

Е. Н. Сутырина

ДИСТАНЦИОННОЕ ЗОНДИРОВАНИЕ ЗЕМЛИ



Министерство образования и науки Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего профессионального образования
«Иркутский государственный университет»
Географический факультет

Е. Н. Сутырина

ДИСТАНЦИОННОЕ ЗОНДИРОВАНИЕ ЗЕМЛИ

Учебное пособие



УДК 528.8(076.5).

ББК 26.11я73

С90

*Печатается по решению учебно-методической комиссии
географического факультета Иркутского государственного университета*

**Издание выходит в рамках
Программы стратегического развития ФГБОУ ВПО «ИГУ»
на 2012–2016 гг., проект № Р212-06-003**

Рецензенты:

Д. И. Стом, д-р биол. наук, проф.

О. А. Бархатова, канд. биол. наук

Сутырина Е. Н.

С90

Дистанционное зондирование земли : учеб. пособие /
Е. Н. Сутырина. – Иркутск : Изд-во ИГУ, 2013. – 165 с.

ISBN 978-5-9624-0801-9

Учебное пособие дает представление о методах дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ). В пособии приводятся основные сведения о методах ДЗЗ, рассматриваются основы теории электромагнитного излучения, описываются съемочные системы и спутниковые платформы, используемые для получения исходных данных, различные виды космических снимков, методы их обработки и дешифрирования, а также основные направления применения данных ДЗЗ.

Учебное пособие предназначено для студентов географического факультета, обучающихся по направлениям 022000.62 «Экология и природопользование» и 021600.62 «Гидрометеорология».

Работа выполнена при финансовой поддержке программы стратегического развития федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Иркутский государственный университет» на 2012–2016 гг.

УДК 528.8(076.5).

ББК 26.11я73

ISBN 978-5-9624-0801-9

© Сутырина Е. Н., 2013

© ФГБОУ ВПО «ИГУ», 2013

СОДЕРЖАНИЕ

Введение	5
1. ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ДИСТАНЦИОННЫХ МЕТОДОВ	8
1.1. Электромагнитное излучение.....	8
1.2. Взаимодействие электромагнитного излучения с атмосферой.....	11
1.3. Взаимодействие излучения с поверхностью Земли....	17
1.4. Физические основы радиационного метода определения температуры поверхности.....	30
2. ОБЗОР СИСТЕМ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ	38
2.1. Общие сведения	38
2.2. Основные технологии получения снимков.....	40
2.3. Разрешающая способность систем дистанционного зондирования.....	46
2.4. Характеристика орбит спутников	50
2.5. Характеристики некоторых сенсоров и платформ.....	50
3. ОБРАБОТКА ДАННЫХ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ	65
3.1. Основные этапы обработки спутниковых изображений.....	65
3.2. Обзор программных средств обработки данных дистанционного зондирования.....	81
4. ПРИМЕНЕНИЕ ДАННЫХ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ	92
4.1. Применение данных дистанционного зондирования в картографии	92
4.2. Применение данных дистанционного зондирования в метеорологии и климатологии	99

4.3. Применение данных дистанционного зондирования в океанологии.....	110
4.4. Применение данных дистанционного зондирования в гидрологии.....	124
4.5. Применение данных дистанционного зондирования в задачах сельского хозяйства.....	140
4.6. Применение данных дистанционного зондирования в области лесного хозяйства	143
4.7. Применение данных дистанционного зондирования в задачах городского и регионального планирования	146
4.8. Применение данных дистанционного зондирования в задачах охраны окружающей среды.....	147
4.9. Применение данных дистанционного зондирования в задачах выявления чрезвычайных ситуаций	156
Заключение	163
Список использованной и рекомендуемой литературы	164

ВВЕДЕНИЕ

Дистанционное зондирование представляет собой процесс, посредством которого собирается информация об объекте, территории или явлении без непосредственного контакта с ним. К дистанционному зондированию относят все виды неконтактных съемок, которые проводятся с различных измерительных платформ: летательных воздушных и космических аппаратов (самолетов, вертолетов, космических кораблей, спутников и т. д.), судов и подводных лодок, наземных станций. При этом *снимок* определяется как двумерное метрическое изображение конкретных объектов, получаемое целенаправленно в результате дистанционной регистрации и (или) измерения собственного или отраженного излучения, и представляет собой наиболее целесообразную форму измерения, регистрации и визуализации излучения, несущего географическую информацию об исследуемых объектах. За последние десятилетия существенно возросли объем, разнообразие и качество материалов дистанционного зондирования. К настоящему времени накоплен огромный фонд (более 100 млн) аэрокосмических снимков, полностью покрывающих всю поверхность Земли, а для значительной части районов – с многократным перекрытием.

В связи с повсеместным свертыванием программ проведения аэрофотосъемки земной поверхности особое значение приобретают космическая съемка земной поверхности. Космическая съемка производится с космических кораблей, спутников, воздушных шаров. Космические системы базируются на длительной работе регулярно пополняемых группировок спутников – спутниковых систем, которые включают сложную инфраструктуру, обеспечивающую функционирование космических аппаратов на орбите, прием информации, ее хранение и распространение.

Благодаря своим свойствам космические снимки находят широкое применение как в практической, так и в научной сферах. Материалы исследований Земли из космоса широко используют в науках о Земле. Космическую съемку применяют в исследованиях, направленных на всестороннее изучение природных ресурсов, динамики природных явлений, в задачах ох-

раны окружающей среды. По космическим снимкам возможно изучение основных структурных особенностей атмосферы, литосферы, гидросферы, биосферы и ландшафтов регионального, зонального и глобального масштаба. Появились такие новые научные направления в изучении Земли, как спутниковая метеорология, спутниковая гидрофизика, космическая океанология, космическая картография и космическая геодезия и др. Разнообразное и широкое применение данные дистанционного зондирования особо нашли в картографии, они служат источниками для составления и оперативного обновления общегеографических и тематических карт. Особое место отводится применению космической информации для повседневного оперативного контроля за состоянием окружающей среды при осуществлении геоэкологического мониторинга регионов.

Дистанционные методы исследования природных объектов обеспечивают большую обзорность, возможность повторного получения данных через определенные промежутки времени, высокую скорость получения и передачи изображений, а также возможность применения комплексного анализа и оценки динамики развития явления на основе оперативного картографирования.

Использование результатов космической съемки для целей картографирования обуславливается исключительно ценными свойствами космических снимков: большой территориальной охват и вытекающая из этого высокая генерализованность изображений; изучение по снимкам основных структурных, региональных и зональных особенностей планеты в целом; одновременность выполнения съемки обширных территорий, что дает возможность изучать связь всех компонентов ландшафта; регулярная повторяемость съемки, позволяющая изучать динамику природных явлений – периодических (суточных, сезонных) и эпизодических (лесные пожары, извержения вулканов и т. д.), а также хозяйственную деятельность (посевные площади, созревание, уборка урожая, загрязнение суши и моря). Составленные по космическим снимкам карты являются более современными и достоверными и отображают явления, которые в отсутствие таких снимков вообще не могли бы быть картографированы. Основные преимущества использования данных дистанционного зондирования для составления карт: актуальность данных на момент исследования, высокая точность определения границ

объектов, более высокий коэффициент объективности выделения объектов и отнесения объекта к определенному классу. Кроме этого, использование данных дистанционного зондирования позволяет сократить объем наземных исследований и таким образом сократить сроки исследования.

Важной особенностью дистанционных методов является то, что они, как правило, являются косвенными, т. е. с их помощью измеряют не интересующие нас параметры объектов, а некоторые связанные с ними величины. Чтобы дешифровать такие параметры, требуются предварительные исследования, включающие в себя различные эксперименты по изучению интересующего объекта контактными методами. Таким образом, методы изучения Земли из космоса относят к высоким технологиям не только в связи с использованием ракетной техники, сложных оптико-электронных приборов, компьютеров, но и с новым подходом к получению интерпретации результатов измерений. И хотя трудоемкие подспутниковые исследования проводятся на небольшой площади, они дают возможность обобщать данные на огромные пространства и даже на весь земной шар.

1. ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ДИСТАНЦИОННЫХ МЕТОДОВ

1.1. Электромагнитное излучение

Принцип дистанционных методов основан на интерпретации результатов измерения электромагнитного излучения, которое отражается либо излучается объектом и регистрируется в некоторой удаленной от него точке пространства.

Электромагнитное излучение – это распространяющееся в пространстве возмущение электрических и магнитных полей (рис. 1.1). Электромагнитное излучение проявляется и как свет, который мы видим, и как тепло, которое мы ощущаем, и как радиоволны, которые принимают наши радио- и телевизионные приемники. Скорость распространения электромагнитного излучения равна скорости света $c_0 = 2,998 \cdot 10^8$ м/с.

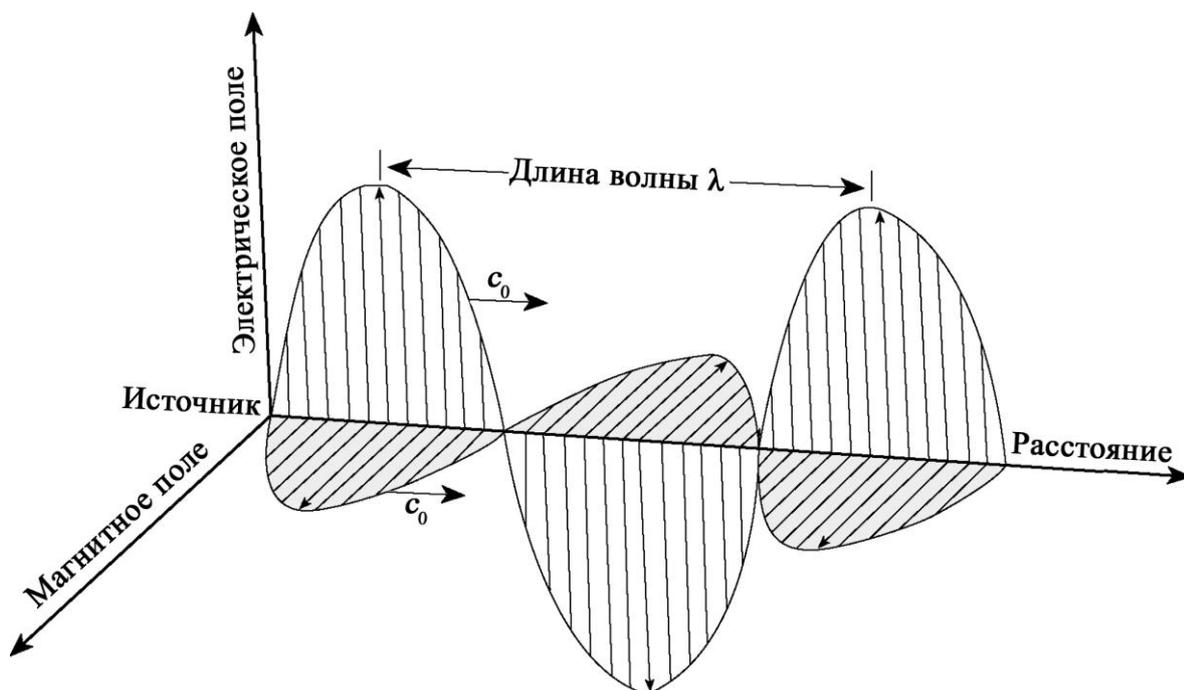


Рис. 1.1. Электромагнитное излучение [Campell, 1996]

Электромагнитное излучение характеризуется двумя взаимосвязанными величинами – длиной волны λ и частотой ν . Длина волны – это расстояние между двумя последовательными

волновыми гребнями. Длины волн в диапазоне, используемом для дистанционного зондирования, обычно измеряются в нанометрах (нм, 10^{-9} м), в микрометрах (мкм, 10^{-6} м) или в сантиметрах (см, 10^{-2} м). Частота измеряется в герцах (Гц). Обычно сравнительно короткие длины волн (меньше сантиметра) характеризуют длиной волны, а более длинные – частотой. Связь между длиной волны λ и частотой ν определяется формулой:

$$\lambda = \frac{c_0}{\nu}. \quad (1.1)$$

Таким образом, чем короче длина волны, тем больше частота, и наоборот, чем меньше частота, тем больше длина волны.

Сочетание всех возможных длин волн принято называть **электромагнитным спектром**. В спектре электромагнитного излучения выделяются следующие диапазоны: γ -диапазон, рентгеновский, ультрафиолетовый, видимый, инфракрасный, радиодиапазон. Некоторые из этих диапазонов в свою очередь подразделяются на поддиапазоны.

Человеческий глаз может воспринимать очень малую часть электромагнитного излучения, которую принято называть видимым диапазоном электромагнитного спектра, который находится в интервале от 0,38 до 0,73 мкм. Большая часть электромагнитного спектра человеческим глазом не воспринимается, но иногда излучение, не видимое глазом, может ощущаться другими органами чувств человека. Например, инфракрасное излучение воспринимается кожей человека как тепло.

Приборы дистанционного зондирования, сенсоры, могут принимать излучение в существенно более широком диапазоне электромагнитного спектра и, таким образом, предоставлять колоссальные объемы информации о состоянии окружающей среды. Основная проблема в этой связи состоит в создании таких алгоритмов обработки спутниковых данных, которые позволили бы извлечь из данных заложенную в них информацию.

По отношению к источнику энергии все дистанционные методы можно разделить на **пассивные** и **активные**. При использовании **активных** методов спутник посылает на Землю сигнал собственного источника энергии (лазера, радиолокационного передатчика и т. д.) и регистрирует его отражение [Самардак, 2005].

Чаще используются **пассивные** методы дистанционного зондирования, которые основаны на регистрации отраженной от по-

верхности объектов солнечной энергии или на регистрации собственного электромагнитного излучения участков поверхности (рис. 1.2).

Отраженное излучение несет информацию о свойствах участка подстилающей поверхности, на котором произошло отражение. Это излучение собирается приемной системой спутника, трансформируется в электрический сигнал и передается на Землю для дальнейшей обработки. Отраженный сигнал на пути к приемной системе спутника поглощается и рассеивается атмосферой, а рассеянное излучение собирается приемной системой вместе с отраженным. Это существенно затрудняет интерпретацию полученной информации. Вместе с тем следует учитывать, кроме Солнца, другие источники излучения – подстилающую поверхность и атмосферу. В видимой области спектра вклад этих источников излучения незначителен, но уже в инфракрасной (ИК) области спектра его приходится учитывать.

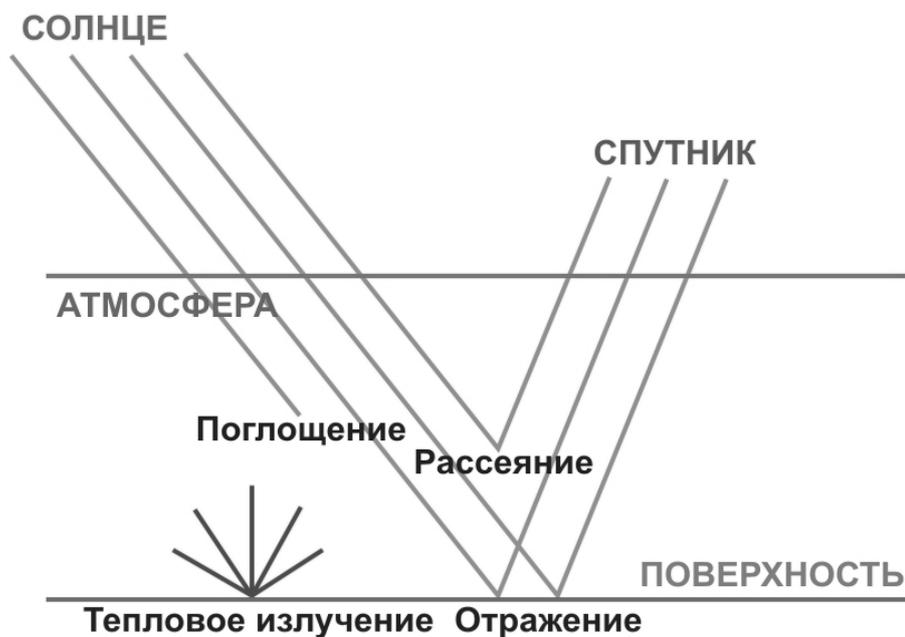


Рис. 1.2. Трансформации электромагнитного излучения в дистанционном зондировании

На волнах длиной более 4 мкм собственное тепловое излучение Земли превосходит излучение Солнца. Регистрируя интенсивность теплового излучения Земли из космоса, можно достаточно точно оценить температуру суши и водной поверхности, которая является важнейшей экологической характеристикой. Измерив температуру верхней границы облачности, можно

определить ее высоту, если учесть, что в тропосфере с высотой температура уменьшается в среднем на 6,5 К/км.

При пассивном дистанционном зондировании Земли (ДЗЗ) из космоса используется участок электромагнитного спектра в диапазоне длин волн от 0,25 мкм до 1 м. Этот широкий участок спектра принято подразделять на ряд диапазонов:

- 0,25–0,4 мкм – ультрафиолетовый диапазон;
- 0,4–0,7 мкм – видимый диапазон;
- 0,7–1,3 мкм – ближний инфракрасный диапазон;
- 1,3–3 мкм – средний инфракрасный диапазон;
- 3–1 000 мкм – дальний, или тепловой инфракрасный диапазон;
- 1 000 мкм – 1 м – миллиметровый и микроволновый участки радиодиапазона.

