.9. В частности, объемы интегрирования для соседних пикселей пересекаются как в спектральной, так и в пространственной области. Однако в данном разделе мы ради удобства будем придерживаться той упрощенной схемы, которая представлена на рис. 1.9.

Значения пикселей цифрового снимка регистрируются в результате сканирования *поперек маршрута* съемки (т. е. перпендикулярно направлению движения платформы) и движения самой платформы *вдоль маршрута* (рис. 1.10) (Slater, 1980). При этом для разделения непрерывного потока данных на отдельные пиксели используется электронная система датчика. В линейных сканерах для съемки всей сцены используется один-единственный детекторный элемент. В поперечных ПЗС-сканерах, таких как Landsat TM, используется линейка детекторов, расположенных вдоль маршрута съемки. В результате при каждом цикле движения зеркала все детекторные элементы осуществляют параллельное сканирование земной поверхности. Похожий механизм используется и в ПЗС-сканерах типа AVHRR или MODIS, в которых непрерывное сканирование поперек маршрута

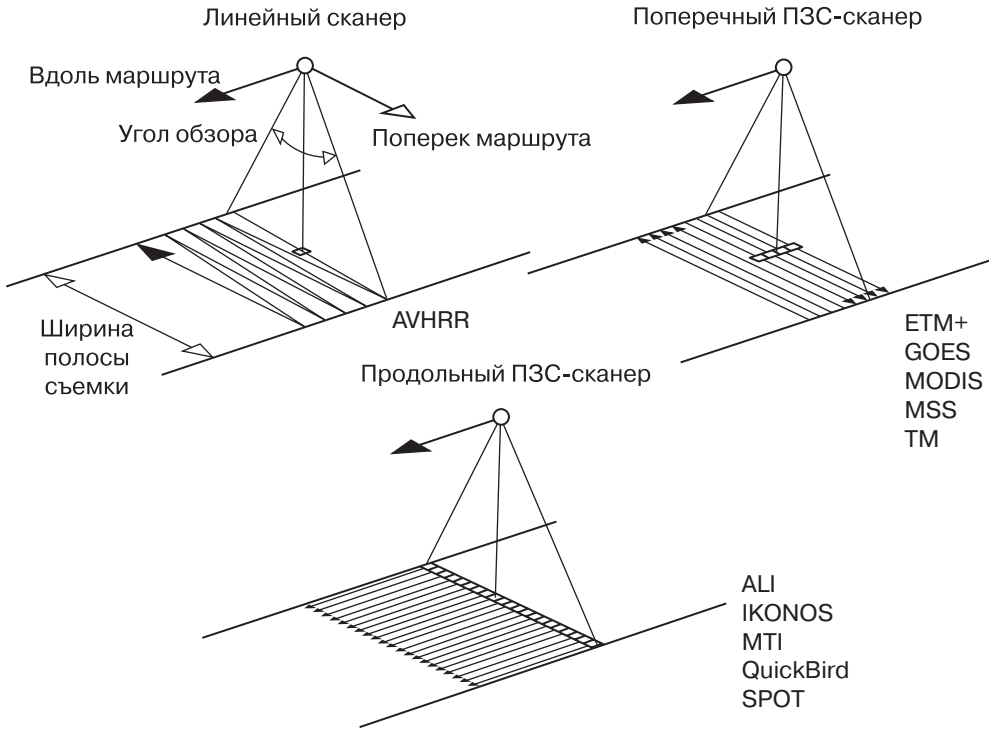


Рис. 1.10. Основные параметры сканирующих систем различного типа. Стрелками показаны направления движения относительно неподвижной Земли. Поскольку большинство спутниковых систем дистанционного зондирования имеют полярные орбиты, вращение Земли происходит в направлении, которое почти перпендикулярно маршруту съемки. Это приводит к постепенному смещению восточных и западных границ сканирования за время съемки всей сцены

осуществляется с помощью двухстороннего зеркала, вращающегося в диапазоне 360 градусов. Существенное отличие между этими двумя типами сканеров заключается в том, что в приборах AVHRR и MODIS сканирование осуществляется всегда в одном направлении, а в поперечных ПЗС-сканерах направление сканирования меняется во время цикла сканирования на прямо противоположное. Продольные ПЗС-сканеры, установленные, например, на ИСЗ SPOT, оснащены ПЗС-линейкой, состоящей из тысячи детекторных элементов, расположенных поперек маршрута. В результате параллельное сканирование всего набора данных происходит просто за счет движения платформы по орбите. Независимо от типа сканирующей системы полный угол сканирования поперек маршрута съемки называется *углом обзора*, а соответствующая величина на поверхности Земли — *шириной полосы съемки*⁹.

⁹ Другое название — *ширина полосы охвата*.

Расстояние на земной поверхности, соответствующее расстоянию между центрами соседних пикселей, называется *наземным интервалом дискретизации*¹⁰. Наземные интервалы дискретизации вдоль и поперек маршрута съемки определяются соответствующими частотами дискретизации, а также скоростью движения платформы. На практике частоту дискретизации обычно подбирают так, чтобы величина наземного интервала дискретизации была равна размеру *мгновенного поля обзора*, то есть ширине проекции одного детекторного элемента на земную поверхность (рис. 1.11 и 1.12). Таким образом, мгновенные поля обзора соседних пикселей примыкают друг к другу как в продольном, так и в поперечном направлении. Наземный интервал дискретизации вдоль маршрута съемки определяется скоростью платформы и либо частотой дискретизации (для продольных ПЗС-сканеров), либо скоростью сканирования (для линейных и поперечных ПЗС-сканеров), которые подбираются так, чтобы соответствовать мгновенному полю обзора в надире. Использование в некоторых системах более высокой частоты поперечной дискретизации приводит к наложению мгновенных полей обзора и, как следствие, к некоторому улучшению качества данных. Такой метод «избыточного сканирования» применяется, в частности, в съемочных системах Landsat MSS и AVHRR KLM.

Наземный интервал дискретизации GSI определяется высотой расположения платформы H , фокусным расстоянием f и междетекторным интервалом (или, как было отмечено выше, пространственной частотой дискретизации). Если частота дискретизации равна одному пикселу на один междетекторный интервал, наземный интервал дискретизации в *надире*, то есть непосредственно под датчиком, задается следующей простой формулой:

$$GSI = \text{междетекторный интервал} \times \frac{H}{f} = \frac{\text{междетекторный интервал}}{m}, \quad (1.1)$$

где $m = f/H$ — коэффициент *геометрического увеличения*, а величина междетекторного интервала обычно равна ширине детекторного элемента w ¹¹.

Мгновенное поле обзора $GIFOV$ зависит от величин H , f и w аналогичным образом. При этом следует отметить, что инженеры — разработчики систем дистанционного зондирования предпочитают использовать в своих расчетах другой параметр — величину мгновенного угла обзора $IFOV$, равную углу, который образует детекторный элемент с осью оптической системы (рис. 1.11):

$$IFOV = 2 \arctan \left(\frac{w}{2f} \right) \approx \frac{w}{f}. \quad (1.2)$$

¹⁰ Другое название — *наземный шаг сканирования*.

¹¹ Так как $f \ll H$, а m много меньше единицы.