Последний диапазон используют в пассивных СВЧ (сверхвысокочастотных) системах дистанционного контроля, остальные – в пассивных оптико-электронных и оптико-механических системах [Оптико-электронные системы ..., 2002].

1.2. Взаимодействие электромагнитного излучения с атмосферой

Основной проблемой количественной интерпретации данных дистанционного зондирования, полученных в оптическом диапазоне, является адекватный учет трансформации проходящего сквозь атмосферу излучения, или так называемой атмосферной коррекции. При прохождении через атмосферу электромагнитные волны поглощаются и рассеиваются.

Поглощение – основной механизм взаимодействия электромагнитного излучения с атмосферой. Установлено, что лишь 13 % энергии, излучаемой поверхностью Земли в инфракрасном диапазоне, достигает верхней границы атмосферы, остальная энергия поглощается в атмосфере [Оптико-электронные системы ..., 2002].

Спектр солнечного излучения до и после его прохождения через атмосферу Земли показаны на рис. 1.3. Из рисунка видно, что кривая интенсивности солнечного излучения до его прохождения через атмосферу в достаточной степени соответствует кривой интенсивности излучения абсолютно черного тела при температуре 5900 К. Сравнивая первую кривую с кривой, полученной вблизи поверхности Земли, можно выделить области относительно низких значений, соответствующие окнам поглощения различных атмосферных газов.

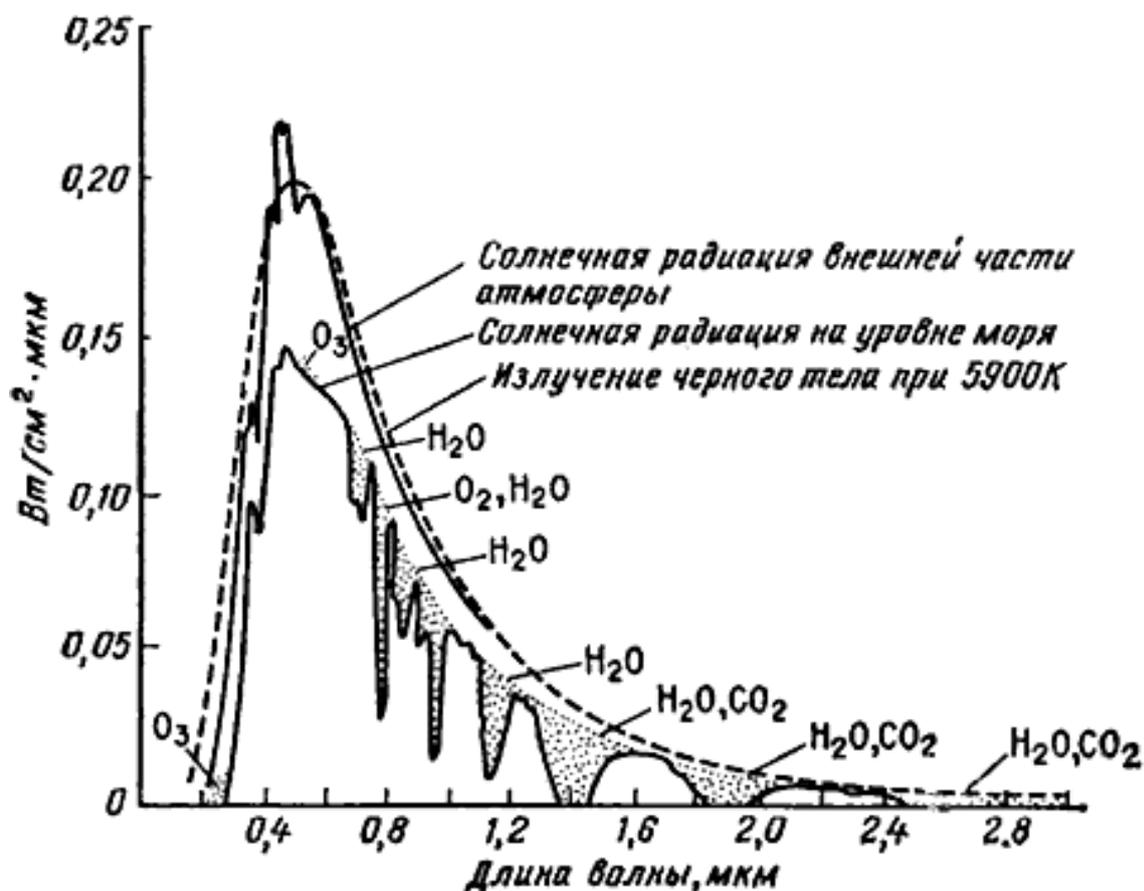


Рис. 1.3. Спектр солнечного излучения [Чандра, Гош, 2008]

Поглощение полностью обусловлено присутствием в атмосфере молекул, способных поглощать энергию в различных диапазонах спектра. Озон, кислород, углекислый газ и водяной пар – четыре компонента атмосферы, которые в основном ответственны за поглощение излучения. В некоторых случаях поглощающие молекулы остаются практически неизменными после взаимодействия с излучением, но в других случаях молекулы меняются, теряя, например, часть своих атомов.

Молекулы **кислорода** в верхних слоях атмосферы поглощают излучение в рентгеновской области спектра и коротковолновое (до 0,3 мкм) ультрафиолетовое излучение. Такое излучение является чрезвычайно вредным для жизни на планете, так как может воздействовать на клетки живых организмов, вызывая мутации и тому подобные нежелательные явления. Молекулы кислорода в этом процессе распадаются на отдельные атомы кислорода. Этот процесс происходит в самых высочайших слоях, которые при этом обогащаются активными атомами кислорода. В более низких слоях атмосферы, до которых жесткое коротко-

волновое излучение доходит уже сильно ослабленным, отдельные атомы кислорода могут объединяться с молекулами кислорода и формировать, таким образом, молекулы озона.

Озон поглощает излучение в средней части ультрафиолетовой области спектра, защищая нас от того вредного излучения, которое осталось не поглощенным молекулами кислорода в более высоких слоях атмосферы. После поглощения излучения молекула озона распадается на атом кислорода и молекулу кислорода, но атом кислорода обычно повторно объединяется с другой молекулой кислорода, создавая при этом новую молекулу озона.

Углекислый газ часто упоминается как один из парниковых газов. Парниковые газы пропускают электромагнитное излучение в видимой области спектра, но интенсивно поглощают излучение в инфракрасной области, что, во-первых, приводит к некоторому повышению температуры атмосферы, а во-вторых, к возвращению части поглощенного излучения обратно к поверхности Земли.

Водяной пар – атмосферный газ, который сильно поглощает излучение в инфракрасной области электромагнитного спектра (между 1,0 и 22,0 мкм). Наиболее высокая концентрация водяного пара наблюдается в нижних слоях атмосферы, причем эта концентрация сильно меняется от места к месту и от одного времени года к другому. Например, воздушная масса над пустыней содержит очень небольшое количество водяного пара, в то время как в тропиках наблюдаются достаточно высокие его концентрации.

Все упомянутые атмосферные газы поглощают электромагнитную энергию в определенных областях спектра, и это определяет, какие части электромагнитного спектра мы можем использовать для целей дистанционного зондирования, а какие нет. На рис. 1.4 представлен спектр пропускания атмосферы в зависимости от длины волны.

Например, атмосфера почти непрозрачна к электромагнитному излучению в большей части инфракрасной области спектра. Те области, в которых поглощение не столь существенно, называются «окнами прозрачности». Большинство инструментов дистанционного зондирования принимают излучение в одном или в нескольких окнах прозрачности. Такие инструменты ориентированы на исследование подстилающей поверхности.

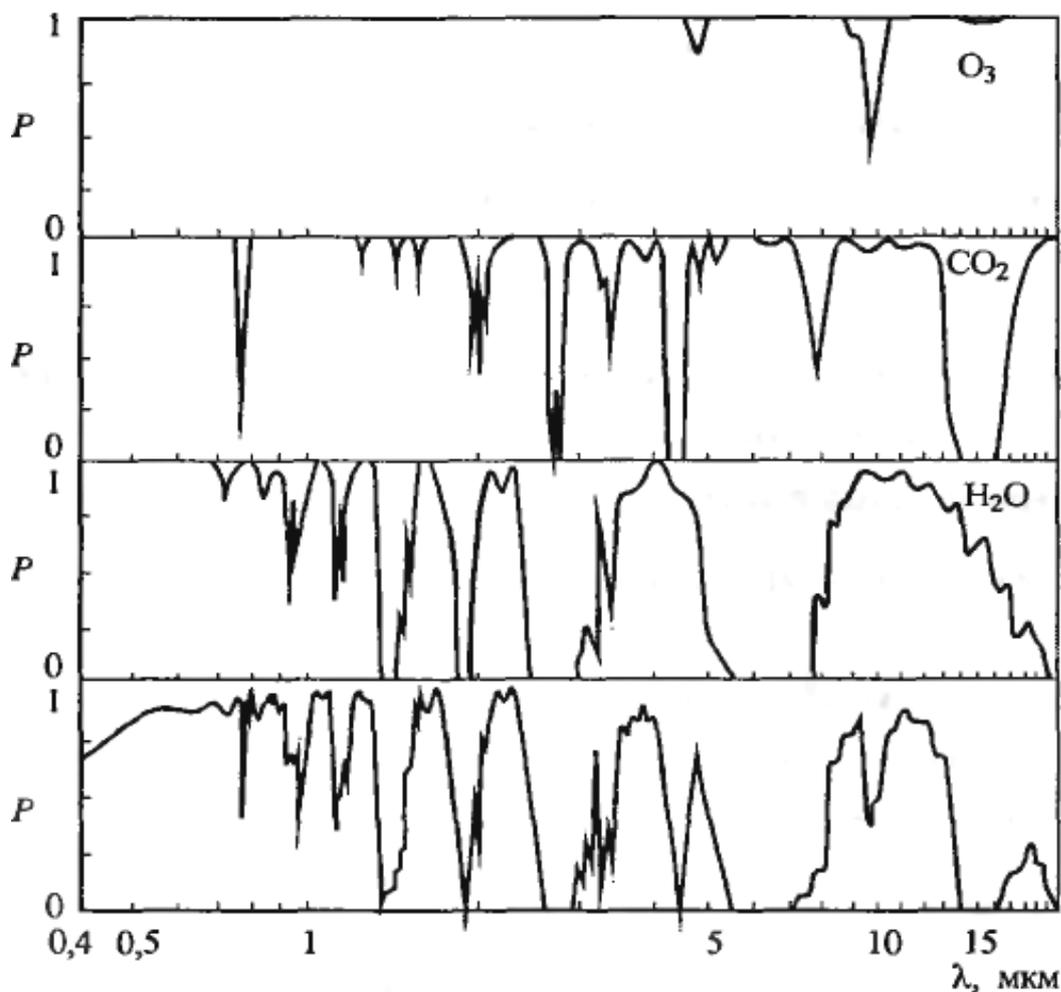


Рис. 1.4. Спектр пропускания атмосферы
[Оптико-электронные системы ..., 2002]

В инфракрасном диапазоне спектра пропускания можно выделить два «окна прозрачности», где коэффициент пропускания близок к 90 % (3,4–4,2 мкм) или 60–80 % (8,0–12,5 мкм). Именно в этих спектральных зонах расположены рабочие каналы инфракрасных радиометров. Диапазон 3,4–4,2 мкм имеет ограниченную применимость по сравнению с другими диапазонами (используется в основном в ночное время), так как в этой спектральной зоне большое влияние на информационный сигнал оказывает отраженное солнечное излучение.

Причем даже при использовании «окон прозрачности» атмосфера значительно трансформирует инфракрасное излучение подстилающей поверхности.

Важным является и то обстоятельство, что различные модели атмосферы обладают различным значением пропус-

кания (табл. 1.1), что приходится иметь в виду при учете атмосферного влияния.

Таблица 1.1

Пропускание атмосферы в спектральном диапазоне 10,2–12,3 мкм
в безоблачных условиях

Модель атмосферы	Пропускание, %
Тропическая	50,3
Летняя средних широт	65,8
Зимняя средних широт	90,2
Летняя субарктическая	76,9
Зимняя субарктическая	94,0

Рассеивание излучения. Причиной рассеивания является изменение направления распространения электромагнитных волн из-за их взаимодействия с молекулами газов и присутствующими в атмосфере частиц. Величина рассеивания зависит от длины волны электромагнитного излучения, количества частиц и концентрации атмосферных газов, а также от пути распространения через атмосферу. В диапазоне видимого света доля рассеянного излучения при регистрации сенсором составляет от 100 при сплошной облачности до 5 % при абсолютно ясном небе.

Выделяют три типа рассеивания в атмосфере: рассеивание Релея, рассеивание Ми и неселективное рассеивание.

Рассеивание Релея. Преобладает при взаимодействии электромагнитного излучения с частицами, размер которых меньше длины волны падающего света. Примеры таких объектов: частицы пыли, молекулы азота (N_2) и кислорода (O_2). Величина рассеивания Релея обратно пропорциональна длине волны (чем меньше длина волны, тем сильнее рассеивание). При дистанционном зондировании с помощью спутников основным видом рассеивания является рассеивания Релея. В отсутствие рассеивания небо было бы черным. В дневное время солнечные лучи проходят через атмосферу по кратчайшему пути. Благодаря рассеиванию Релея человек видит синее небо, поскольку синий свет обладает наименьшей длиной волны, которую может наблюдать человеческий глаз. На закате и восходе солнечные лучи проходят более длинный путь через атмосферу. Коротковолновая часть излучения успевает рассеяться, и поверхности Земли достигают только волны относительно большой длины. В ре-

зультате небо окрашивается в оранжевый или красный цвет. Вызванное им искажение спектральных характеристик отраженного света по сравнению с измерениями вблизи земной поверхности приводит к тому, что интенсивность коротковолнового излучения оказывается завышенной.

Рассеивание Релея является причиной снижения контрастности снимков. Оно отрицательно влияет на возможность дешифрирования цифровых снимков, полученных с помощью сканирующих систем спутников, а также ограничивает возможности классификации объектов.

Рассеивание Ми. Возникает, если длина волны падающего излучения сравнима с размерами частиц. Наиболее важной причиной рассеивания Ми являются аэрозоли, представляющие собой смесь газов, паров воды и частиц пыли. Как правило, рассеивание Ми возникает в нижних слоях атмосферы, где крупные частицы встречаются чаще, и доминирует в условиях сплошной облачности. Рассеивание проявляется в нескольких спектральных диапазонах: от ближнего ультрафиолетового диапазона до ближнего инфракрасного диапазона.

Неселективное рассеивание. Возникает при условии, что размер частиц существенно больше длины волны излучения. К таким частицам относятся капли воды и крупные частицы пыли. Неселективное рассеивание не зависит от длины волны и наиболее отчетливо проявляется при наличии облаков, содержащих водные капли. Поскольку излучение с разной длиной волны рассеивается одинаково, облака выглядят белыми. В условиях сплошной облачности излучение в оптическом диапазоне не проникает через атмосферу.

Влияние облачности. Облачность является наибольшей помехой при съемке в оптическом диапазоне. Как правило, в каждый момент времени она закрывает более 50 % поверхности земного шара. При планировании съемок важно располагать данными об условиях облачности. Для этого составляют карты, характеризующие глобальное распределение зон устойчивой облачности и дающие оценку условий съемки. Кроме того, по статистическим исследованиям известно, что облачность обычно сохраняется над каждой точкой земной поверхности на протяжении не более 3–5 дней.

1.3. Взаимодействие излучения с поверхностью Земли

Различают три основных типа взаимодействия падающего электромагнитного излучения с объектами на поверхности Земли: отражение, поглощение и пропускание. Соотношение, связывающее между собой три компонента излучения после его взаимодействия с поверхностью, можно получить из закона сохранения энергии. Учитывая, что все компоненты являются функциями длины волны λ , запишем это соотношение в следующем виде:

$$R_I \lambda = R_O \lambda + R_A \lambda + R_T \lambda , \quad (1.2)$$

где $R_I \lambda$ – энергия падающего излучения, $R_O \lambda$ – энергия отраженного излучения, $R_A \lambda$ – поглощенная энергия, $R_T \lambda$ – энергия излучения, прошедшего через вещество.

Свойства отраженного, поглощенного и пропущенного излучения отличаются для разных объектов на поверхности Земли и зависят от вещества объекта и физических условий, в которых он находится. Эти различия и позволяют идентифицировать объекты на снимке. Даже у объектов одного типа соотношение между поглощенным, отраженным и пропущенным излучением зависит от длины волны. В результате два объекта могут оказаться неразличимыми в одном спектральном диапазоне, но хорошо различимыми в другом. В видимой части спектра эти различия воспринимаются как изменения *цвета*. Объекты кажутся синими, когда они отражают большую часть излучения в синей части спектра, и зелеными, когда максимум их отражательной способности приходится на зеленый спектральный диапазон. То же самое относится и к любому другому цвету. Амплитудные вариации спектра отраженного излучения используют для дешифрирования различных объектов на снимке.

Поскольку множество систем дистанционного зондирования работает в тех спектральных диапазонах, где доминирует отраженное излучение, отражательные свойства различных объектов играют очень важную роль при их идентификации.

Также важно учитывать геометрические характеристики отражения, которые в основном зависят от неровности поверхности. На плоской поверхности наблюдается зеркальное отра-

жение, при котором угол отражения равен углу падения. На неровной поверхности возникает диффузное (или ламбертово) отражение, при котором падающее излучение отражается равномерно во всех направлениях. В реальной ситуации отражение носит смешанный характер.

На рис. 1.5 представлены различные виды отражения. Категория поверхности зависит от отношения размеров ее неровностей к длине волны падающего излучения. Так, например, в видимом диапазоне песчаный пляж является неровной поверхностью, но в более длинноволновой части электромагнитного спектра он ведет себя как плоская поверхность. Иными словами, если длина волны падающего излучения много меньше вариаций высоты поверхности или размеров слагающих ее частиц, то отражение будет диффузным.

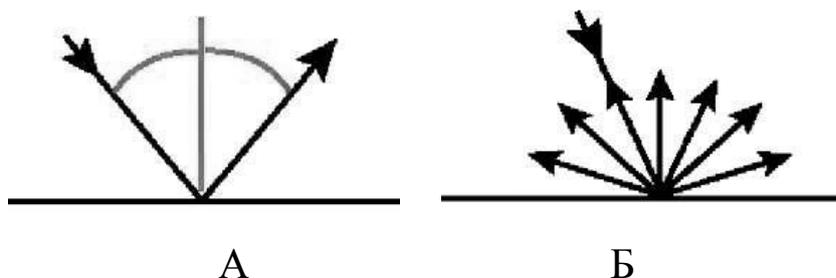


Рис. 1.5. Зеркальное (А) и диффузное (Б) отражение

В отличие от зеркального отражения спектр излучения, образованного при диффузном отражении, содержит информацию о цвете поверхности. Именно поэтому измерение диффузных отражательных характеристик различных территорий является важной составляющей дистанционного зондирования.

Отражательные свойства земной поверхности можно охарактеризовать, измерив относительную долю энергии отраженного излучения как функцию длины волны. Эта функция называется *спектральной отражательной способностью* и определяется как отношение энергии отраженного излучения $R_o \lambda$ с заданной длиной волны λ к энергии падающего излучения $R_i \lambda$ с той же длиной волны, выраженное в процентах:

$$\rho_{\lambda} = \frac{R_o \lambda}{R_i \lambda} \cdot 100\% . \quad (1.3)$$

Различные элементы земной поверхности – растительность, почвы, вода – по-разному отражают падающее на них излучение в разных зонах электромагнитного спектра. *Кривой спектральной отражательной способности* называется график зависимости спектральной отражательной способности объекта от длины волны. Вид этой кривой позволяет изучить спектральные характеристики объекта и имеет большое значение при выборе спектрального диапазона, в котором будет проводиться сбор данных дистанционного зондирования для определенной исследовательской задачи. Отражательную способность можно измерить в лабораторных или полевых условиях с помощью спектрометра.

Ход кривых спектральной отражательной способности меняется в зависимости от состояния объекта. Например, различаются кривые сухой и влажной почвы, водоемов с чистой и загрязненной водой, лесов в разное время года. На рис. 1.6 приведены примеры обобщенных спектральных кривых для типичных объектов Земли.

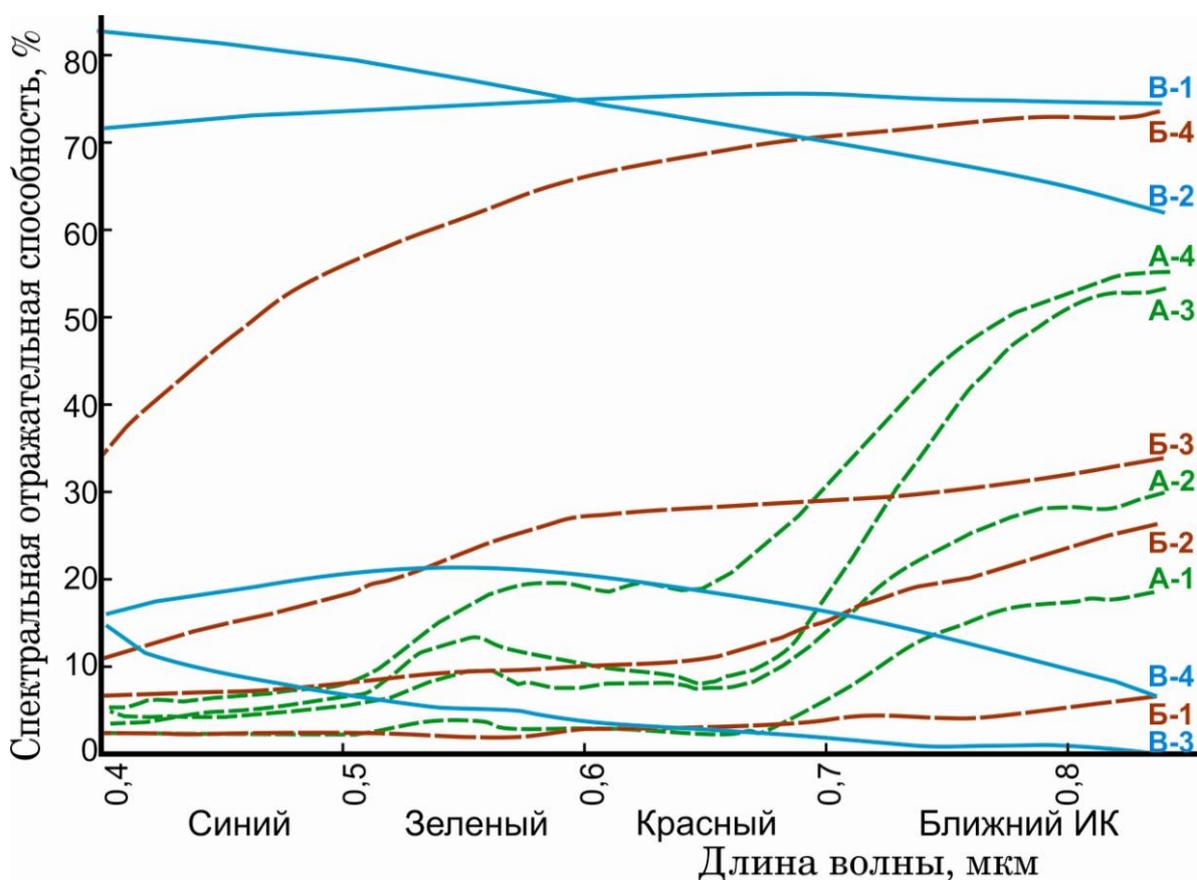


Рис. 1.6. Кривые спектральной отражательной способности различных природных объектов (пояснения см. в табл. 1.2)

Пояснения к рис. 1.6

Класс А	Растительный покров
А-1	Кривая расположена очень низко, слабый максимум в видимой и незначительный подъем в ближней ИК-области спектра, <i>соответствует хвойным лесным породам в зимний период</i>
А-2	Кривая имеет четкий максимум в видимой области спектра, расположена выше предыдущей кривой, заметно выше поднимается в ближней ИК-области спектра, <i>соответствует хвойным лесным породам в летний период</i>
А-3	Кривая имеет резко выраженный максимум в желто-зеленом участке и очень высокий подъем в ближней ИК-области спектра, <i>соответствует лиственным лесам в летний период и травяным покровам с густой и сочной растительностью</i>
А-4	Кривая имеет подъем во всем видимом диапазоне, высокий подъем в ближней ИК-области спектра, <i>соответствует лиственным лесам в осенний период, созревшим (пожелтевшим) полевым культурам</i>
Класс Б	Почвы и обнажения
Б-1	Кривая равномерно поднимается в направлении ближнего ИК-участка спектра, <i>соответствует черноземным почвам</i>
Б-2	Кривая равномерно поднимается в видимой области спектра и имеет более крутой подъем в ближней ИК-области спектра, расположена выше кривой первого типа, <i>соответствует дерново-подзолистым почвам</i>
Б-3	Кривая имеет более крутой подъем и выпуклость на участке спектра 0,55–0,65 мкм, расположена выше кривых первого и второго типов, <i>соответствует пескам, обнажениям пустыни, некоторым горным породам</i>
Б-4	Кривая выпуклая с крутым подъемом, расположена значительно выше всех трех предыдущих типов, <i>соответствует известняку, глине и другим светлым объектам</i>
Класс В	Водные поверхности и снежный покров
В-1	Нейтральная высоко расположенная кривая, <i>соответствует снегу, покрытому ледяной коркой</i>
В-2	Кривая имеет постепенное и равномерное падение к ближней ИК-области спектра, расположена высоко, <i>соответствует свежесыпавшему снегу</i>
В-3	Кривая имеет сильное падение в видимой и очень пологое понижение в ближней ИК-области спектра, <i>соответствует чистой воде</i>
В-4	Кривая расположена существенно выше предыдущей кривой и <i>соответствует мутной воде</i>

Растительный покров. Кривая спектральной отражательной способности зеленой растительности имеет весьма характерный вид, ее поведение сильно изменяется в зависимости от длины волны (см. рис. 1.6). Из рисунка видно, что отражательная способность растительного покрова мала в синем и красном диапазонах видимого спектра. Причина этого заключается в существовании окна поглощения, связанного с присутствием в зеленой листве хлорофилла, который поглощает большую часть излучения. Минимум отражательной способности приходится на длину волны 0,45 мкм. При увеличении экологической нагрузки содержание хлорофилла в растительности снижается, а отражательная способность увеличивается, особенно в красном диапазоне, из-за чего растительность приобретает желтый или хлоротичный оттенок.

Важную роль играют и другие пигменты, в частности каротин, ксантофил (желтый пигмент) и антоциан (красный пигмент). Каротин и ксантофил часто встречаются в листьях, однако их окна поглощения находятся в синем диапазоне (0,45 мкм), где доминирующим является влияние хлорофилла, поэтому влияние этих пигментов проявляется только в его отсутствие. Некоторые виды деревьев вырабатывают в больших количествах антоциан и из-за этого имеют красный цвет. При внимательном изучении влияния различных пигментов на отражательную способность растительного покрова оказывается, что в отличие от видимого диапазона, в котором наблюдаются значительные различия, в близком и среднем инфракрасном диапазонах этих различий почти не существует.

В близкой инфракрасной части спектра наблюдается существенное увеличение отражательной способности при переходе через пороговое значение 0,7 мкм из видимой в инфракрасную часть спектра. В этом диапазоне зеленый растительный покров характеризуется высокой отражательной способностью, высокой прозрачностью и низким поглощением. Значения коэффициентов отражения и прозрачности достигают величины порядка 45–50 %, а доля поглощенного излучения составляет всего около 5 %. Важную роль играет также структура листвы.

Разница в отражательной способности одноярусной и многоярусной древесной растительности может достигать 85 %. Причина этого проста: дополнительное излучение, прошедшее через первый ярус, отражается от второго, а затем частично еще

раз проходит через первый ярус. Этот эффект особенно заметен при сравнении отражательной способности в центре исследуемого массива и на его краю, где нет многоярусности.

В среднем инфракрасном диапазоне отчетливо заметен эффект, связанный с окнами поглощения воды, центры которых соответствуют длинам волн 1,4; 1,9 и 2,7 мкм. Существует еще два окна поглощения воды вблизи 0,9 и 1,1 мкм, но эти окна очень узкие и практически не влияют на кривую спектральной отражательной способности.

Пики спектральной отражательной способности в среднем инфракрасном диапазоне приходятся на 1,6 и 2,2 мкм. Отмечают также сильное влияние влажности: чем меньше влажность листы, тем выше ее отражательная способность.

Из всего вышеописанного можно выделить следующие наиболее важные спектральные характеристики зеленого растительного покрова:

- отчетливые различия отражательной способности в видимом, ближнем и среднем инфракрасных диапазонах;
- доминирующая роль пигментации листы в видимой части спектра;
- доминирующая роль структуры растительности в ближнем инфракрасном диапазоне, где половина излучения пропускается, а половина отражается;
- доминирующая роль влажности растительного покрова в среднем инфракрасном диапазоне, где большая часть излучения поглощается листы.

Почвы. Кривые спектральной отражательной способности большинства почв выглядят весьма просто (рис. 1.6). Наиболее заметным свойством излучения, отраженного от сухих почв, является, как правило, возрастание значений коэффициента отражения с увеличением длины волны, особенно в видимом и ближнем инфракрасном диапазонах. Взаимодействие излучения с почвой сводится к тому, что падающее излучение либо отражается, либо поглощается. В то же время почва состоит из пород с разными физическими и химическими свойствами, которые могут влиять на характеристики отражения и поглощения. Хотя формы кривых спектральной отражательной способности почв схожи между собой, амплитудные характеристики этих кривых могут заметно различаться в зависимости от свойств почвы. На

спектральную отражательную способность почвенного покрова могут оказать заметное влияние такие факторы, как влажность, количество органических веществ, окиси железа, относительная доля песчаников и отложений, а также неровность поверхности.

Первая характеристика почвы, требующая изучения, – это ее гранулометрический состав, который определяется относительным содержанием песка, отложений и глины. Характерный диаметр частиц глины – 0,002 мм, отложений – от 0,002 до 0,005 мм, песка – от 0,05 до 2,0 мм. В силу такого распределения глина содержит больше частиц, чем песок. При наличии влаги каждая частица почвы покрыта тонким слоем воды, который занимает некоторое пространство между отдельными частицами. Хотя этот слой очень тонкий, миллионы частиц могут удерживать огромное количество воды. Именно поэтому существует связь между количеством частиц в почве и ее влажностью.

Отражательная способность сухих песчаников остается почти постоянной, в то время как кривые спектральной отражательной способности влажных песчаников имеют заметные провалы при длинах волн 1,4; 1,9 и 2,3 мкм. В видимой части спектра также наблюдается заметное снижение отражательной способности влажных почв по сравнению с сухими. Таким образом, спектральная яркость почв во многом зависит от их состава, определяющего как размер слагающих почву частиц, так и возможный уровень содержания влаги. При прочих равных условиях с уменьшением размера частиц поверхность почвы становится более гладкой и доля отраженного излучения возрастает. Было показано, что при увеличении размера частиц с 0,22 до 2,66 мм коэффициент поглощения увеличивается на 14 %.

Еще одним важным свойством почвы, которое влияет на ее отражательную способность, является содержание органических веществ, которое характеризует количество азота в почве. Показано, что для большинства климатических зон относительное содержание органических веществ в почве колеблется от 0,5 до 5 %. При 5 %-ном содержании органических веществ почва обычно имеет темно-коричневый или черный цвет, а при меньшем содержании – светло-коричневый или светло-серый. При этом в видимом диапазоне спектра зависимость отражательной способности почвы от содержания органических веществ является нелинейной.

Замечено, что связь между цветом почвы и содержанием в ней органических веществ зависит от климатической зоны. При высокой температуре почвы с низким содержанием влаги (крупные частицы) содержат больше органических веществ, чем такие же почвы в более холодных зонах. Таким образом, при оценке зависимости спектральной отражательной способности от количества органических веществ необходимо учитывать еще и климатический пояс, и условия дренирования.

Из приведенного можно сделать следующие выводы о спектральных характеристиках почв:

- увеличение влажности почвы ведет к снижению ее отражательной способности во всем спектральном диапазоне отраженного излучения;
- отражательная способность грунта увеличивается с уменьшением размера слагающих его частиц;
- уменьшение неровности поверхности ведет к увеличению ее отражательной способности;
- отражательная способность почвы уменьшается с увеличением содержания в ней органических веществ;
- увеличение содержания оксида железа ведет к снижению отражательной способности почв.

Водные поверхности. По сравнению с растительными покровами и почвами отражательная способность водных поверхностей относительно низка. Если растительный покров может отражать до 50 % падающего излучения, а почвы – до 30–40 %, то доля излучения, отраженного водной поверхностью, не превышает 10 %. Вода отражает электромагнитное излучение в видимом и близком инфракрасном диапазонах. При длинах волн больше 1200 мкм все падающее излучение поглощается. Наибольшей отражательной способностью обладает мутная водная поверхность, а пик отражения водоемов с большим количеством растительности, содержащей хлорофилл, приходится на зеленую часть спектра.

Вегетационные индексы. Как было отмечено выше, характерным признаком растительности и ее состояния является спектральная отражательная способность, характеризующаяся большими различиями в отражении излучения разных длин волн. Знания о связи структуры и состояния растительности с ее отражательными способностями позволяют использовать космические снимки для идентификации типов растительности и их состояния.

В настоящее время существует около 160 вариантов вегетационных индексов. Они подбираются эмпирическим путем, исходя из известных особенностей кривых спектральной отражательной способности растительности и почв. Расчет большей части вегетационных индексов базируется на двух наиболее стабильных (не зависящих от прочих факторов) участках кривой спектральной отражательной способности растений. В красной области спектра (0,6–0,7 мкм) лежит максимум поглощения солнечной радиации хлорофиллом, а в ближнем участке инфракрасной области (0,7–1,3 мкм) находится область максимального отражения энергии клеточной структурой листа. То есть высокая фотосинтетическая активность (связанная, как правило, с густой растительностью) ведет к более низким значениям коэффициентов отражения в красной зоне спектра и большим значениям в ближней инфракрасной.