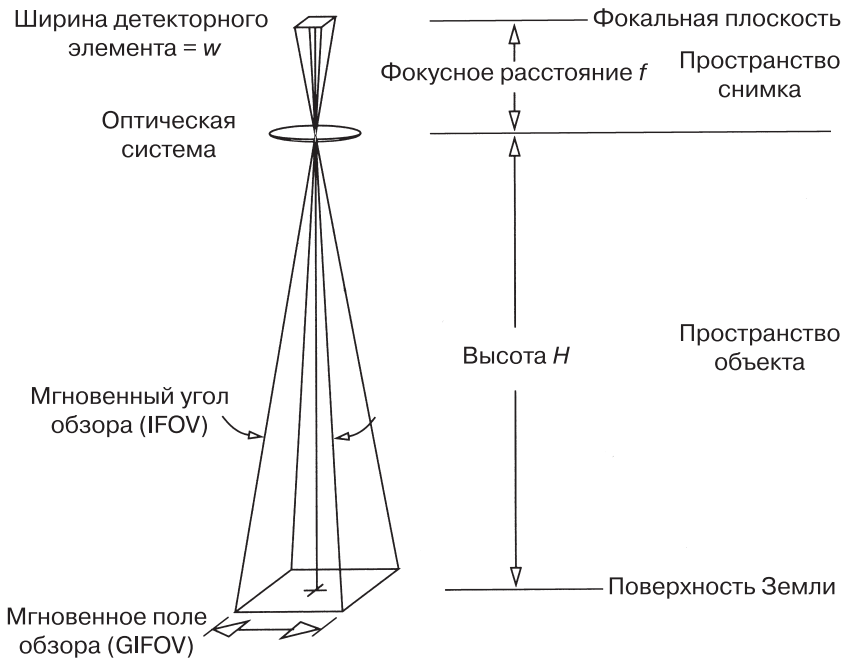


Рис. 1.11. Простейшая геометрическая схема расположения детекторного элемента в фокальной плоскости датчика. Для наглядности ширина детекторного элемента w и фокусное расстояние f на рисунке существенно увеличены. Аналогичная схема верна и для оптических систем, которые чаще всего представляют собой набор зеркал заданной кривизны и иногда характеризуются сразу несколькими довольно сложными оптическими путями распространения сигнала. Согласно представленной схеме, значения всех угловых параметров (например, IFOV) в пространстве объектов и в пространстве снимка будут совпадать, а линейные размеры объектов и их образов на снимке будут отличаться на величину коэффициента увеличения f/H . Данная схема является стационарной и соответствует съемке в надире. В реальной ситуации из-за движения сканирующей системы, платформы и самой Земли проекция мгновенного поля обзора успеет сместиться даже за короткий интервал времени интегрирования. В результате эффективная величина проекции мгновенного поля обзора оказывается несколько больше показанной на рисунке. Эта величина увеличивается также по мере отклонения направления сканирования от надира. Данный эффект будет подробно рассматриваться в гл. 3

Параметр $IFOV$ принимает одинаковые значения в пространстве снимка и в пространстве объекта и, кроме того, не зависит от рабочей высоты датчика H . Последнее свойство особенно важно при съемке с воздушных летательных аппа-

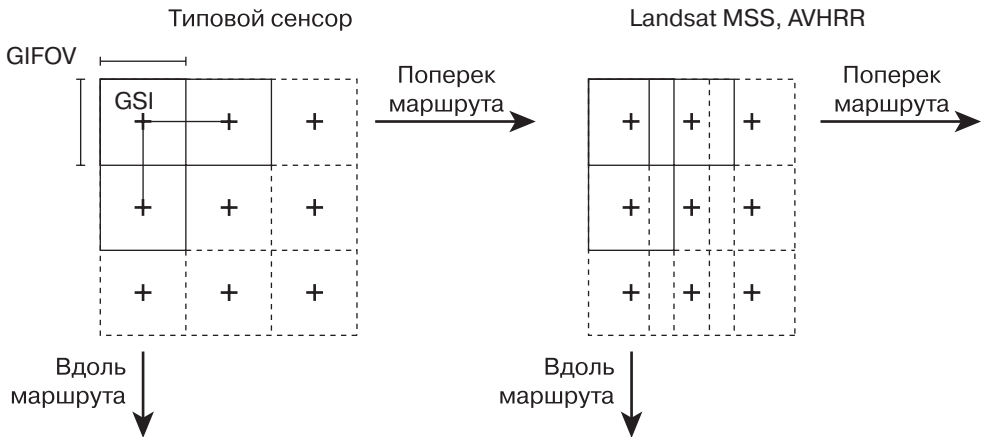


Рис. 1.12. Связь между проекцией мгновенного поля обзора и интервалом дискретизации для большинства сканирующих датчиков, а также съемочной аппаратуры MSS и AVHRR. Каждый крест на рисунке соответствует одному пикселу. Для MSS поперечный интервал дискретизации равен 57 метров, а ширина проекции мгновенного поля обзора — 80 метров. В результате частота поперечной дискретизации составляет 1,4 пиксела на ширину мгновенного поля обзора. Аналогичная величина для аппаратуры AVHRR KLM составила 1,36 пиксела. Увеличение частоты дискретизации повышает качество данных, но, вместе с тем, приводит к увеличению корреляции между значениями соседних пикселов и, следовательно, к необходимости увеличения общего объема данных в пределах полосы съемки

ратов, высота которых может постоянно меняться. Воспользовавшись предыдущей формулой, получим следующее выражение для мгновенного поля обзора *GIFOV*:

$$GIFOV = 2H \operatorname{tg}\left(\frac{IFOV}{2}\right) = w \frac{H}{f} = \frac{w}{m}. \quad (1.3)$$

Наземный интервал дискретизации и *мгновенное поле обзора* находятся делением расстояния между детекторами и, соответственно, ширины детектора на величину геометрического увеличения *m*. При анализе данных ДЗЗ потребители вполне оправданно предпочитают использовать именно мгновенное поле обзора *GIFOV*, а не мгновенный угол обзора *IFOV*. В то же время инженеры — разработчики систем ДЗ пользуются в основном угловыми параметрами *FOV* и *IFOV*, поскольку эти величины имеют одинаковые значения в пространстве снимка и в пространстве объектов (рис. 1.11).

Расположение детекторных элементов в фокальной плоскости сканирующей системы не является строго линейным или матричным. Скорость движения платформы, частота вращения зеркала, различия во временных характе-

ристиках регистрации данных в разных спектральных диапазонах и для разных пикселей, необходимость физически разделять детекторные элементы разных спектральных каналов, а также ограниченность рабочей площадки в фокальной плоскости, — все это приводит к расположению детекторов, показанному на рис. 1.13—1.16.

Изображение земной поверхности формируется в фокальной плоскости датчика в результате регистрации отраженного солнечного излучения (измерения спектральной плотности энергетической яркости¹²). Значение каждого пикселя снимка определяется путем интегрирования энергии, падающей на поверхность датчика, и определения, таким образом, спектральной плотности энергетической освещенности объектов¹³. В силу ряда причин фактическая площадь интегрирования оказывается несколько большей, чем квадрат величины GIFOV (см. гл. 3). Полученное интегральное значение преобразуется сначала в электрический сигнал, а затем в целочисленное значение пикселя¹⁴ снимка. Поскольку дискретные значения пикселей (DN) хранятся в двоичном виде, общее число значений, которые могут быть приписаны каждому пикселу, зависит от количества бит памяти Q , отводимых для записи каждого числа:

$$N_{DN} = 2^Q. \quad (1.4)$$

При этом само значение пикселя может быть любым целым числом в диапазоне

$$DN_{\text{диапазон}} = [0, 2^Q - 1]. \quad (1.5)$$

Чем больше величина Q , тем точнее дискретные данные аппроксимируют исходный непрерывный сигнал и тем выше радиометрическая разрешающая способность детектора. В датчиках SPOT и TM для каждого значения пикселя отводится 8 бит, в датчиках AVHRR — 10 бит. В большинстве гиперспектральных датчиков, включая датчики EOS MODIS, для увеличения радиометрического разрешения используется 12 бит на пиксел. Конечно, не все биты могут быть значимыми при проведении измерений — особенно это заметно при низкой амплитуде полезного сигнала и при высоком уровне шума.