Один из самых распространенных и используемых индексов для решения задач, использующих количественные оценки растительного покрова, вегетационный индекс *NDVI* (Normalized Difference Vegetation Index) – нормализованный относительный индекс растительности, который для растительности принимает положительные значения, и чем больше зеленая фитомасса, тем он выше. На значения индекса влияет также видовой состав растительности, ее сомкнутость, состояние, экспозиция и угол наклона поверхности, цвет почвы под разреженной растительностью.

Вычисляется по следующей формуле:

$$NDVI = \frac{\rho_{NIR} - \rho_{RED}}{\rho_{NIR} + \rho_{RED}}, \quad (1.4)$$

где ρ_{NIR} – отражение в ближней инфракрасной области спектра, ρ_{RED} – отражение в красной области спектра. *NDVI* может быть рассчитан на основе любых снимков высокого, среднего или низкого разрешения, имеющих спектральные каналы в красном и ближнем инфракрасном диапазонах. Благодаря минимальному временному разрешению данных AVHRR/NOAA вычисление *NDVI* на их основе может давать оперативную информацию об эколого-климатической обстановке и возможность отслеживать динамику различных параметров с периодичностью менее суток. А большой пространственный охват позволяет проводить

мониторинг территорий, соразмерный с площадями областей и целых стран. Данные же камер более высокого разрешения, типа Landsat, IRS, Aster, позволяют следить за состоянием объектов, размеры которых доходят до отдельного поля или лесного выдела. Алгоритм расчета *NDVI* встроен практически во все распространенные пакеты программного обеспечения, связанные с обработкой данных дистанционного зондирования.

Индекс *NDVI* может принимать значения от -1 до 1 . Для зеленой фотосинтезирующей растительности индекс *NDVI* принимает положительные значения, обычно от $0,2$ до $0,8$ (рис. 1.7).

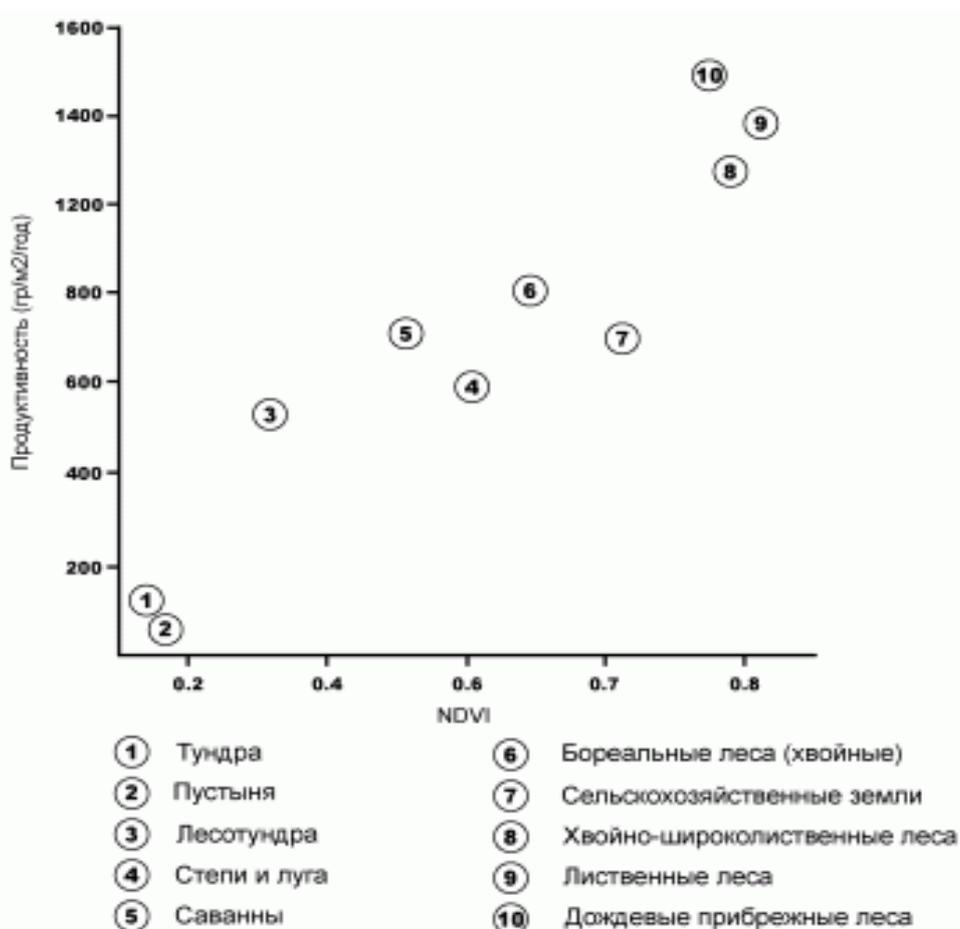


Рис. 1.7. Зависимость значения *NDVI* от продуктивности для различных типов экосистем

На основе *NDVI* можно получать численные данные, используемые для оценки и прогнозирования урожайности и продуктивности, биологического разнообразия, степени нарушенности и ущерба от различных естественных и антропогенных бедствий, аварий и т. д. *NDVI* позволяет выявить проблемные зоны угнетенной растительности, давая возможность принимать наиболее верные в долгосрочной перспективе решения, направ-

ленные на повышение урожайности. При помощи статистической обработки карт *NDVI* помимо определения количества фитомассы можно выделить площади посева различных сельскохозяйственных культур.

Часто расчет *NDVI* употребляется на основе серии разновременных (разносезонных) снимков с заданным временным разрешением, позволяя получать динамическую картину процессов изменения границ и характеристик различных типов растительности (месячные вариации, сезонные вариации, годовые вариации) (рис. 1.8).

Являясь искусственным безразмерным показателем, *NDVI* в первую очередь предназначен для измерения эколого-климатических характеристик растительности, но в то же время может иметь тесную связь с такими параметрами, как влажность и органическая насыщенность почвы, эвапотранспирация, объем выпадаемых осадков и т. д. Зависимость между этими параметрами и *NDVI*, как правило, не прямая и связана с особенностями исследуемой территории, ее климатическими и экологическими характеристиками, кроме этого, часто приходится учитывать временную разнесенность исследуемой характеристики и ответной реакции *NDVI*.

Благодаря особенности отражения в красной и ближней инфракрасной областях спектра объекты, не связанные с растительностью, имеют фиксированное значение *NDVI*, что позволяет использовать этот параметр для их идентификации (табл. 1.3).

Таблица 1.3

Значения отражения различных объектов
в красной и ближней инфракрасной областях спектра

Тип объекта	Отражение в красной области спектра	Отражение в ближней инфракрасной области спектра	Значение <i>NDVI</i>
Густая растительность	0,1	0,5	0,7
Разряженная растительность	0,1	0,3	0,5
Открытая почва	0,25	0,3	0,025
Облака	0,25	0,25	0
Снег и лед	0,375	0,35	-0,05
Вода	0,02	0,01	-0,25
Искусственные материалы (бетон, асфальт)	0,3	0,1	-0,5

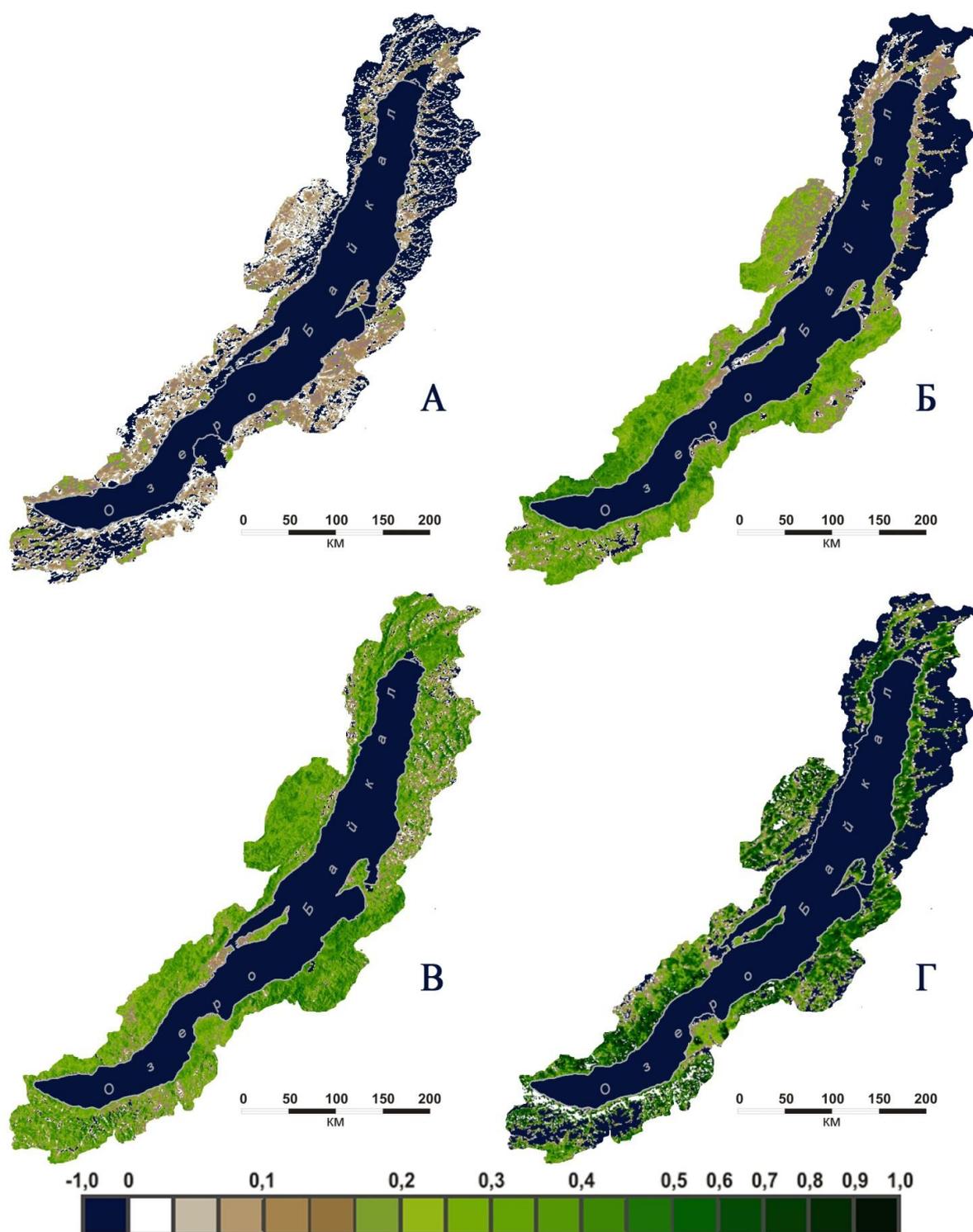


Рис. 1.8. Изменение значений индекса *NDVI* в пределах Центральной экологической зоны байкальской природной территории в 2007 г.: в январе (А), июне (Б), августе (В) и ноябре (Г) (по данным прибора AVHRR)

Это свойство довольно активно используется для регионального картирования и анализа различных типов ландшафтов и оценки ресурсов в масштабе стран и континентов.

Со времени разработки алгоритма для расчета $NDVI$ у него появилось довольно много модификаций предназначенных для уменьшения влияния различных помехообразующих факторов. Таких, например, как поглощение излучения атмосферой – атмосфероустойчивый вегетационный индекс $ARVI$ (Atmospheric-Resistant Vegetation Index):

$$ARVI = \frac{\rho_{NIR} - R_b}{\rho_{NIR} + R_b}, \quad (1.5)$$

где $R_b = \rho_{RED} - a \rho_{RED} - \rho_{BLUE}$, ρ_{BLUE} – отражение в синей области спектра, как правило, $a = 1$, при малом покрытии растительности и неизвестном типе атмосферы $a = 0,5$. $ARVI$ использует значение отражения в синей области спектра, чтобы устранить влияние атмосферы на значение коэффициента отражения в красной зоне. Значения индекса $ARVI$ изменяются от -1 до 1 .

Другой пример – это индексы, устойчивые к влиянию почвы. Одним из таких индексов является почвенный вегетационный индекс $SAVI$ (Soil Adjusted Vegetation Index):

$$SAVI = \frac{\rho_{NIR} - \rho_{RED}}{\rho_{NIR} + \rho_{RED} + L} 1 + L, \quad (1.6)$$

где L – корректирующий фактор, который может варьировать от 0 для очень густого растительного покрова до 1 для очень разреженного, в большинстве приложений для промежуточной густоты растительности используется значение $L = 0,5$. Значения индекса $SAVI$ также изменяются от -1 до 1 .

Существуют также индексы, основанные на $NDVI$, корректирующие сразу несколько помехообразующих факторов, как, например, EVI (Enhanced Vegetation Index):

$$EVI = \frac{\rho_{NIR} - \rho_{RED}}{\rho_{NIR} + C_1 \rho_{RED} - C_2 \rho_{BLUE} + L^*} 1 + L^*. \quad (1.7)$$

Эмпирически коэффициенты C_1 , C_2 и L^* равны $6,0$, $7,5$ и $1,0$ соответственно. Индекс EVI тоже может принимать значения от -1 до 1 .

Главным преимуществом вегетационных индексов является легкость их получения и широкий диапазон решаемых с их по-

мощью задач. Благодаря всем этим особенностям карты вегетационных индексов часто используются как один из промежуточных дополнительных слоев для проведения более сложных типов анализа, результатами которого могут стать карты продуктивности лесов и сельскохозяйственных земель, карты типов ландшафтов, растительности и природных зон, почвенные, аридные, фитогидрологические и другие эколого-климатические карты.

1.4. Физические основы радиационного метода определения температуры поверхности

Спутниковые радиометры измеряют не непосредственно температуру суши или поверхности воды, а принимают электромагнитное излучение. Для оценки по спутниковым данным температуры поверхности воды необходимо понимание физических принципов дистанционных методов, основных понятий и законов электромагнитного излучения.

В основе радиационного инфракрасного метода измерения температуры воды лежат законы излучения нагретых тел. Все тела, имеющие температуру выше абсолютного нуля (0 К), испускают электромагнитное излучение, поскольку их молекулы находятся в возбужденном состоянии, которое отличается от состояния полного покоя. При этом часть внутренней энергии вещества превращается в энергию излучения. Поэтому нагретые тела являются источниками электромагнитного излучения в широком диапазоне частот. Это излучение называют *тепловым излучением*.

Важной характеристикой при изучении теплового излучения является *монохроматический коэффициент поглощения* (поглощательная способность) тела – безразмерная величина a_λ , которая показывает, какая доля энергии электромагнитных волн с длинами волн от λ до $\lambda + d\lambda$, падающих на поверхность тела, поглощается им. Значение зависит от длины электромагнитных волн, температуры, химического состава тела и состояния его поверхности.

Особое место в теории теплового излучения занимает *абсолютно черное тело* – тело, которое способно полностью поглощать все падающее на него электромагнитное излучение, а затем заново его испускать. У абсолютно черного тела на всех частотах и при любых температурах поглощательная способность равна 1.

Основной характеристикой изучения абсолютно черного тела является излучательная способность тела (спектральная

плотность излучения) $r_\lambda(T)$, Вт/м³, т. е. физическая величина, численно равная отношению энергии dW , излучаемой за единицу времени с единицы площади поверхности тела посредством электромагнитных волн в узком интервале длин волн от λ до $\lambda + d\lambda$, к ширине этого интервала $d\lambda$.

Эксперименты показывают, что тепловое излучение имеет непрерывный спектр. Это означает, что нагретое тело испускает некоторое количество энергии излучения в любом диапазоне частот или длин волн. Распределение энергии излучения тела по спектру зависит от температуры тела. При этом для всех тел с увеличением температуры максимум энергии излучения смещается в коротковолновый участок спектра, а общая энергия излучения возрастает. Так если излучение батареи центрального отопления ($T \approx 350$ К) имеет пик энергии в диапазоне инфракрасного излучения, то раскаленная поверхность Солнца ($T \approx 6 \cdot 10^3$ К) излучает значительную часть энергии в диапазоне видимого света, а при ядерном взрыве ($T \approx 10^6$ К) большая доля энергии взрыва уходит коротковолновыми рентгеновским и γ -излучением.

С помощью закона Вина (1.7) можно оценить длину волны, на которую приходится максимум излучательной способности тела, если известна его температура. Согласно закону смещения Вина длина волны λ_m , на которую приходится максимум излучательной способности абсолютно черного тела, обратно пропорциональна его абсолютной температуре:

$$\lambda_m = \frac{b_m}{T}, \quad (1.8)$$

где $b_m = 2,9 \cdot 10^{-3}$ – постоянная Вина, м·К, T – температура тела, К.

Зависимость спектральной излучательной способности абсолютно черного тела от его температуры подчиняется закону Планка:

$$r_\lambda(T) = \frac{2\pi c_0^2 h}{\lambda^5 \left(\exp\left(\frac{hc_0}{\lambda kT}\right) - 1 \right)}, \quad (1.9)$$

где $r_\lambda(T)$ – спектральная плотность потока излучения, Вт/м³; T – температура абсолютно черного тела, К; $c_0 = 2,998 \cdot 10^8$ м/с – скорость света в вакууме; $h = 6,626 \cdot 10^{-34}$ Дж·с – постоянная Планка; $k = 1,38 \cdot 10^{-23}$ Дж/К – постоянная Больцмана.