Таким образом, пиксел характеризуется (по крайней мере, в первом приближении) тремя параметрами: GSI , $GIFOV$ и Q . В том случае, если возникает неоп-

¹²Спектральная плотность энергетической яркости измеряется в $\text{Вт} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{ср} \cdot \text{мкм}^{-1}$. Подробное обсуждение роли фотометрии в оптическом дистанционном зондировании см. в работах Слэйтера (Slater, 1980) и Скотта (Schott, 1996).

¹³Единицей спектральной плотности энергетической освещенности является $\text{Вт} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{мкм}^{-1}$. Связь между этой характеристикой и спектральной плотностью энергетической яркости рассматривается в гл. 2.

¹⁴В англоязычной литературе используется два эквивалентных термина: *Digital Number* и *Digital Count*.

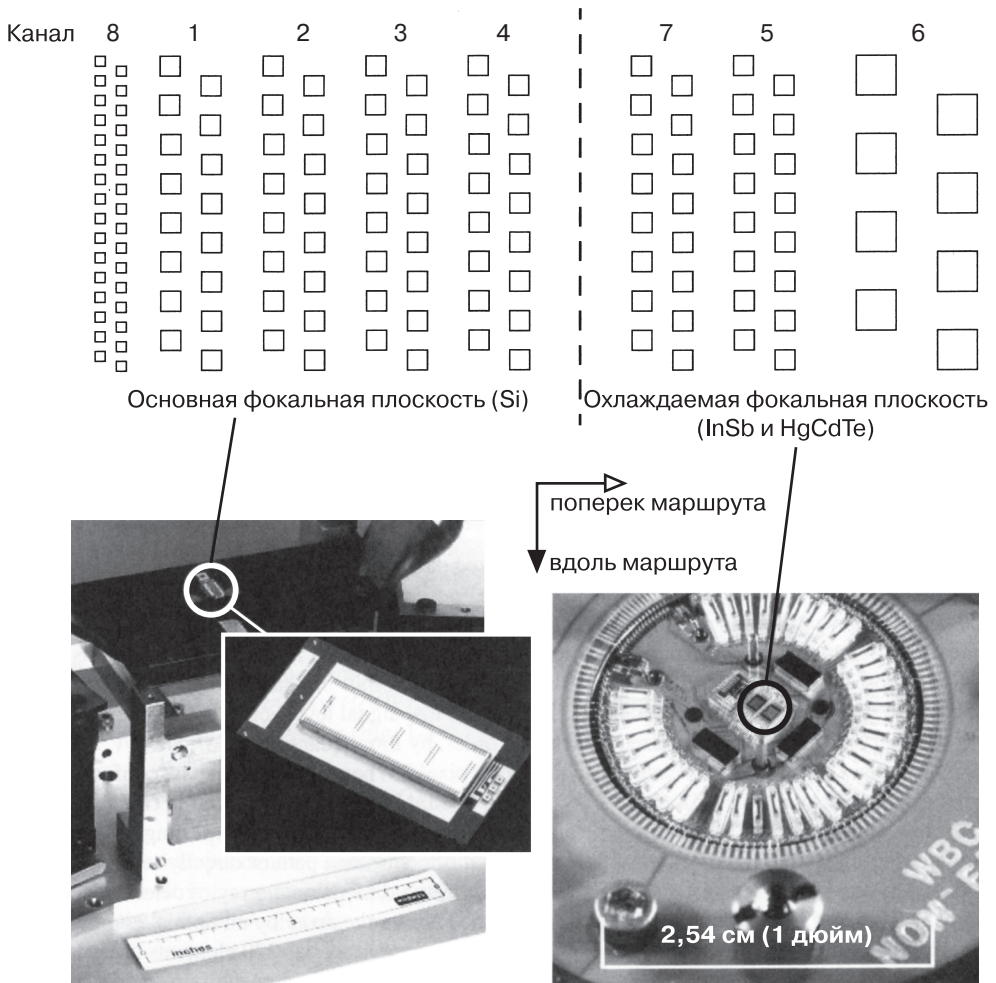


Рис. 1.13. Расположение детекторных элементов аппаратуры ETM+ в фокальной плоскости. В основной фокальной плоскости расположены кремниевые детекторы, которые используются для панхроматической съемки (GIFOV = 10 м) и съемки в видимой и ближней инфракрасной зонах спектра (GIFOV = 30 м). В охлаждаемой фокальной плоскости размещены детекторы на основе антимонида индия (InSb) для съемки в коротковолновом ИК-диапазоне (GIFOV = 30 м) и детекторы на основе теллурида ртути и кадмия (HgCdTe) для съемки в тепловом ИК-диапазоне (GIFOV = 60 м). Сканирующее зеркало детектора вращается в поперечном направлении; сбор данных ведется во всех каналах одновременно. Для коррекции временных характеристик сигнала и внесения поправок на разность фаз между пикселями используется специальная электронная схема. На фотографии матрицы детекторов хорошо видно, что ее размер составляет всего несколько миллиметров. Снимки предоставлены Кеном Дж. Эндо, компания «Рэйтеон» (Raytheon)

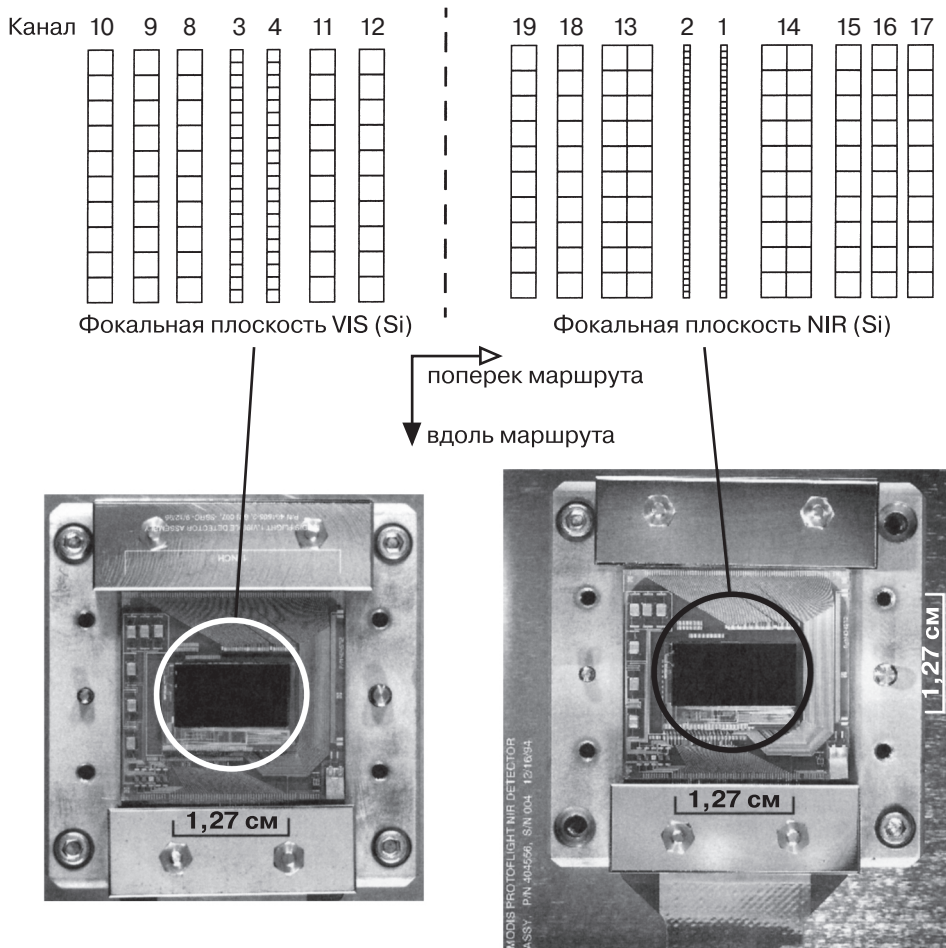


Рис. 1.14. Расположение детекторов аппаратуры MODIS в неохлаждаемых фокальных плоскостях, используемых для съемки в видимом (VIS) и ближнем инфракрасном (NIR) диапазонах спектра. Темный цвет детекторов на фотографиях объясняется антиотражающим покрытием. В фокальной плоскости NIR расположены детекторы, ведущие съемку с разрешением 250 метров в красной зоне спектра и в каналах 1 и 2 ближнего ИК-диапазона. Полученные данные используются в основном для дистанционного зондирования земной поверхности. При регистрации сигнала с помощью двойных рядов детекторов в каналах 13 и 14 применяется методика интегрирования с задержкой по времени, которая позволяет усилить сигнал и понизить уровень помех при съемке «темных» сцен (например, океанов). В данные, зарегистрированные детекторами одного ряда, вносится задержка по времени, которая позволяет совместить эти данные с данными, полученными детекторами второго ряда. Затем два набора данных суммируются, благодаря чему увеличивается фактическое время интегрирования для каждого пиксела. Снимки предоставлены Кеном Дж. Эндо и Джоном Вамполой, компания «Рэйтеон» (Raytheon)

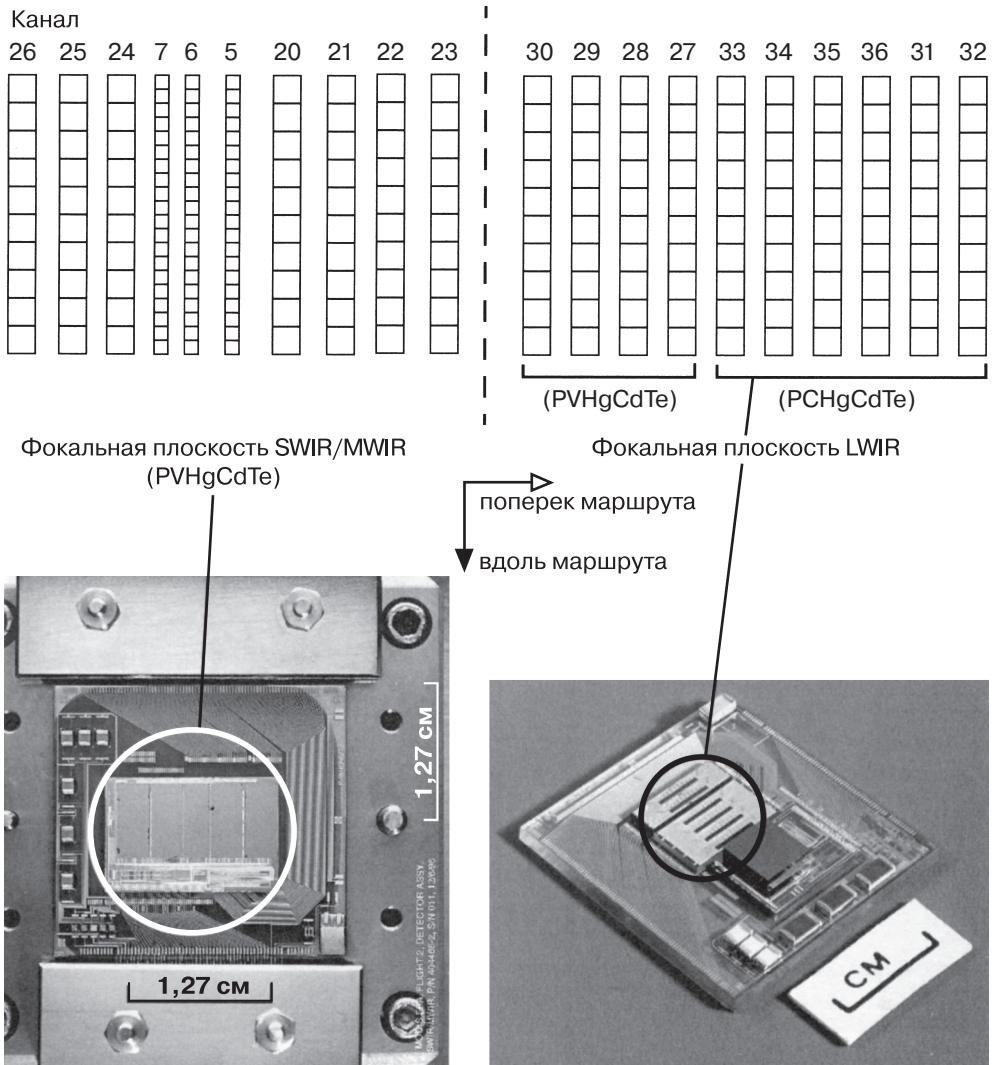


Рис. 1.15. Расположение детекторов аппаратуры MODIS в охлаждаемых фокальных плоскостях. Каналы 31–36 используются для съемки в длинноволновом ИК-диапазоне (LWIR) с помощью фоторезисторных детекторов (PC) на основе кристаллов HgCdTe. В каналах SWIR/MWIR используются фотовольтаические детекторы (PV). Снимки предоставлены Кеном Дж. Эндо, компания «Рэйтеон» (Raytheon)

ределенность и слово «пиксел» необходимо связать только с одной из величин — *GSI* или *GIFOV*, — в качестве такой величины следует выбрать наземный интервал дискретизации *GSI*.

Спектральные каналы в оптических датчиках формируются путем разделения суммарного пучка на несколько лучей, каждый из которых распространяется по

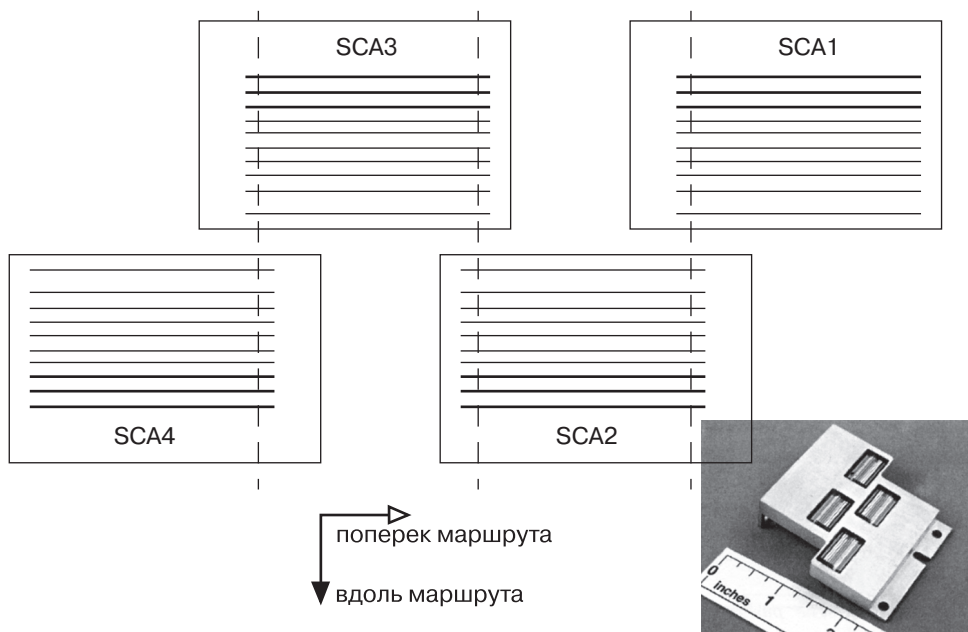


Схема размещения детекторов:

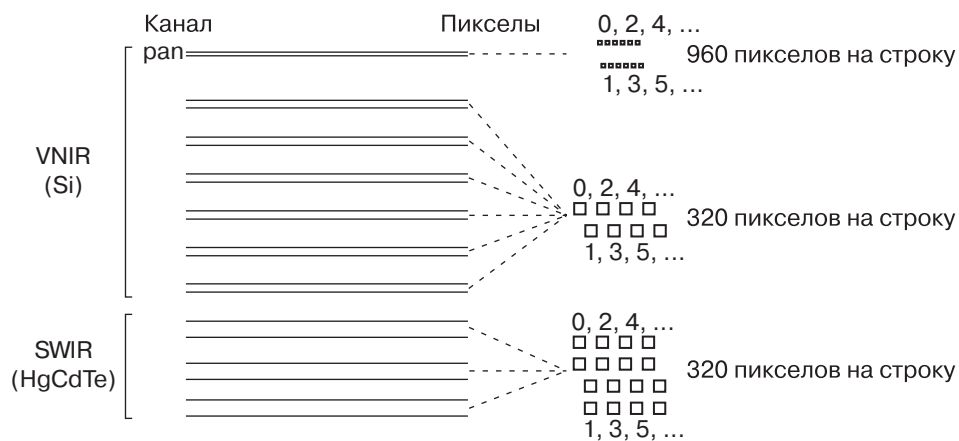


Рис. 1.16. Четыре сборки датчиков (SCA) аппаратуры ALI. В каждом канале четные и нечетные детекторы размещены в разных рядах сборки; поправки на разность фаз вносятся в процессе обработки данных. Более высокое значение отношения сигнал/шум при использовании технологии интегрирования с задержкой по времени (TDI) достигается благодаря применению двух рядов детекторов в коротковолновых ИК-каналах 5p (бука «p» означает отличие канала 5p от канала с тем же номером у аппаратуры ETM+), 5 и 7 (см. также рис. 1.14). Четыре сборки SCA содержат 3850 детекторов для панхроматической съемки и 11 520 детекторов — для многозональной. Пиксели, появившиеся в результате наложения детекторов на разных сборках, удаляются на этапе обработки данных (Storey и др., 2004)

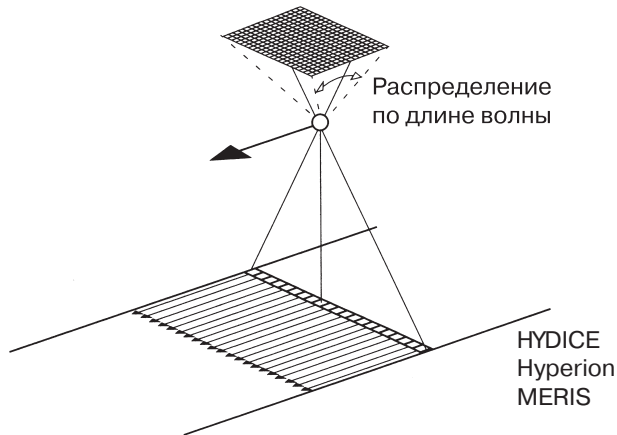


Рис. 1.17. Схема съемки с помощью продольного ПЗС-сканера, применяемая в гиперспектральных датчиках HYDICE, Hyperion и MERIS. Поперечные ряды детекторных элементов используются для одновременной регистрации данных в разных диапазонах длин волн. Разделение общего сигнала по диапазонам происходит вдоль продольного направления матрицы детекторов. Таким образом удастся регистрировать пространственные вариации сигнала в поперечном направлении сразу в большом количестве спектральных каналов. Суммарное число каналов равно количеству детекторных элементов матрицы в продольном направлении. Данные, полученные детекторами одного ряда, считываются до того, как этот ряд переместится в следующее положение съемки

своему оптическому пути с установленными на нем спектральными фильтрами. Фильтры могут быть установлены и непосредственно на самих детекторах. В некоторых гиперспектральных системах (например, HYDICE) используются двумерные матрицы детекторных элементов (рис. 1.17). Для разделения спектральных диапазонов в такой матрице применяются оптические компоненты — призмы или дифракционные решетки. Матрица детекторов аппаратуры HYDICE содержит 320 элементов поперек маршрута съемки и 210 элементов вдоль маршрута. Каждый поперечный ряд детекторов служит в качестве продольного ПЗС-сканера, а продольное направление используется для *разделения оптического пучка по длинам волн* с помощью призмы. В результате по мере движения платформы (воздушного летательного аппарата в случае HYDICE) значения пикселей регистрируются одновременно для всей полосы съемки в 210 спектральных каналах. При этом суммарное количество измерений равно 67 200.

Эти данные считываются с матрицы детекторных элементов за время, необходимое для перемещения платформы в следующее положение съемки. Соответствие между спектральными каналами и детекторными элементами спектрометров и многоспектральных датчиков показано на цветной вкладке 1.7.

Углом обзора (FOV) датчика называют угол охвата съемкой поперек маршрута летательного аппарата (рис. 1.10). Соответствующее этому углу расстояние $GFOV$ на поверхности Земли определяется как¹⁵

$$GVOF = 2H \operatorname{tg}\left(\frac{FOV}{2}\right). \quad (1.6)$$

Расстояние $GFOV$ называется *шириной полосы съемки*. Поскольку значения интервала дискретизации GSI и мгновенного поля обзора $GIFOV$ указываются для направления на надир, то есть для области непосредственно под летательным аппаратом, следует помнить о том, что значения этих параметров будут увеличиваться по мере приближения к краям полосы съемки (см. гл. 3). Угловой охват вдоль трассы летательного аппарата не имеет четкого физического определения, поскольку его величина зависит от скорости движения платформы. На практике этот параметр часто определяют исходя из ограничений, связанных со временем обработки и скоростью передачи данных, а также из соображений, состоящих в том, чтобы охват съемкой был одинаковым в направлении вдоль и поперек трассы.

При использовании съемочных систем, оснащенных множеством детекторов для каждого спектрального канала (к таким системам относятся, в частности, продольные и поперечные ПЗС-сканеры), для каждого из детекторов необходимо выполнить относительную радиометрическую калибровку. Напомним, что в аппаратуре MSS используется 24 детектора (по 6 детекторов в каждом из 4 каналов), а в съемочной системе ТМ — 100 детекторов (по 16 детекторов в каждом из 6 тепловых каналов, ведущих съемку с интервалом дискретизации 30 метров, плюс 4 детектора, ведущих съемку в 6 канале с интервалом дискретизации 120 метров). Помимо стандартного набора датчиков ТМ аппаратура ЕТМ+, установленная на ИСЗ Landsat-7, оснащена дополнительными 32 детекторами для панхроматической съемки (интервал дискретизации 15 метров) и 8 датчиками в канале 6 (интервал дискретизации 60 метров). Таким образом, суммарное количество датчиков аппаратуры ЕТМ+ равно 136. Поскольку каждый датчик является отдельным электронным прибором с собственными характеристиками чувствительности, особое внимание следует придавать точности радиометрической калибровки этих датчиков. Ошибки калибровки приводят к появлению систематических помех, которые проявляются на снимках в виде полосовых артефактов. Еще больше усилий требуется при калибровке продольных ПЗС-сканеров, у которых линейка датчиков содержит огромное количество элементов (например, на ИСЗ

¹⁵Здесь мы пренебрегли кривизной поверхности Земли. Учет кривизны привел бы к увеличению этого расстояния. Ошибка такой аппроксимации растет с увеличением угла обзора FOV и высоты платформы H . Более точное описание, учитывающее кривизну земной поверхности, см. в гл. 3.