На рис. 1.9 можно видеть графическое отображение законов смещения Вина и Планка (штрихованная линия проходит через максимумы спектральной плотности излучения для каждой температуры излучателя).

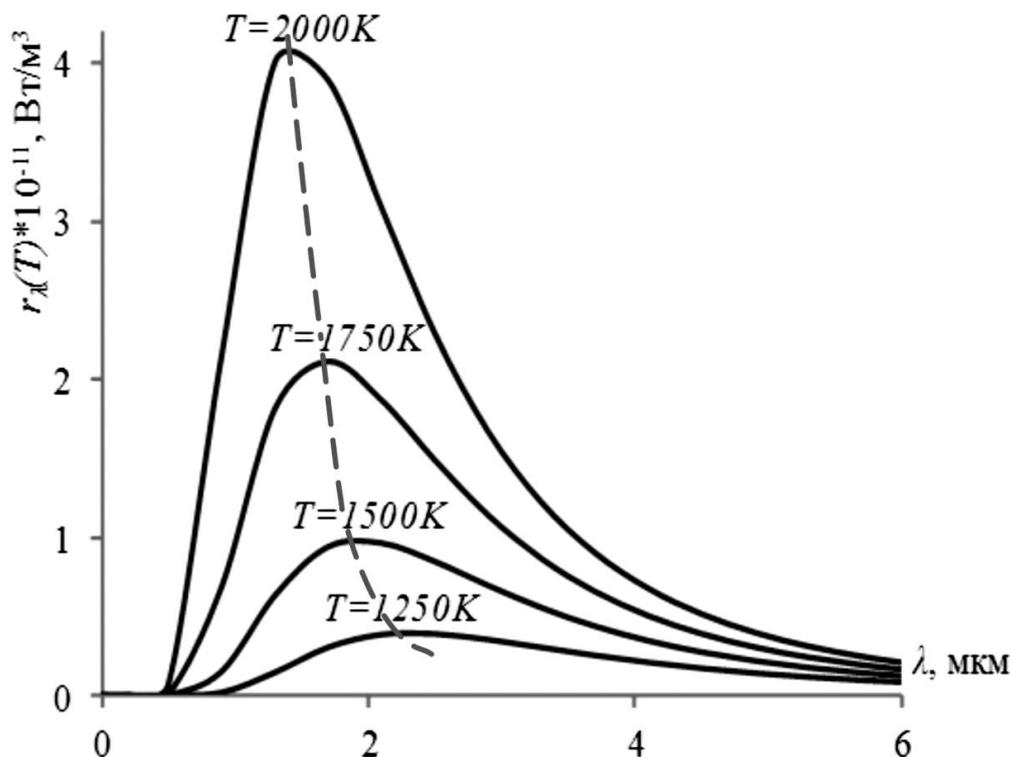


Рис. 1.9. Спектральное распределение $r_\lambda(T)$ излучения абсолютно черного тела при различных температурах T

Формула Планка (1.9) хорошо описывает спектральное распределение излучения черного тела при любых частотах. Она прекрасно согласуется с экспериментальными данными. По величине излучательной способности тел r_λ , регистрируемой дистанционным датчиком, для какой-либо определенной длины волны можно определить яркостную температуру тела $T_r(\lambda)$, К:

$$T_r(\lambda) = \frac{C_2 k_\lambda}{\ln \left(1 + \frac{C_1 k_\lambda^5}{r_\lambda} \right)}, \quad (1.10)$$

где k_λ – центральное волновое число, обратно пропорциональное длине волны выбранного канала, м^{-1} ; $C_1 = 2\pi c_0^2 h = 3,742 \cdot 10^{-16} \text{ Вт} \cdot \text{м}^2$;

$$C_2 = \frac{hc_0}{k} = 1,439 \cdot 10^{-2} \text{ м} \cdot \text{К}.$$

Яркостная температура $T_j(\lambda)$ – температура абсолютно черного тела, при которой его спектральная плотность энергетической яркости для какой-либо определенной длины волны равна спектральной плотности энергетической яркости данного тела для той же длины волны.

Реальные тела не являются идеальными излучателями, поэтому все существующие в природе тела называют нечерными. Излучение нечерных тел зависит от их физических свойств и определяется поглощательной способностью тел, всегда меньшей, чем у черного тела.

При этом тело, у которого поглощательная способность меньше единицы и одинакова по всему диапазону длин волн, называют *серым телом*. Реальное тело всегда отражает часть энергии падающего на него излучения и, как показывает опыт, поглощает излучение различных частот по-разному (рис. 1.10).

Например, сажа приближается по свойствам к абсолютно черному телу только в оптическом диапазоне. Серых тел, так же как и черных, в природе не существует, так как в широкой области спектра ни одно из известных тел не обладает постоянной поглощательной способностью по всему спектру. Однако в сравнительно узких интервалах длин волн многие тела с достаточной степенью точности можно рассматривать как серые.

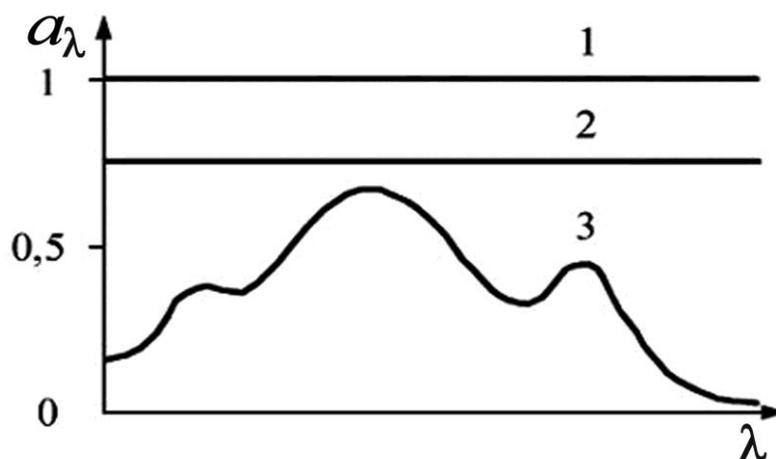


Рис. 1.10. График зависимости поглощательной способности тела a_λ от длины электромагнитных волн:

1 – абсолютно черное тело; 2 – серое тело; 3 – реальное тело

Яркостная температура тела, определенная по формуле (1.10) всегда ниже его истинной термодинамической температу-

ры. Это связано с тем, что любое нечерное тело излучает меньше, чем абсолютно черное тело при той же температуре.

Для реального излучателя основной характеристикой является спектральный коэффициент теплового излучения ε_λ , который может быть выражен как отношение излучательной способности реального тела к излучательной способности абсолютно черного тела – идеального излучателя – при той же термодинамической температуре и той же длине волны. Спектральный коэффициент теплового излучения реального непрозрачного тела зависит от длины волны, природы тела, состояния его поверхности и температуры и изменяется от 0 до 1. Согласно закону излучения Кирхгофа, для любого тела спектральный коэффициент теплового излучения ε_λ равен его монохроматическому коэффициенту поглощения a_λ при заданной температуре T и длине волны λ . Ближе всего к 1 коэффициент теплового излучения ε_λ в тепловом ИК-диапазоне у воды и облаков (0,980–0,990). Сложнее дело обстоит с поверхностью суши. Здесь влияет характер поверхности (гладкая или нет), увлажненность и т. д. Для свежего снега $\varepsilon = 0,986$, для густой травы и хвойного леса – 0,970, глинистой почвы – 0,980.

Для достаточно точного, с погрешностью не более 0,2–0,5 К, определения температуры поверхности из космоса необходимо учитывать как коэффициент теплового излучения, так и поглощение в атмосфере. При обработке данных инфракрасной радиометрии нашли применение методики, основанные на получении эмпирических соотношений, связывающих измеряемое со спутника излучение с фактической температурой поверхности, определяемой контактными методами и используемой в качестве калибровочных значений.

Наибольшее применение получили двухканальные измерения, которые проводят двумя методами – спектральный метод и угловым методом. На основании двухканальных измерений величина атмосферной коррекции может быть оценена по данным, полученным в двух инфракрасных диапазонах, характеризующихся различными величинами поглощения водяным паром.

Ниже в качестве примера приведены серии карт температуры поверхности воды (рис. 1.11) и суши (рис. 1.12), полученные путем обработки спутниковых данных радиометра AVHRR.

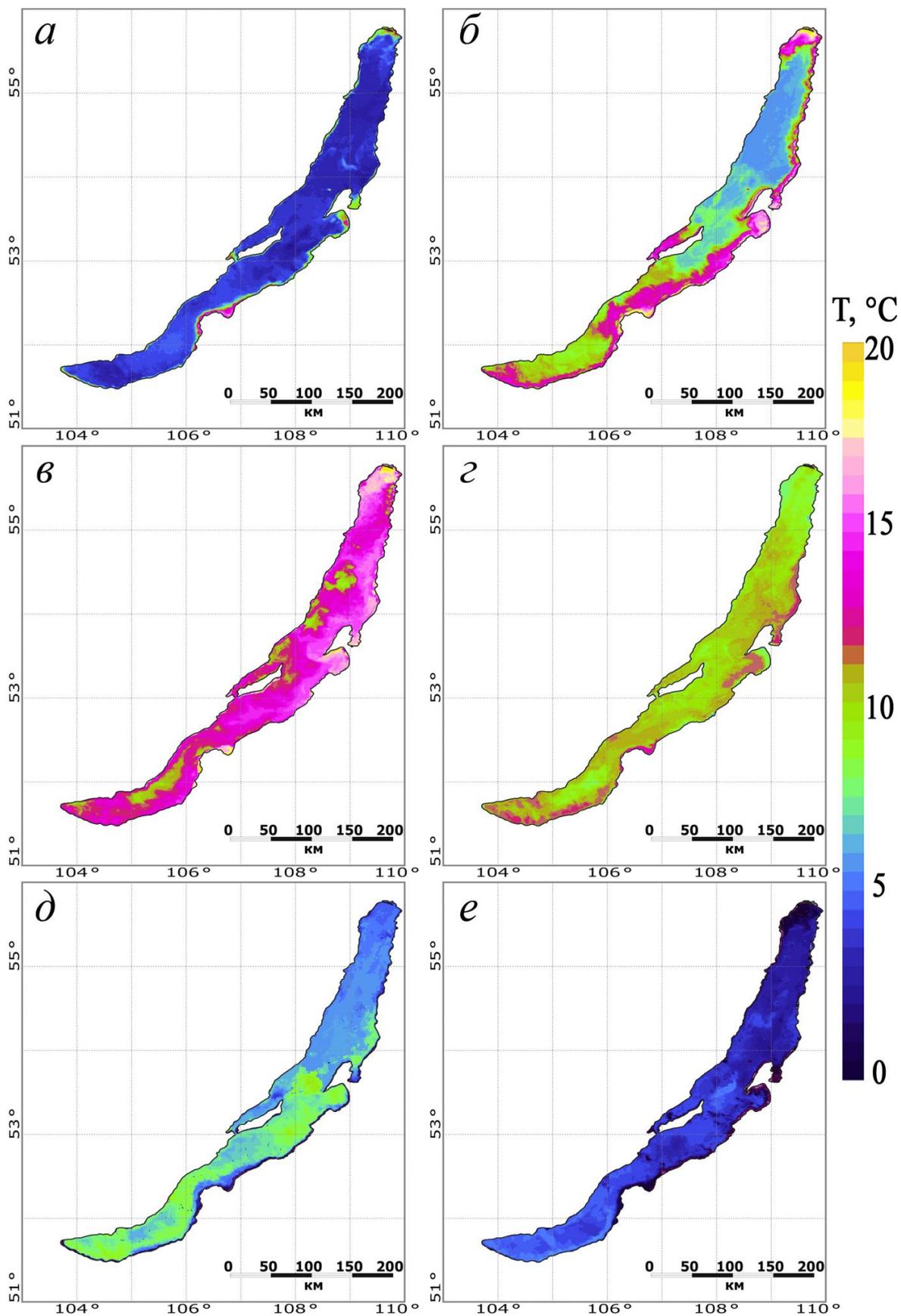


Рис. 1.11. Карты распределения температуры воды в пределах акватории оз. Байкал в 2010 г.:
 а – 12 июня, б – 18 июля, в – 23 августа, г – 26 сентября,
 д – 18 октября, е – 7 ноября

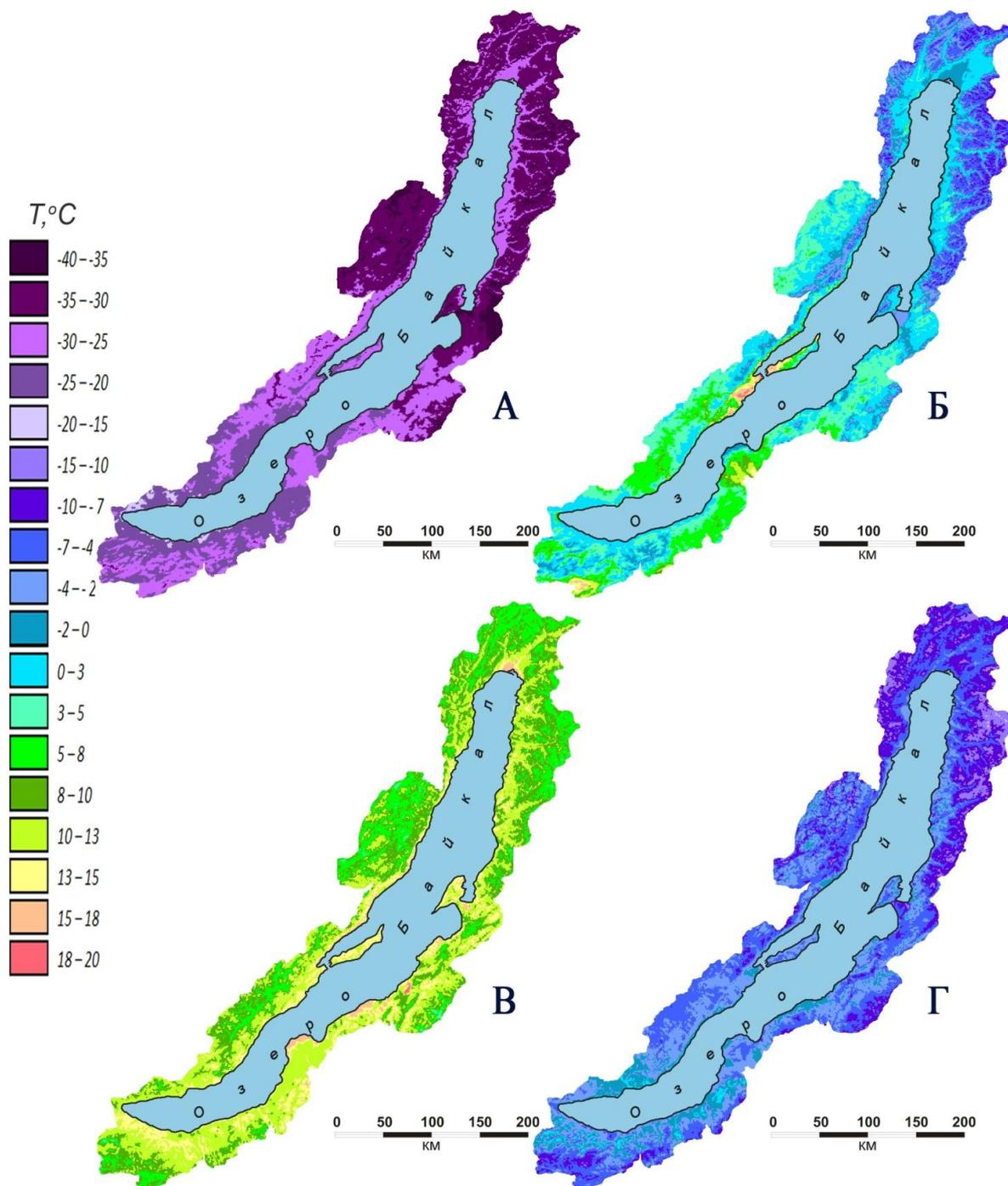


Рис. 1.12. Распределение температуры поверхности суши в пределах центральной экологической зоны Байкальской природной территории в 2007 г.: А – 14 января, Б – 7 апреля, В – 10 августа, Г – 22 ноября

Двухканальные методы атмосферной коррекции, использующие информацию о величине яркостной температуры, полученной в каналах, лежащих в пределах одного «окна прозрачности атмосферы», получили название методов «расщепленного окна прозрачности». Их название определяется тем, что эти каналы приходятся на одно «окно прозрачности» атмосферы 10,5–12,5 мкм, но характеризуются различным поглощением.