SPOT в панхроматическом режиме съемки задействовано 6000 детекторных элементов, которые при многоспектральной съемке начинают работать как 3000 детекторов). Наконец, наиболее сложная калибровка характерна для гиперспектральных матричных приборов, аналогичных системе HYDICE, в фокальной плоскости которой установлено 67 000 отдельных детекторных элементов (рис. 1.18).

При съемке с помощью линейных сканеров и поперечных ПЗС-сканеров необходимо учитывать параметры вращения зеркала и Земли, а также вращение летательного аппарата вокруг осей тангажа, крена и скольжения. Таким образом, для корректной интерпретации данных сначала необходимо провести их предварительную обработку. Как показывает опыт работы с данными Landsat TM, в результате такой обработки можно добиться очень высокого качества снимков. Геометрия съемки с помощью продольных ПЗС-сканеров (например, SPOT или ALI) является существенно более простой, поскольку сканирование в этом случае осуществляется просто за счет движения платформы вдоль маршрута. Однако и в этом случае необходимо учитывать вращение Земли и ориентацию ИСЗ. Геометрические характеристики съемки с помощью аппаратуры ETM+ и ALI проиллюстрированы на рис. 1.19.

Полное время, необходимое для получения изображения вдоль маршрута заданной протяженности, зависит от скорости движения ИСЗ вдоль трассы. Для ИСЗ с низкими орбитами эта скорость составляет около 7 км/с. Таким образом, для съемки сцены TM требуется около 26 секунд, а для съемки сцены SPOT — 9 секунд. При использовании линейки детекторных элементов существенными параметрами становятся их количество и время интегрирования приходящего оптического сигнала для каждого пиксела. Продольные ПЗС-сканеры имеют в этом отношении преимущество, поскольку регистрация сигнала происходит одновременно для всех пикселов линейки (рис. 1.10). Для ИСЗ, выведенных на геостационарную орбиту, радиометрическое качество снимков, определяемое отношением сигнал/шум, растет с увеличением времени интегрирования. Однако для ИСЗ на других орбитах увеличение времени интегрирования приводит также к сглаживанию изображения и, как следствие, к снижению пространственного разрешения. Как видно из рис. 1.20, «плата» за более высокое отношение сигнал/шум оказывается в этом случае слишком большой.

1.4.2. Спектральные характеристики

Расположение диапазонов съемки в спектре определяется окнами поглощения атмосферы и спектральными характеристиками отражательной способности объектов исследования. Если датчик предназначен для съемки земной поверхности или океана, его спектральный диапазон должен находиться вне окон поглощения атмосферы. Если же задача состоит в исследовании самой атмосферы, то некоторые каналы съемки полезно выбрать именно в пределах указанных окон. Примером аппаратуры,

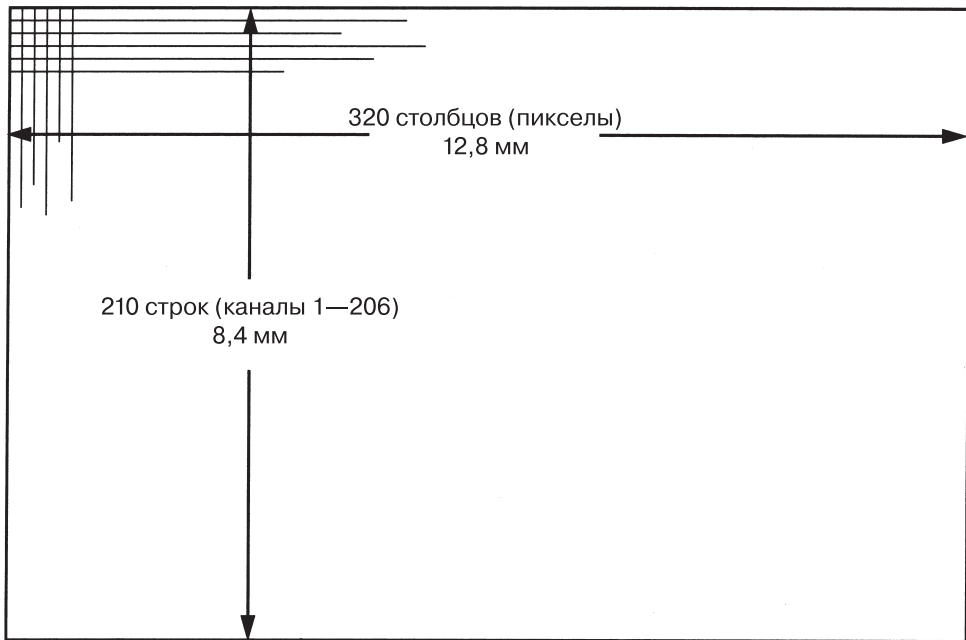
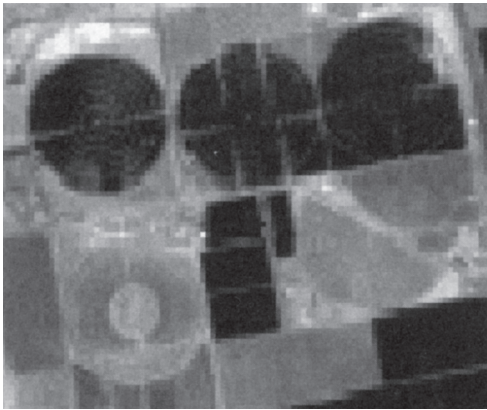
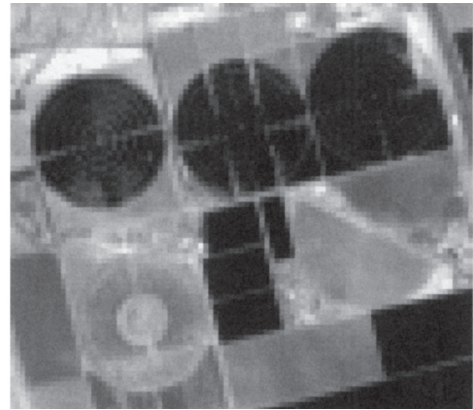


Рис. 1.18. Двумерная матрица детекторов аппаратуры HYDICE. Размер каждого детектора равен 40 мкм; суммарное число детекторов в матрице равно 67 200. Для учета энергетических различий в разных частях видимого и коротковолнового ИК-спектра (рис. 1.6) матрица разделена на три области (400—1000, 1000—1900 и 1900—2500 нм) с разным коэффициентом электронного усиления (см. гл. 3). Снимки предоставлены У. Раппопортом, компания «Гудрич электрооптикал системз» (Goodrich Electro-Optical Systems)



ETM+, уровень 1G, канал 1



ALI, уровень 1R, канал 2

Рис. 1.19. Снимки сельскохозяйственных полей с центральной системой орошения в окрестностях г. Марикопы, шт. Аризона, США, полученные 27 июля 2001 года с помощью поперечного ПЗС-сканера ETM+ и продольного ПЗС-сканера ALI. Снимок ALI уровня обработки 1R не подвергался геометрической коррекции. Тем не менее круговая форма орошаемых полей отображена на нем точнее, чем на снимке ETM+ уровня 1G, для которого была проведена геометрическая коррекция методом «ближайшего соседа» (гл. 7). Это объясняется тем принципиальным преимуществом, которым обладает продольный ПЗС-сканер ALI по сравнению с поперечным ПЗС-сканером аппаратуры ETM+. Кроме того, благодаря более высокому отношению сигнал/шум на снимке ALI можно различить гораздо больше деталей. Снимок ETM+ предоставлен Россом Брайантом и Сюзан Моран, Министерство сельского хозяйства США, Юго-западный центр исследования водных ресурсов, г. Тусон

предназначенной для всех трех областей применения, является MODIS. Многочисленные датчики этой системы ведут съемку в узких (по сравнению ETM+) спектральных каналах в диапазоне от видимой до тепловой инфракрасной зоны спектра.