В более ранних методах двухканальной коррекции применяется линейная многоспектральная коррекция. В общем виде алгоритм определения температуры поверхности T_s записывается следующим образом:

$$T_s = T_{\lambda_1} + \gamma T_{\lambda_1} - T_{\lambda_2} + s, \quad (1.11)$$

где T_{λ_1} и T_{λ_2} – яркостные температуры, полученные в каналах λ_1 и λ_2 , которые лежат в пределах одного «окна прозрачности атмосферы», К; γ – коэффициент «избирательного поглощения», s – постоянная, К. Коэффициент «избирательного поглощения» γ в «окне прозрачности» слабо зависит от состояния атмосферы, и для конкретных наборов длин волн γ может быть принят с некоторым приближением постоянной величиной.

2. ОБЗОР СИСТЕМ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ

2.1. Общие сведения

Дистанционные приборы обеспечивают измерение характеристик удаленных объектов, поэтому они должны быть размещены на устойчивой платформе, удаленной от изучаемого объекта или наблюдаемой поверхности. Платформы для дистанционных приборов могут быть расположены на Земле, на самолете, на космическом корабле или на спутнике вне пределов атмосферы Земли. Спутники имеют несколько уникальных характеристик, которые делают их особенно полезными для дистанционного зондирования поверхности Земли.

Целый ряд спутников, оснащенных приборами дистанционного зондирования, выведен на орбиту специально для получения разносторонней геофизической информации. Съёмки ведут в ультрафиолетовом (УФ), видимом и ближнем ИК, среднем ИК, тепловом ИК и радиоволновом диапазонах спектра.

В **УФ**-области – в отличие от видимого и ИК-диапазонов – очень низкая интенсивность излучения. Участок ультрафиолета 0,1–0,2 мкм – это область спектра, которая полностью поглощается молекулярным кислородом атмосферы и не проходит ниже 60 км к поверхности Земли. УФ-излучение в диапазоне от 0,2 до 0,4 мкм опускается до озонового слоя (высота от 15 до 25 км), который защищает все живое на Земле от губительного воздействия УФ-лучей, и только малая часть длинноволнового УФ все же достигает поверхности Земли, поэтому УФ-сенсоры на космическом аппарате должны усиливать яркость изображения не меньше, чем в 100 раз, т. е. фактически дойти до физического предела, когда с квадратного сантиметра регистрируемого объекта излучается всего несколько фотонов. УФ-диапазон еще только осваивается для мониторинга верхних слоев атмосферы и самой Земли. С 2006 г. испытания таких сенсоров проходят на МКС. В УФ-диапазоне можно увидеть заражение почв и сельскохозяйственных культур, состояние урожая и при узких спектральных каналах можно определить само загрязняющее вещество.

Дистанционное зондирование в *видимом* и *ближнем ИК*-диапазонах основано на регистрации солнечного излучения, отраженного объектами в соответствии с их спектральной отражательной способностью. На снимках отображаются оптические характеристики объектов – их спектральная яркость. Для съемки необходимо освещение, а облачность в этом случае мешает съемке. Такую съемку с помощью оптических камер и сканеров в различное время осуществляли или осуществляют в настоящее время: из российских – многозональные сканеры МСУ-М, МСУ-СК и МСУ-Э на спутниках «Ресурс-О», «Метеор» и «Океан»; из зарубежных – сканеры AVHRR спутников NOAA, Landsat и мн. др., а также специально созданные для изучения цвета океана системы CZCS (Coastal Zone Color Scanner) спутников Nimbus и SeaWiFS (Seaviewing Wide Field Sensor – сканер цвета моря) спутника SeaStar.

Зондирование в *тепловом инфракрасном* диапазоне для определения температуры подстилающей поверхности основано на измерении собственного теплового излучения поверхности. Съемка в этом диапазоне не зависит от освещения, может выполняться ночью, но облачность и здесь является помехой. Наиболее известен сканирующий радиометр AVHRR (Advanced Very High Resolution Radiometer), расположенный на борту спутников серии NOAA. Данные этого прибора получили повсеместное признание и используются во всем мире. Другой известный аналог – радиометр серии ATSR (Along Track Scanning Radiometer), установленный на европейских спутниках ERS и Envisat. Особенно значимой оказалась съемка со спутника Terra (EO-AMX) по американской программе глобальных наблюдений Земли EOS. 36-канальная съемочная система MODIS дает обзорные снимки в 10 тепловых каналах с разрешением 1 км, а 14-канальная система ASTER – более детальные снимки в 6 тепловых каналах с разрешением 90 м. Хорошее информирование о поступающих материалах съемки, возможность свободного доступа к ним по сети Интернет обеспечили широкое использование данных тепловой ИК-съемки и их значимое место в мировом фонде космических снимков.

При съемке в *радиодиапазоне* радиоволны, почти не поглощаясь, свободно проходят через облачность и туман, съемку ведут при любой погоде и в любое время суток. На снимках хо-

рошо видны рельеф и шероховатость поверхности, ее влажность, иногда – подповерхностные структуры. Пассивное зондирование в СВЧ-диапазоне (поддиапазоне радиоизлучения) основано на регистрации собственного излучения поверхности, активное (радиолокация) зондирование – на излучении со спутника и приеме отраженного поверхностью радиосигнала. Среди данных пассивных СВЧ-радиометров накоплены значительные массивы данных радиометров SSMR спутников Nimbus и SSM/I, спутников DMSP. С помощью пассивных радиометров можно получить информацию о температуре подстилающей поверхности, сплоченности и толщине льда, а также влагозапасе облаков, интенсивности осадков, скорости ветра.

Основным средством активного зондирования стали радиолокаторы бокового обзора с реальной антенной (РЛСБО) и антенной с синтезированной апертурой (РСА или SAR). Среди иностранных приборов наиболее известен радиолокатор SAR на спутниках Seasat, ERS-1, ERS-2, Radarsat и Envisat, среди российских – РЛСБО на спутниках серии «Океан» и РСА – на спутнике «Алмаз». На принципе активной локации работают также радиоальтиметры (для измерения уровня океана и высоты волн) спутников Topex/Poseidon, Jason и др., и скаттерометры (для измерения поля приповерхностного ветра) NSCAT, QuikScat и др. Большинство перечисленных датчиков уже продолжительное время используются для глобального мониторинга Мирового океана, позволяют определять различные поля и явления Мирового океана.

2.2. Основные технологии получения снимков

При съемке в разных спектральных диапазонах используют различные технологии и получают снимки разных типов.

Фотографические снимки – это результат покадровой регистрации на фотопленку солнечного излучения, отраженного земными объектами. Аэрофотоснимки получают с самолетов и вертолетов, космические снимки – со спутников, космических кораблей и орбитальных станций, подводные – фотокамерами, опускаемыми на глубину, а наземные – с помощью фототеодолитов.

В зависимости от типа применяемой аппаратуры и фотопленок фотографирование может производиться во всем видимом диапазоне электромагнитного спектра, в отдельных его зо-

нах, а также в ближнем ИК (инфракрасном) диапазоне (до 0,86 мкм). Масштабы съемки зависят от высоты фотографирования и фокусного расстояния аппарата. Космические фотоаппараты в зависимости от наклона оптической оси позволяют получать плановые и перспективные снимки земной поверхности.

Для удобства пользования из отдельных космических снимков, имеющих перекрытия, монтируются фотосхемы (фотомозаики) или фотокарты с топографической привязкой опорных точек с точностью 0,1 мм и точнее. Для монтажа фотосхем используются только плановые космические снимки. Для приведения разномасштабного, обычно перспективного, космического снимка к плановому используется специальный процесс, называемый *трансформированием*. Трансформированные космические снимки также используются для составления космофотосхем и космофотокарт и обычно легко привязываются к географической сетке координат.

Космические фотоснимки отличаются хорошими геометрическими свойствами и высоким качеством изображения. Разрешение снимков, доступных гражданскому пользователю, составляет до 2 м (с разведывательных спутников получают снимки с разрешением до 0,2 м), что достаточно для создания топографических карт масштаба 1 : 50 000 с точностью 10 м по высоте и 15 м в плане. Недостаток этого вида съемки – необходимость доставки отснятой пленки на Землю для обработки.

Телевизионные съемки в видимом участке спектра впервые были получены с метеорологических искусственных спутников Земли (ИСЗ), которые в начале 60-х гг. обладали сравнительно невысоким пространственным разрешением. Подобные изображения использовались в основном для самого общего географического изучения Земли, но по мере совершенствования качества телевизионных изображений росло и использование их самими различными специалистами в разных областях знаний. Съемка производится с помощью телевизионных камер различными видиконами, что обеспечивает получение изображений с разрешением от 0,3 до 3 км и шириной полосы захвата на местности от 180 до 1800 км.

Благодаря глобальному покрытию и высокой частоте получения телевизионные снимки нашли применение при обновлении обзорных мелкомасштабных тематических карт, при про-

слеживании геологических, географических и океанических структур высоких уровней генерализации. Крупные природные образования протяженностью свыше 100–200 км (тектонические линейные элементы, типы географических ландшафтов, течения в океанах и др.) были прослежены по телевизионным снимкам. Однако наиболее перспективными они оказались для обнаружения, определения размеров, оценки интенсивности, прогнозирования развития различных природных процессов, таких как движение морских льдов, сход и становление снежного покрова, изменение влажности почв и сезонные изменения водности замкнутых бассейнов. Большое значение ТВ-изображения получили при изучении пространственно-временных природных процессов, которые носили катастрофический характер, таких как пыльные бури, извержения вулканов, лесные и торфяные пожары.

Основной объем информации дают *сканерные снимки* – результат поэлементной и построчной регистрации излучения объектов земной поверхности и передачи информации по радиоканалам. В ходе *линейной сканерной съемки* (рис. 2.1, А) с самолета или спутника сканирующее устройство (качающееся или вращающееся зеркало) последовательно, полоса за полосой, просматривает местность *поперек* направления движения носителя и посылает лучистый поток на фотоэлектрический приемник, который затем преобразуется в электрический сигнал, далее по каналу связи передается на наземное приемное устройство в цифровой форме и записывается в виде изображения.

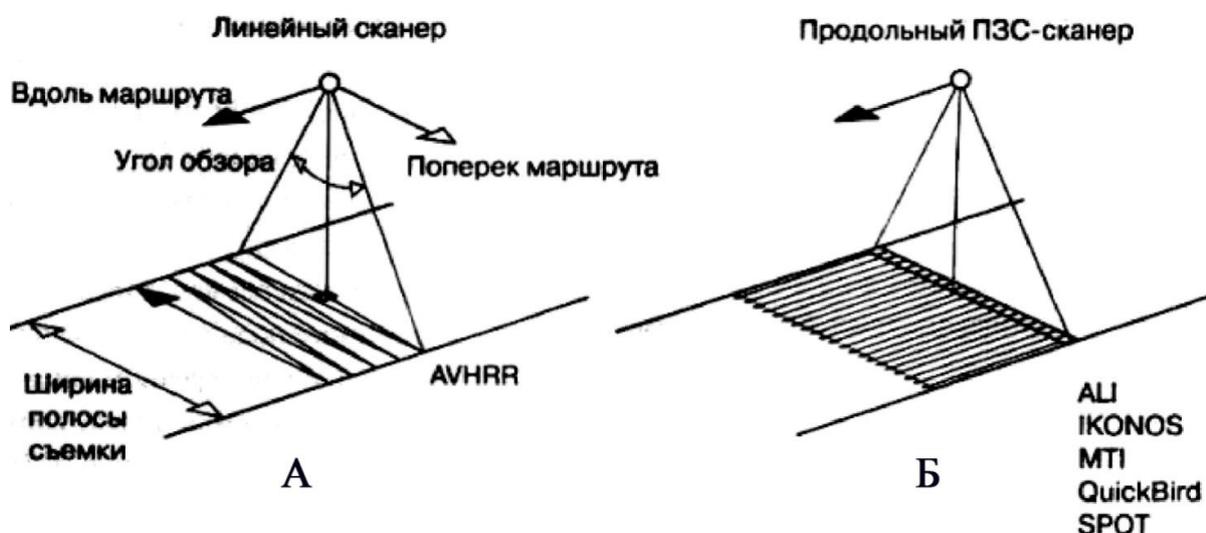


Рис. 2.1. Различные методы сканирования поверхности Земли

В результате получают снимки со строчной структурой. Накопление строк происходит за счет движения спутника или другого носителя вдоль своей траектории. Причем строки состоят из небольших элементов – пикселей, т. е. элементарных ячеек сканерного изображения. Каждый пиксель отражает интегральную яркость участка местности, соответствующего мгновенному угловому полю зрения сканера; детали внутри этого участка неразличимы.

Важнейшей характеристикой сканера являются угол сканирования (обзора) и мгновенный угол зрения, от величины которого зависят ширина снимаемой полосы и разрешение. В зависимости от величины этих углов сканеры делят на точные и обзорные. У точных сканеров угол сканирования уменьшают до 5° , а у обзорных увеличивают до 50° . Величина разрешения при этом обратно пропорциональна ширине снимаемой полосы.

В полете съемку ведут постоянно, сканируя широкую непрерывную полосу местности. В целом качество сканерных изображений уступает фотоснимкам, но оперативность и цифровая форма передачи в реальном режиме времени дают этому методу неопределимые преимущества.

ПЗС-снимки. Кроме механического сканирования в 1980-х гг. начали использовать новый вариант сканирования, когда приемником излучения служит линейка, состоящая из множества миниатюрных (размером в несколько мкм) приемников излучения на основе приборов с зарядовой связью (ПЗС). Это дает изображение *сразу целой строки*, а движение носителя аппаратуры – накопление строк (см. рис. 2.1, Б). Отсутствие подвижных элементов конструкции поперечных ПЗС-сканеров обеспечивает хорошие геометрические качества изображения, а малые размеры приемников – получение изображения очень высокого разрешения (менее 1 м).

Обычно под сканерными снимками имеют в виду снимки в видимом и ИК-диапазонах, но принцип сканирования применяется и при съемке в других диапазонах спектра.

Тепловые инфракрасные радиометрические снимки (или тепловые снимки) получают в результате съемки в тепловом ИК-диапазоне. ИК-радиометры механически сканируют собственное тепловое излучение Земли. Снимки имеют не очень высокое разрешение, в лучшем случае десятки метров. Освоение

инфракрасного (ИК) диапазона (0,78–15,0 мкм) для получения изображений также началось на метеорологических ИСЗ с августа 1964 г. Однако вначале, вследствие низкого пространственного разрешения они не нашли должного применения. С развитием специальных многоспектральных сканирующих систем ИК-изображения стали затем достаточно широко использоваться во многих отраслях производства и науки. Тепловая ИК-съемка может применяться при поисках подземных вод, выявлении элементов тектоники, прямых поисках залежей нефти, решения экологических задач. ИК-съемка в «окне прозрачности» 8–12 мкм предназначена для исследования облачности и собственного теплового излучения Земли, а по ИК-материалам в «окне прозрачности» 3,4–4,2 мкм могут идентифицироваться, например, следы перестройки речной сети, древние русла рек, разновозрастные террасы, разнотипные горные породы, тектонические нарушения, различия в увлажнении почв и растительном покрове, проявления вулканической деятельности, океанические течения и разнотипные водные массы. Основными достоинствами инфракрасной радиометрии температуры поверхности являются высокая радиометрическая чувствительность (именно на этот диапазон приходится максимум интенсивности излучения в диапазоне температур 0–30 °С), незначительные вариации излучательной способности, вызванные состоянием поверхности воды, хорошее пространственное разрешение, достигнутое в оперативных спутниковых системах (до 10 м). Основной проблемой количественной интерпретации данных дистанционного зондирования, полученных в инфракрасном диапазоне, является атмосферная коррекция.

Микроволновые радиометрические снимки (0,3–10 см) получают в коротковолновом (СВЧ – сверхвысокочастотном) радиодиапазоне также с использованием принципа механического сканирования. Приемниками излучения служат антенны, разрешение снимков ограничено несколькими километрами. В этом диапазоне спектра атмосфера очень слабо влияет на интенсивность восходящего излучения и облака практически «прозрачны» для него.

Недостатки микроволновой радиометрии заключаются прежде всего в том, что излучательная способность сильно зависит от состояния поверхности (прежде всего от степени ше-

роховатости). Серьезной помехой для повышения точности оценок температуры поверхности воды по микроволновым данным является низкая флуктуационная чувствительность микроволновых радиометров, что требует значительно увеличивать время интегрирования сигнала и приводит к значительному увеличению размера элемента разрешения.

Радиолокационные снимки получают при активном методе съемки, когда антенна съемочной системы генерирует радиоизлучение, оно отражается поверхностью и улавливается регистрирующей аппаратурой. Отражение сигнала зависит от рельефа поверхности, ее шероховатости, структуры и состава слагающих пород, характера растительности и влажности почв. При определенных длинах радиоволн они способны проникать под поверхность и отражать, например, линзы подземных вод. Разрешение снимков зависит от размера антенны и при антенне длиной в несколько метров составляет 1–2 км. Искусственно удлиняя антенну (так называемая синтезированная апертура), выполняют съемку с разрешением порядка 20 м. На самолетах и космических носителях используют радиолокаторы бокового обзора, они ведут съемку поперек направления движения носителя. Поэтому пересеченный рельеф дает радиотени, что обеспечивает выразительное изображение. Основное достоинство радиолокационной съемки – ее всепогодность: очень удобна для исследования океана – его волнения, загрязнения. Радиолокацию применяют и при изучении планет, в частности Венеры, постоянно закрытой плотными облаками.

Принцип бокового обзора используют и для получения гидролокационных снимков с помощью аппаратуры, генерирующей и регистрирующей звуковые волны.

Среди новых видов локационных изображений следует отметить снимки, получаемые с помощью лазерных локаторов – **лидаров**. Лидары – зондирующие устройства, состоящие из импульсного источника излучения (лазера) и высокочастотного приемного устройства. Лидарная съемка является активной и основана на непрерывном получении отклика от отражающей поверхности, подсвечиваемой лазерным монохроматическим излучением с фиксированной длиной волны. Частота излучателя настраивается на резонансные частоты поглощения сканируемого компонента (например, приповерхностного метана), так что в случае его замет-

ных концентраций соотношение откликов в точках концентрирования и вне их будут резко повышенными. Фактически лидарная спектрометрия – это геохимическая съемка приповерхностных слоев атмосферы, ориентированная на обнаружение микроэлементов или их соединений, концентрирующихся над современно активными геоэкологическими объектами. Устройства лидарной съемки оборудуются на низковысотных носителях.

Особое значение имеют *многозональные снимки*, когда одна и та же территория (или акватория) одновременно фотографируется или сканируется в нескольких зонах спектра. Комбинируя зональные снимки, получают цветные синтезированные изображения, которые прекрасно отображают леса разных пород, сельскохозяйственные угодья, увлажненные территории и т. п. Материалы многозональной съемки – ценнейший источник для составления тематических карт.

Активно развивается еще один вид съемки – *гиперспектральной*, когда излучение регистрируется в большом числе узких (до 10 нм) спектральных зон – от нескольких десятков до нескольких сотен. Это позволяет определять даже минералогический состав горных пород, расширяет возможности исследования атмосферы и океана, их загрязнения. Материалы гиперспектральной съемки особенно ценны для экологического мониторинга и картографирования.

2.3. Разрешающая способность систем дистанционного зондирования

Разрешающая способность как аналоговых, так и цифровых систем дистанционного зондирования определяется следующими параметрами:

- 1) спектральным разрешением,
- 2) радиометрическим разрешением,
- 3) временным разрешением,
- 4) пространственным разрешением.

Понимание этих характеристик чрезвычайно важно для правильного использования данных дистанционного зондирования.

Спектральное разрешение

Спектральное разрешение дает характеристику способности системы дистанционного зондирования различать определенные

интервалы длин волн. Чем выше спектральное разрешение, тем более узкий диапазон длин волн регистрируется определенным каналом. При оценке спектрального разрешения рассматривают две характеристики: количество диапазонов (каналов) и ширину каждого диапазона. Более высокого спектрального разрешения добиваются за счет увеличения количества диапазонов и уменьшения ширины каждого из них. На практике важно правильно подобрать характеристики спектрального разрешения так, чтобы они соответствовали типу собираемой информации.

Спектральное разрешение *панхроматического* снимка, содержащего только один канал, является крайне низким, поскольку на нем невозможно выделить сигналы с различной длиной волны, и полученное изображение характеризует отражательную способность объекта во всем видимом диапазоне. Более высокое спектральное разрешение цветных снимков объясняется тем, что цветная пленка обладает независимой чувствительностью к излучению в синем, зеленом и красном диапазонах спектра.

Системы дистанционного зондирования, регистрирующие излучение в нескольких независимых спектральных диапазонах, также могут отличаться своей спектральной разрешающей способностью.

Многоспектральный снимок содержит несколько каналов цветовой информации. Каждый пиксель изображения описывается при помощи матрицы (вектора) значений. Это один из самых информативных и перспективных видов съемок, когда одновременно, но раздельно фиксируются несколько изображений в различных участках спектра. Их может быть – 3, 4, 5, 7 и больше.

Гиперспектральные снимки имеют высокое спектральное разрешение и дают больше информации об объекте, чем наше зрение. Такие съемки позволяют изучать спектры отражения объектов местности столь детально, что можно определить типы и даже конкретные виды растительности, горные породы и почвы, определить состав пленки загрязнений на поверхности воды, материал, из которого выполнено дорожное покрытие.

Радиометрическое разрешение

Радиометрическое разрешение определяется чувствительностью сенсора к вариациям интенсивности электромагнитного излучения, т. е. наименьшей разницей в уровнях энергии излучения, которую можно зарегистрировать с помощью данной аппаратуры. Эта характеристика указывает на действительное ко-

личество полезной информации, содержащейся в изображении. Она применима как к обычным фотографическим, так и к цифровым снимкам. В первом случае радиометрическое разрешение определяется возможностью определения малейших вариаций оттенков серого цвета, а во втором – динамическим диапазоном датчика и числом уровней дискретизации (числом бит), соответствующих переходу от яркости абсолютно черного к абсолютно белому. Например, 8-битное радиометрическое разрешение позволяет хранить 256 градаций яркости в каждом канале, 9-битное – 512 градаций, 10-битное – 1024 градаций, 11-битное – 2048 градаций и т. д. Чем выше радиометрическое разрешение сенсора, тем он более чувствителен к обнаружению небольших различий в отражаемой или излучаемой энергии.

Временное разрешение

Временное разрешение определяется периодичностью сбора данных. Например, для изучения какого-то природного явления данные могут собираться ежедневно, раз в месяц, раз в три месяца или раз в год. Получение снимков одних и тех же участков земной поверхности с определенной периодичностью является одной из основных областей применения дистанционного зондирования. При этом от частоты съемки зависит возможность обнаружения тех или иных изменений, которые происходят на изучаемой территории.

Абсолютная временная разрешающая способность системы дистанционного зондирования определяется периодом обращения спутника вокруг Земли, при котором возможна повторная съемка участка земной поверхности под тем же углом обзора. Этот период может составлять несколько суток. Сравнивая снимки объекта, полученные в разное время, можно наблюдать изменения его характеристик.

Пространственное разрешение

Пространственная разрешающая способность является одной из важнейших характеристик систем дистанционного зондирования, которая характеризует способность сенсора различать детали в пространственных данных. Пространственное разрешение определяется размером наименьшего объекта, который поддается идентификации. Пространственное разрешение является аналогом резкости обычного фотоснимка. Факторами, которые влияют на пространственное разрешение, являются: вы-

сота расположения платформы, размер элементов сенсора и фокусное расстояние оптической системы.

Таким образом, разрешающая способность сенсора определяется площадкой на поверхности Земли, соответствующей одной элементарной ячейке сенсора. Снимки по пространственному разрешению, определяемому размером наименьшего элемента земной поверхности, отображаемого на нем, дифференцируются на следующие категории:

- 1) очень низкого разрешения – более 10 км,
- 2) низкого – 1–10 км,
- 3) среднего – 100–999 м,
- 4) относительно высокого – 50–99 м,
- 5) высокого – 20–49 м,
- 6) очень высокого – 1–19 м,
- 7) сверхвысокого разрешения – до 1 м.

На снимках низкого пространственного разрешения видны только крупные объекты. На снимках высокого разрешения можно различить мелкие детали объектов.

Понятие пикселя

Снимки, получаемые методами дистанционного зондирования, являются растровыми. Они представляют собой матрицу элементов, которые называются пикселями. Каждый пиксель на снимке соответствует наименьшему элементу земной поверхности, который может быть разрешен. В отличие от пространственного разрешения, которое характеризует сенсор съемочной системы, понятие «пиксель» относится к изображению, которое формируется этим сенсором. Например, если пространственное разрешение сенсора равно 10 м, то каждому пикселю будет соответствовать участок поверхности размером 10x10 м.

Пиксели можно подразделить на «чистые» и «смешанные». «Чистый» пиксель содержит только однородную информацию. Если в пикселе содержится разнородная информация, его называют «смешанным». Числовое значение «чистого» пикселя характеризует усредненную яркость частей объекта определенного класса. Числовое значение «смешанного» пикселя – это усреднение спектральных откликов объектов разного типа. Количество «смешанных» пикселей возрастает по мере снижения пространственного разрешения. Вместе с тем повышение пространственного разрешения за счет увеличения числа пикселей приводит к повышению стоимости цифровых снимков.

2.4. Характеристика орбит спутников

Траектория движения искусственного спутника Земли называется его орбитой. Тип орбиты зависит от ее высоты и ориентации относительно поверхности Земли, а также от направления движения спутника по орбите. По параметрам орбиты выделяют два основных типа спутников: *геостационарные* и *полярно-орбитальные*. Каждая орбита обладает своими преимуществами и недостатками.

Полярные орбиты существенно ниже, чем геостационарные, поэтому приборы, размещаемые на полярно-орбитальных носителях, как правило, обеспечивают лучшее пространственное разрешение.

Геостационарные спутники постоянно обеспечивают обзор одной и той же части планеты, сохраняя неизменное положение относительно определенной точки на экваторе, соответственно, зона обзора со спутника на геостационарной орбите ограничивается широтным районом 50° с. ш. – 50° ю. ш. Полярно-орбитальные спутники, находясь на орбите, плоскость которой примерно перпендикулярна плоскости вращения Земли, через определенный период времени оказываются над заданным районом наблюдения. При этом полярно-орбитальная система наблюдения сталкивается с трудностью другого рода: спутник может оказаться над одним и тем же районом съемки в различные периоды «местного», или солнечного времени. При этом сопоставление данных, полученных при различных условиях солнечного освещения, оказывается весьма затруднительным, поэтому такие спутники, как правило, выводят на так называемые солнечно-синхронные орбиты.

Другой недостаток полярных орбит заключается в том, что для отслеживания положения спутника, движущегося по полярной орбите, антенну нужно обязательно подстраивать для получения спутникового сигнала, что требует специального дорогостоящего оборудования.

Спутник,двигающийся по геостационарной орбите, кажется неподвижным и как будто находится постоянно в одной точке. Это очень удобно для получения спутникового сигнала, так как не нужно регулировать положение рефлекторов антенн, направляя их на уходящий спутник.

2.5. Характеристики некоторых сенсоров и платформ

Характеристика радиометра AVHRR

Радиометр AVHRR установлен на борту полярно-орбитальных метеорологических спутников серии NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration – аббревиатура Национального управления США по исследованию океана и атмосферы) (рис. 2.2).

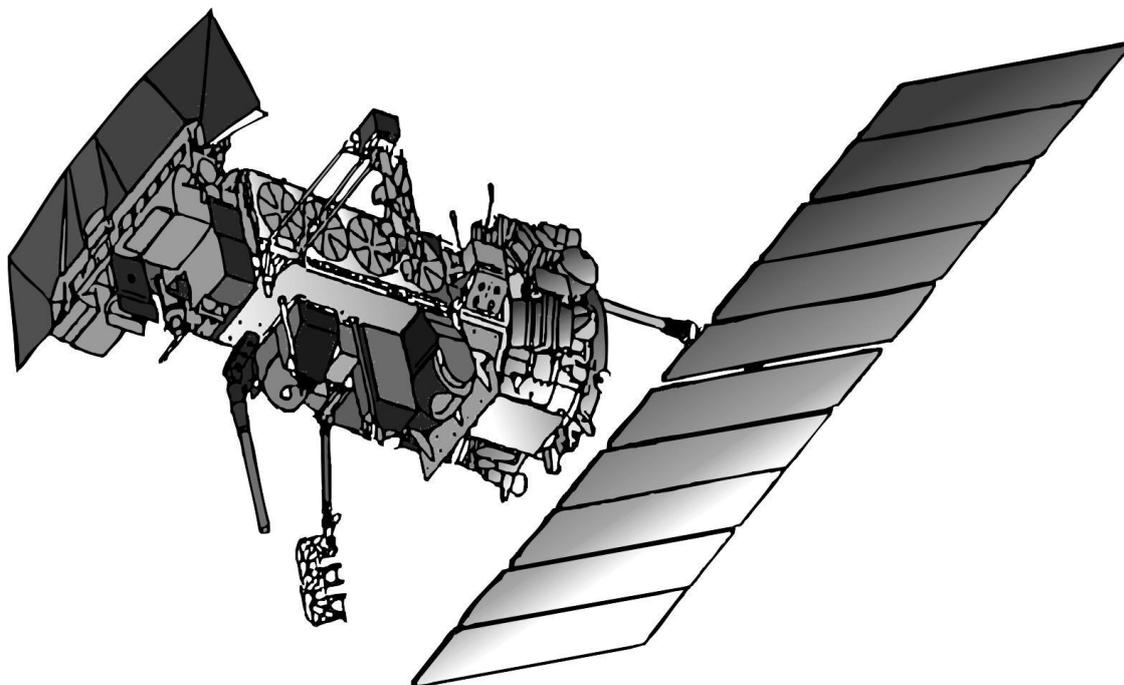


Рис. 2.2. Метеорологические спутники серии NOAA

Спутники серии NOAA летают с начала 70-х гг. на высоте приблизительно 850 км по синхронизированным с Солнцем орбитам. Орбитальный период составляет почти 102 мин, так что за сутки спутник совершает 14,1 оборота вокруг Земли. Наклон орбиты составляет $96,0\text{--}98,5^\circ$.

Линейный размер элемента разрешения на местности радиометра AVHRR в надире составляет около 1090 км. Полученное изображение охватывает полосу земной поверхности шириной 2600 км по трассе движения спутника.

Основным достоинством спутников серии NOAA является общедоступность информации и возможность регулярного ее получения. Каждый пользователь, имеющий соответствующие средства приема и обработки, может получать данные непосредственно с этих спутников и проводить самостоятельно весь необходимый ему анализ.

Продолжительный опыт эксплуатации данного прибора показал, что эта система является одной из самых удачных для изучения как морей и океанов, так и внутренних водоемов. Прибор AVHRR позволяет принимать сигнал в окне прозрачности атмосферы 10–12 мкм, что дает возможность оценивать температуру подстилающей поверхности. Одновременно прибор позволяет принимать сигнал в видимой и в ближней инфракрасной областях спектра.

Радиометр AVHRR представляет собой типичный сканер и измеряет собственное и отраженное Землей излучение в пяти спектральных диапазонах: 0,58–0,68 мкм; 0,725–1,0 мкм; 1,58–1,64 мкм – в дневное время; 3,55–3,93 мкм – в ночное время; 10,3–11,3 мкм; 11,4–12,4 мкм с радиометрическим разрешением в 10 бит. При этом собственное и отраженное Землей излучение собирается телескопической системой и направляется на качающееся сканирующее зеркало. Отраженное от сканирующего зеркала излучение попадает на систему фильтров. Эта система обеспечивает разделение излучения на спектральные диапазоны. После этого излучение регистрируется с помощью системы детекторов. Из многозональных изображений можно получать цветные изображения, которые называют синтезированными. Примеры изображений, полученных после разделения излучения на каналы, приведены на рис. 2.3. Из многозональных изображений можно получать цветные изображения, которые называют синтезированными.

Изображения со спутников NOAA передаются на Землю в реальном масштабе времени в диапазоне 1,7 ГГц в режиме HRPT (High Resolution Picture Transmission). Возможность свободного приема спутниковой информации наземными станциями обеспечивается Всемирной метеорологической организацией согласно концепции открытого неба.

На наземных станциях приема спутниковой информации производится прием, демодуляция, первичная обработка и подготовка спутниковых данных к вводу в персональный компьютер станции.

На территории России в последнее десятилетие активно развивается сеть станций приема спутниковых данных, образующая наземную инфраструктуру регионального мониторинга состояния окружающей среды.