Спектральные диапазоны съемки аппаратуры MODIS представлены на рис. 1.21. Данные, полученные за один цикл вращения сканирующего зеркала, совмещаются между собой так, чтобы соответствовать приблизительно одному и тому же времени съемки.

Разнообразие полезной информации в различных каналах съемки проиллюстрировано на рис. 1.22 ($GIFOV = 1$ км). На графиках представлены данные, переданные непосредственно в наземный Центр изучения природных ресурсов Геологической службы США, расположенный в г. Су-Фолс, шт. Северная Дакота. В отличие от предварительно архивируемых данных MODIS, обработка этих данных выполняется без использования какой-либо дополнительной информации. На зимнем снимке хорошо виден снежный и ледовый покров на территории Канады и в заливе Джеймса, облачность на северо-востоке США, а также ее отсутс-



ETM+, панхроматический канал



AL, панхроматический канал

Рис. 1.20. Панхроматические снимки территории Аляски, полученные 27 ноября 1999 года с помощью поперечного ПЗС-сканера ETM+ и 25 ноября 2000 года с помощью продольного ПЗС-сканера ALI (Storey, 2005). Из-за низкой освещенности местности в силу ее высокой географической широты и зимнего времени съемки динамический диапазон снимков пришлось существенно сжать для лучшего отображения объектов. Видно, что снимок, полученный аппаратурой ALI, содержит существенно меньше помех. Это объясняется гораздо более высокими значениями отношения сигнал/шум, характерными для продольных ПЗС-сканеров

твие южнее вдоль всего восточного побережья вплоть до Флориды. Канал 2 используется для съемки в ближней инфракрасной области, а канал 6 — для разделения облачности и снежно-ледовых покровов (снег и лед характеризуются в этом диапазоне более низкой отражательной способностью, чем облака). Канал 26 предназначен для изучения перьевых облаков, а канал 27 — для исследования паров воды в центральной части тропосферы. Заметим также, что поверхность Земли не видна в каналах 26 и 27, поскольку их спектральные диапазоны находятся в пределах основных окон поглощения атмосферы (рис. 1.21).

1.4.3. Временные характеристики

Одним из наиболее важных свойств спутниковых систем дистанционного зондирования, работающих на полярных орбитах, является периодичность съемки одних и тех же областей земной поверхности. Периодичность съемки особенно

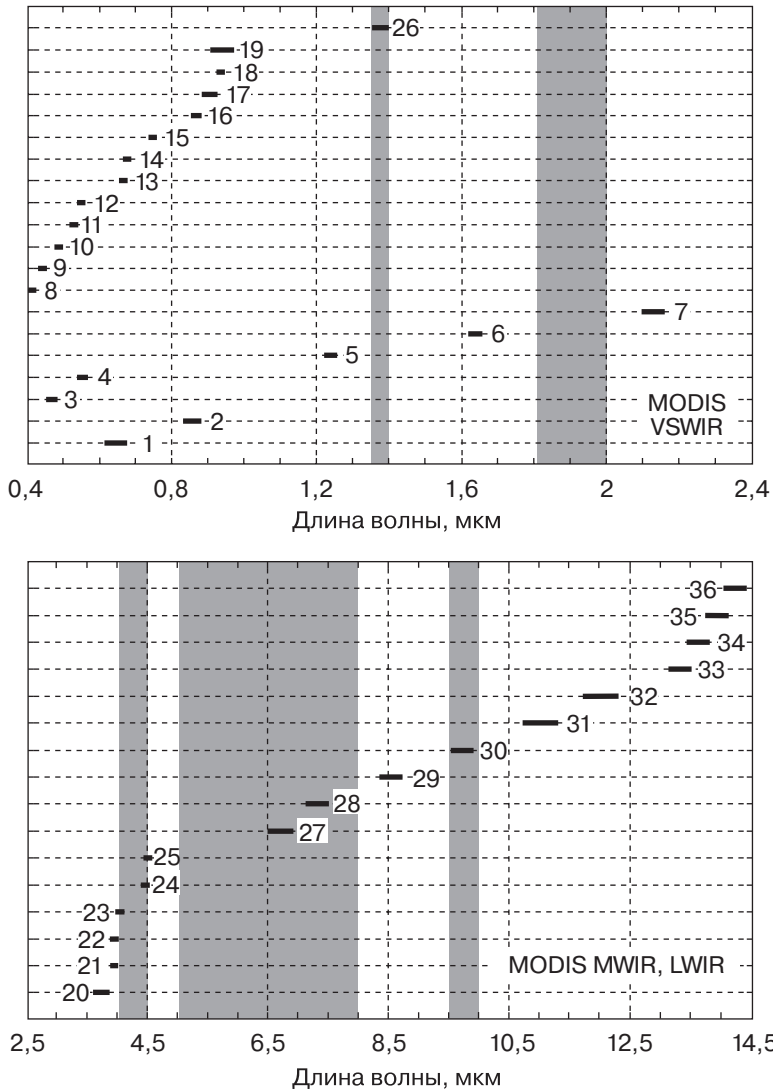


Рис. 1.21. Спектральные диапазоны 36 каналов съемки аппаратуры MODIS. Закрашенные области — это основные окна поглощения атмосферы. Каналы 1 и 2, используемые для сканирования земной поверхности с разрешением 250 метров, примыкают с разных сторон к «красной границе» растительности (см. рис. 1.7). Каналы 26, 27, 28 и 30 лежат в пределах окон поглощения атмосферы и используются для изучения ее характеристик. Положение и спектральные диапазоны остальных каналов также оптимизированы для изучения определенных свойств земной поверхности, океана и атмосферы (см. табл. 1.2)

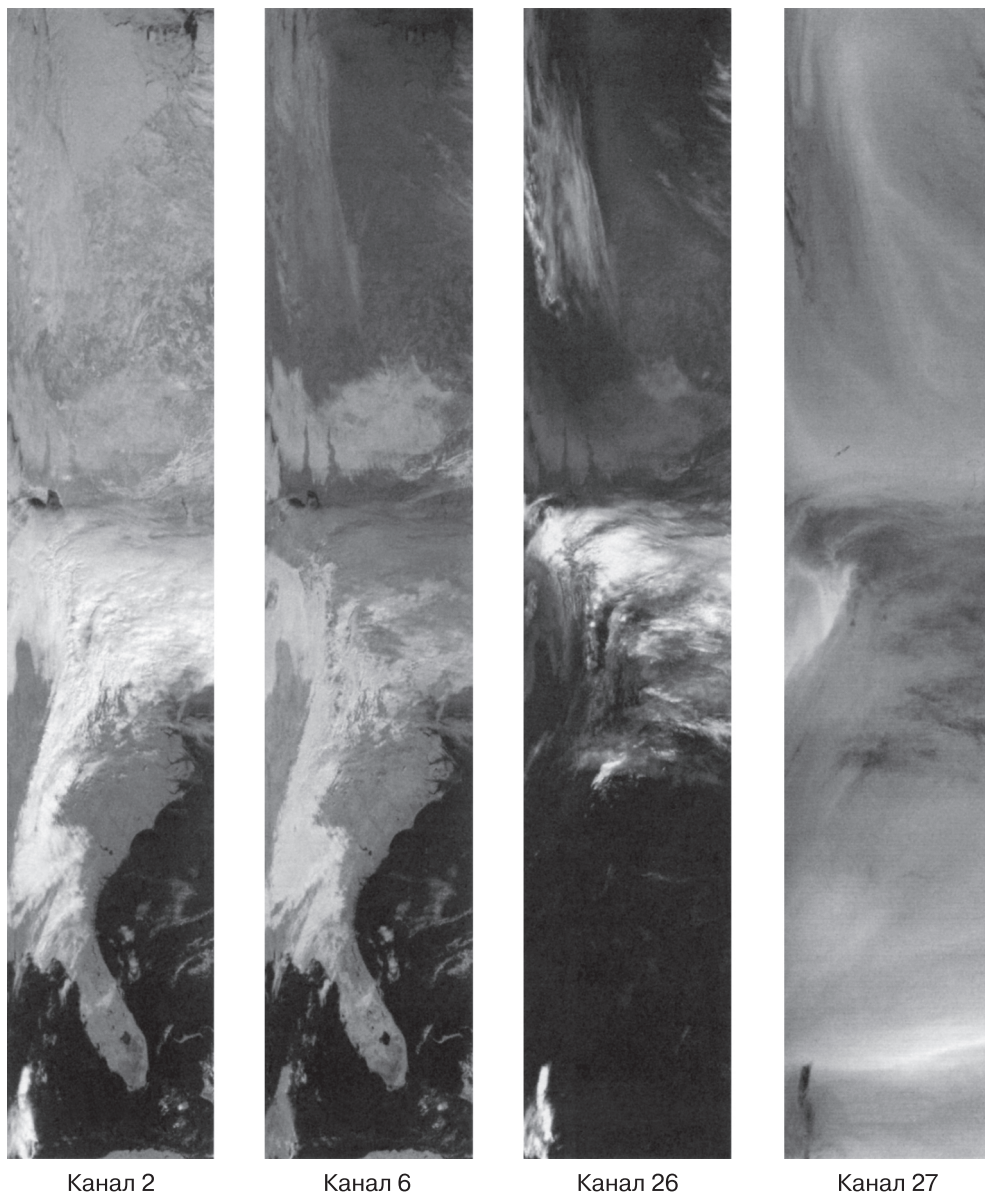


Рис. 1.22. Четыре снимка, полученные в различных каналах съемки аппаратуры MODIS 2 марта 2006 года. В верхней части каждого снимка виден залив Джеймса, в середине расположены Великие озера, а внизу — полуостров Флорида. Ширина мгновенного поля обзора GIFOV для всех снимков равна 1 км

важна для мониторинга состояния сельскохозяйственных культур. В частности, можно определить *эталонные временные образы* определенных видов посевов, выращиваемых в различных регионах Земли, и затем использовать эти данные для идентификации объектов на снимках, полученных в разные моменты времени (Naralick и др., 1980; Badhwar и др., 1982). Данные многовременной съемки применяются также для наблюдения за изменениями природных и антропогенных объектов и для мониторинга состояния атмосферы и океанов.

Многие системы дистанционного зондирования, включая Landsat, AVHRR и SPOT, выведены на солнечно-синхронные орбиты. Каждая из таких систем проходит над одной и той же точкой земной поверхности в одно и то же местное время. Для аппаратуры с фиксированным направлением оси съемки (в нади́р) период повторяемости съемки зависит только от параметров орбиты. К таким системам относится, в частности, Landsat TM. Если на орбите одновременно находится сразу несколько подобных систем, частоту съемки можно увеличить.

Искусственные спутники Земли SPOT оснащены управляемой оптической системой, ось съемки которой может смещаться в сторону от трассы спутника на угол $\pm 26^\circ$ от направления на нади́р. Благодаря этому спутники этой серии могут вести более частую съемку одного и того же участка поверхности с соседних витков. Еще большими возможностями обладают коммерческие ИСЗ IKONOS и QuickBird. Установленная на них аппаратура высокого разрешения позволяет отклонять ось съемки вдоль трассы спутника и таким образом получать стереопару снимков с интервалом в несколько минут. Без использования этой возможности период повторяемости съемки у этих спутников составляет для разных широт от 1 до 3 дней (чем больше широта, тем выше частота съемки). Пилотируемые космические аппараты (Международная комическая станция и корабли многоразового использования, оснащенные экспериментальными радиометрами с синтезированной апертурой и некоторыми другими системами ДЗЗ) вращаются вокруг Земли по неполярным орбитам, поэтому у них циклы съемки не являются столь регулярными. Периоды повторяемости съемки для некоторых систем дистанционного зондирования приведены в табл. 1—5. Пример серии снимков участка земной поверхности, полученных в разные моменты времени, показан на цветной вкладке 1.8.

1.4.4. Группировки искусственных спутников Земли

Поскольку ни один из датчиков не позволяет провести все необходимые измерения объектов на поверхности Земли и в ее атмосфере, для научных исследований используют наборы данных, полученных от различных систем дистанционного зондирования. Одним из способов получения такого набора является использование группировки спутников, которые должны вращаться по одной и той же орбите с небольшим отставанием друг от друга. Впервые такой подход продемонс-

Таблица 1.5. Период повторяемости съемки и время пересечения экваториальной плоскости для некоторых систем ДЗЗ. Все характеристики приведены в предположении, что на орбите находится только одна система данного типа. Исключение составляют лишь радиометры AVHRR, которые устанавливаются, как правило, парами, и аппаратура MODIS, позволяющая проводить съемку одного участка дважды в сутки: утром и в середине дня. ИСЗ GOES находится на геостационарной орбите и ведет съемку только одного участка земной поверхности. Узловое время пересечения экваториальной плоскости указано приблизительно. Оно непрерывно изменяется на малую величину, и по этой причине параметры орбиты необходимо периодически корректировать

Система	Период повторяемости съемки	Узловое время пересечения экваториальной плоскости
AVHRR	1 сутки (одна система), 7 часов (две системы)	7:30, 14:30
GOES	30 минут	—
IKONOS	Несколько минут (на одном витке), от 1 до 3 суток (с соседних витков при отклонении полосы съемки)	10:30
IRS-1A.B	22 дня	10:30
Landsat	18 суток (Landsat-1, 2, 3), 16 суток (Landsat-4, 5,7)	9:30, 10:15
MODIS	от 3 часов до 1 суток	10:30, нисходящая ветвь (Terra), 13:30, восходящая ветвь (Aqua)
QuickBird	Несколько минут; от 1 до 3 суток	10:30
SPOT	26 суток (при фиксированной оси съемки), 1 сутки или 4—5 суток (при отклонении полосы съемки)	10:30

трировало НАСА, объединив в одну группу ИСЗ Landsat-7, EO-1 (1 минута задержки после Landsat-7), Terra (15 минут задержки) и аргентинский спутник SAC-C (30 минут задержки). Все эти спутники пересекали плоскость экватора в утренние часы на нисходящей ветви своей орбиты. Позже была сформирована дневная группировка, состоявшая из головного ИСЗ Aqua и нескольких спутников с атмосферными датчиками на борту, включая Cloudsat (1 минута задержки после Aqua) и CALIPSO (2 минуты задержки). Спутники этой группировки пересекали плоскость экватора на восходящих ветвях своих орбит. Благодаря небольшому временному интервалу между съемкой различными датчиками удалось минимизировать влияние временных изменений (особенно в атмосфере) и существенно упростить научный анализ данных. Вместе с тем следует отметить, что для поддержания необходимого расстояния между спутниками нужно постоянно проводить коррекцию их орбитальных параметров.