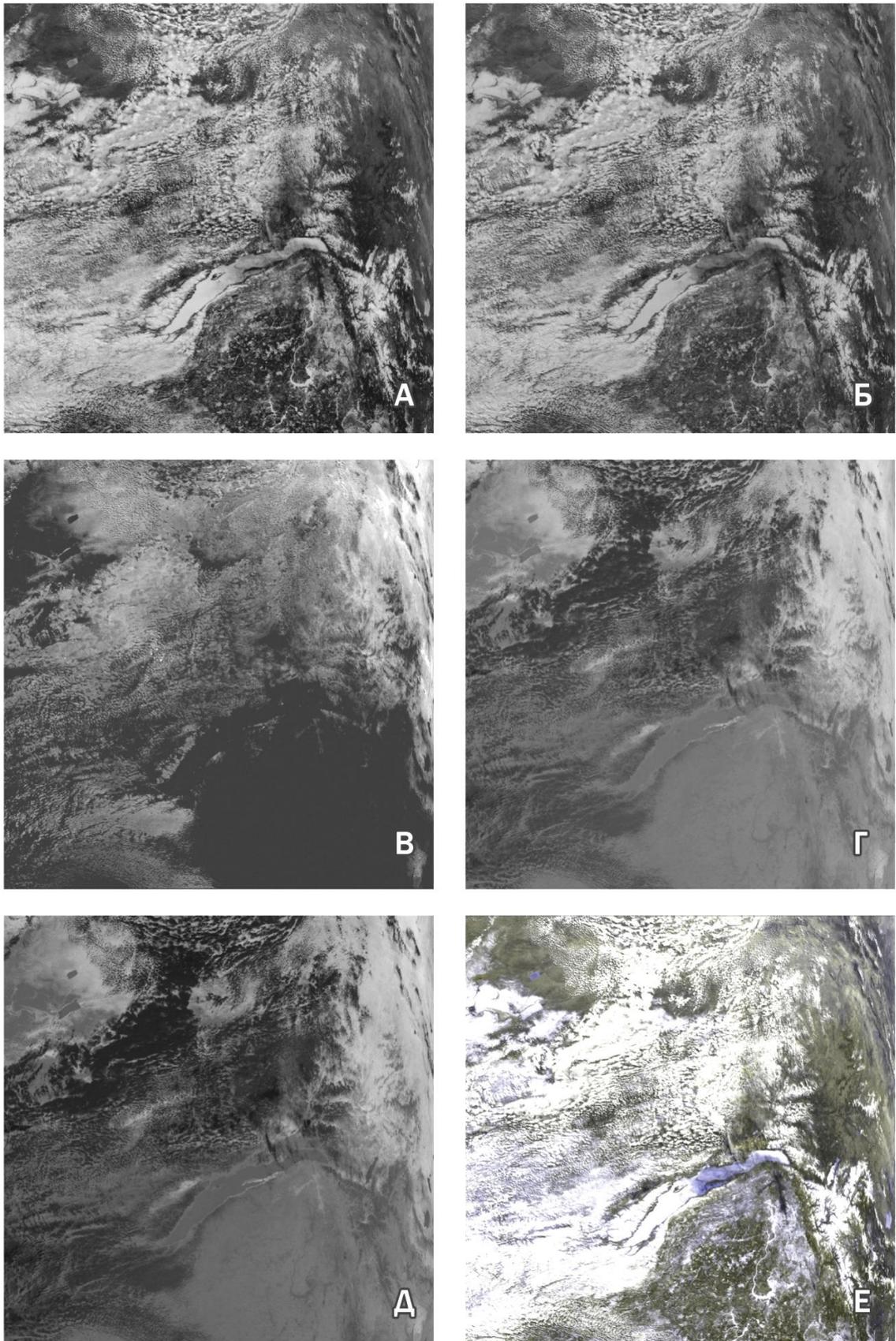


Рис. 2.3. Изображения видимых и инфракрасных каналов AVHRR
 Видимый диапазон: А – 1-й канал; ближний инфракрасный диапазон:
 Б – 2-й канал; тепловой инфракрасный диапазон: В – 3-й канал,
 Г – 4-й канал, Д – 5-й канал; Е – цветосинтезированное изображение
 в палитре RGB (R – 2-й канал, G – 2-й канал, B – 1-й канал)

В оперативном режиме непрерывных наблюдений работают наземные станции приема данных от спутников NOAA в Москве (Институт космических исследований РАН, ВНИИГОЧС МЧС), Красноярске (Институт леса СО РАН), Иркутске (Институт солнечно-земной физики СО РАН; Иркутская база авиационной охраны лесов), Салехарде (Госкомитет по охране окружающей среды Ямало-Ненецкого автономного округа), Владивостоке (Институт автоматизации и процессов управления ДВО РАН). Типовые станции приема сигналов от спутников NOAA состоят из антенной системы, приемника и персонального компьютера для первичной обработки принимаемых данных. Существующее программное обеспечение позволяет осуществить полный цикл работ от расчета траекторий спутников и приема и организации хранения данных до тематической обработки спутниковых данных в пределах нескольких часов после момента приема.

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

Спутники GOES

Спутники GOES (*Geostationary Operational Environmental Satellite*) были разработаны НАСА (Национальным управлением США по авиации и исследованию космического пространства) специально для Национального управления США по исследованию океана и атмосферы для того, чтобы обеспечить частую мелкомасштабную съемку земной поверхности и облачного покрова в интересах Национальной метеорологической службы США. Космические снимки GOES используются метеорологами для мониторинга и прогноза погоды вот уже более 30 лет. Эта серия является частью глобальной сети метеороло-

гических спутников, выведенных на геостационарные орбиты с интервалом по долготе примерно 70° , обеспечивая почти полный охват земной поверхности. Два спутника GOES выведены на экваториальные геостационарные орбиты высотой 36 000 км. Съёмочные системы каждого из них охватывают приблизительно треть поверхности Земли. Один спутник расположен на 75° з. д. и используется для мониторинга Северной и Южной Америки. Второй находится на 135° з. д. и служит для наблюдения за Северной Америкой и бассейном Тихого океана. С помощью двух этих спутников постоянно снимается территория от 20° з. д. до 165° в. д.

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

Спутники второго поколения оснащены двумя независимыми съёмочными системами. Первая ведёт съёмку в 5-ти спектральных диапазонах видимой и инфракрасной части спектра. Благодаря инфракрасному каналу можно получать снимки как в дневное, так и в ночное время. Возможность отклонения оси съёмки и выбора параметров сканирования позволяет получать изображения как всей Земли, так и небольшой её части. Снимки имеют 10-битное радиометрическое разрешение; их можно передавать непосредственно на наземные станции заказчиков.

Спектральные диапазоны и пространственное разрешение снимков GOES: съёмка в зоне $0,52\text{--}0,72$ мкм ведётся с разрешением 1 км; а в остальных ($3,78\text{--}4,03$ мкм; $6,47\text{--}7,02$ мкм; $10,2\text{--}11,2$ мкм; $11,5\text{--}12,5$ мкм) – с разрешением 4 км. Вторая съёмочная система спутников GOES оснащена 19 каналами для съёмки в одном диапазоне видимого спектра и 18 – в тепловых диапазонах с пространственным разрешением 8 км и радиометрическим разрешением 13 бит. Эти данные используют для наблюдения температуры земной поверхности и верхней части об-

лачного покрова, а также для оценки профилей влажности и анализа распределения озона.

Другие метеорологические спутники

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

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

Характеристика радиометра MODIS

Одним из ключевых инструментов американских спутников серии EOS (Terra EOS AM-1 (рис. 2.4) и Aqua EOS PM-1) является спектрорадиометр MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer). MODIS имеет 36 спектральных каналов с 12-битным радиометрическим разрешением в видимом, ближнем, среднем и дальнем инфракрасном диапазонах и позволяет производить регулярную съемку территории.

MODIS состоит из двух сканирующих спектрометров, один из которых (MODIS-N) снимает в надир, а ось съемки

другого (MODIS-T) может быть отклонена. 36 спектральных зон MODIS охватывают диапазон с длинами волн от 0,4 до 14,4 мкм. Съемка в двух зонах (0,620–0,670 и 0,841–0,876 мкм) ведется с разрешением 250 м, в пяти зонах видимого и ближнего инфракрасного диапазона с разрешением 500 м, а в остальных (диапазон от 0,4 до 14,4 мкм) – 1000 м.

Траектория движения носителя и угол обзора системы 110° (ширина полосы обзора 2330 км) позволяют MODIS за сутки получать изображение почти всей поверхности Земли, за исключением узких промежутков между полосами сканирования в низких широтах.

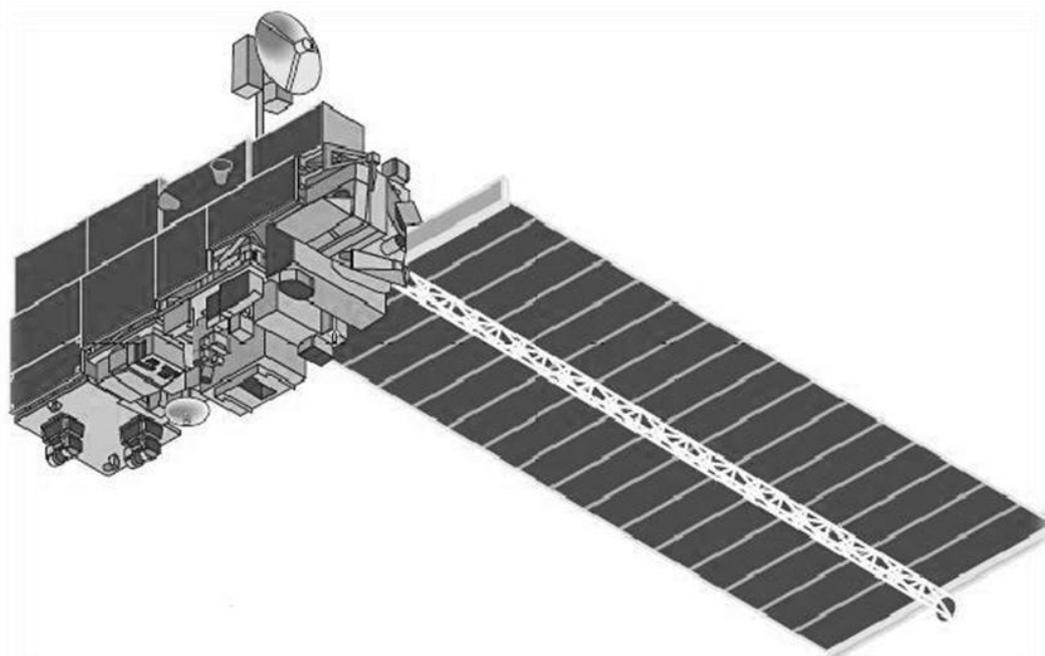


Рис. 2.4. Спутник Terra

Спутнику Landsat

Программа Landsat – один из наиболее продолжительных проектов по получению спутниковых изображений Земли. Первый из спутников в рамках программы Landsat был запущен НАСА 23 мая 1972 г.

Новый спутник Landsat-8 (проект LDCM – Landsat Data Continuity Mission) – восьмой в рамках программы Landsat (седьмой, выведенный на орбиту) – был запущен 11 февраля 2013 г. с космодрома Ванденберг и продолжил выполнение миссии Landsat, поставляя данные для использования в сельском хозяйстве и других отраслях экономики, а также в образовании,

бизнесе, государственном управлении. Landsat-8 выведен на солнечно-синхронную орбиту высотой 705 км. Первые изображения со спутника Landsat-8 были получены 18 марта 2013 г.

В разное время на борту спутников Landsat устанавливались различные съемочные системы, которые произвели миллиарды снимков, являющихся уникальным ресурсом для проведения множества научных исследований в области сельского хозяйства, картографии, геологии, лесоводства, разведки, образования и национальной безопасности.

На аппарате Landsat-8 установлены два сенсора: многоканальный сканирующий радиометр Operational Land Imager (OLI) и сканирующий двухканальный ИК-радиометр Thermal InfraRed Sensor (TIRS). Радиометр OLI предназначен для ведения космической съемки на основе усовершенствованных технологий в 9 участках видимого, ближнего ИК и среднего ИК-диапазонов с максимальным разрешением 15 м, а радиометр TIRS – для съемки земной поверхности в двух каналах с разрешением 100 м (табл. 2.1).

Таблица 2.1

Основные технические характеристики съемочной аппаратуры

Прибор	Радиометр OLI			Радиометр TIRS
	Видимый и ближний ИК	Средний ИК	Панхроматическая съемка	Тепловой ИК
Спектральный диапазон, мкм	0,43–0,45 (фиолетовый) 0,45–0,52 (синий) 0,53–0,60 (зеленый) 0,63–0,68 (красный) 0,85–0,89 (ближний ИК)	1,36–1,39 1,56–1,66 2,10–2,30	0,50–0,68	10,40–12,50
Пространственное разрешение (в надире), м	30	30	15	100
Радиометрическое разрешение, бит	12			
Полоса обзора, км	185			

Геологическая служба США предоставила всем заинтересованным пользователям возможность бесплатного доступа к снимкам Земли, получаемым с помощью нового американского спутника ДЗЗ Landsat-8. Снимки находятся в открытом доступе на трех геопорталах: EarthExplorer (<http://earthexplorer.usgs.gov>), GloVis (<http://glovis.usgs.gov>) и LandsatLook Viewer (<http://landsatlook.usgs.gov>).

Это исключительно важно для всего сообщества ученых и специалистов, опирающихся в своей деятельности на данные космической съемки.

Спутники серии SPOT

Французская система космического наблюдения SPOT (Système Probatoire l'Observation de la Terre) функционирует с 1986 г. За это время было запущено 6 спутников с различными характеристиками. Спутники этой серии открыли новую эпоху в области дистанционного зондирования благодаря использованию линейки сенсоров, обеспечивающей широкую полосу съемки. Установленные на спутниках SPOT сенсоры позволяют осуществлять прицельную съемку. Это дает возможность выполнять стереосъемку земной поверхности с соседних витков, что позволяет создавать модели рельефа и имеет огромное значение для дешифрирования и картографирования. Еще одним преимуществом оптической системы сенсора с отклонением оси съемки на 27° от направления в нади́р является возможность проводить съемку одного и того же участка с наибольшей частотой. Это важно при мониторинге динамических явлений. В результате период съемки в экваториальных областях сокращается до трех дней. На сегодняшний день снимки SPOT по своим технико-экономическим показателям являются одними из наиболее востребованных материалов дистанционного зондирования Земли.

Запуск аппарата SPOT-6 был осуществлен 9 сентября 2012 г. с космодрома Шрихарикота (Индия). Запуск аппарата SPOT-7 планируется на 2014 г. Сохранив традиционную для всех аппаратов SPOT полосу захвата в 60 км, спутник SPOT 6 обеспечивает получение детальных изображений. Также возможно быстрое перенацеливание аппарата на съемку любого участка поверхности в пределах зоны обзора. Со спутника SPOT-6 полу-

чают панхроматические снимки (в диапазоне 0,450–0,745 мкм) и цветосинтезированные изображения с пространственным разрешением в надире 1,5 м, многозональные снимки (в спектральных диапазонах: 0,450–0,520 мкм; 0,530–0,590 мкм; 0,625–0,695 мкм; 0,760–0,890 мкм) с пространственным разрешением от 8 м в надире и с радиометрическим разрешением 12 бит.

Спутник SPOT-6 выведен на солнечно-синхронную орбиту высотой 694 км с периодом съемки 26 дней и местным временем пересечения экваториальной плоскости 10 ч.

Спутник IKONOS-2

Спутник IKONOS-2 (IKONOS-1 потерпел аварию при запуске 27 апреля 1999 г.) был запущен 24 сентября 1999 г. с космодрома Ванденберг (США, штат Калифорния). Создание этого коммерческого спутника было вызвано возрастающим спросом на данные дистанционного зондирования в самых разных областях применения – от картографии до мониторинга состояния сельскохозяйственных посевов и планирования городской инфраструктуры. IKONOS-2 стал первым в истории человечества коммерческим спутником для съемки Земли со сверхвысоким (менее 1 м) разрешением (рис. 2.5).

Инициатором использования высокодетальных снимков в гражданских целях выступила компания Space Imaging (с января 2006 г. после слияния с компанией OrbImage – GeoEye).

Спутник IKONOS-2 выведен на солнечно-синхронную орбиту высотой 680 км и вращается вокруг Земли со скоростью 7 км/с. Со спутника IKONOS-2 получают панхроматические снимки (в диапазоне 0,526–0,929 мкм) с пространственным разрешением 0,82 м, многозональные снимки (в спектральных диапазонах 0,445–0,516 мкм; 0,506–0,595 мкм; 0,632–0,698 мкм; 0,757–0,853 мкм) с пространственным разрешением 3,2 м в надире.

Период съемки с указанным разрешением для экваториальной области составляет около 3 дней. Высокая производительность спутника позволяет снимать и получать достаточно точные снимки со сверхвысоким разрешением за короткий срок. Другим преимуществом спутника IKONOS-2 является высокая маневренность и, как следствие, возможность съемки больших площадей за один проход, а также возможность получения стереопар с одного витка.

Период обращения спутника вокруг Земли равен 98 мин, период повторной съемки – от 3 дней, время прохождения экватора – 10 ч 30 мин. Максимальный угол отклонения от надир составляет 26° . Ширина полосы съемки в надире составляет 11 км.



Рис. 2.5. Панхроматическое изображение IKONOS-2 с пространственным разрешением 1 м (Санкт-Петербург, 2002 г.)

Данные с этого спутника предоставляются с разным уровнем обработки. Различные виды коммерческих данных IKONOS и их назначение приведены в табл. 2.2.

Уровни обработки снимков и области применения

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

Спутник QuickBird

Спутник был успешно запущен 18 октября 2001 г. с космодрома Ванденберг (США, штат Калифорния) совместными усилиями компании DigitalGlobe (до сентября 2001 г. – EarthWatch) и ее инвесторов. Современный спутник QuickBird является вторым спутником одноименной программы. Его предшественник, запущенный в ноябре 2000 г. с космодрома Плесецк (Россия), не достиг орбиты. Спутник движется по солнечно-синхронной орбите высотой 450 км со скоростью 7,1 км/с. Период обращения спутника вокруг Земли равен 93,5 мин, период повторной съем-

ки – 1–3,5 суток, время прохождения экватора – 10 ч 30 мин. Ширина полосы съемки в надире составляет 16,5 км.

QuickBird предназначен для получения цифровых изображений земной поверхности с пространственным разрешением от 61 см при съемке в надир до 72 см при отклонении в 25° в панхроматическом режиме (0,45–0,90 мкм) и 2,44 и 2,88 м соответственно в мультиспектральном режиме (0,45–0,52 мкм; 0,52–0,60 мкм; 0,63–0,69 мкм; 0,76–0,90 мкм) с радиометрическим разрешением 11 бит. Одновременность выполнения съемки в панхроматическом и мультиспектральном режимах позволяют синтезировать цветные снимки с пространственным разрешением панхроматических, что дает возможность проводить анализ в четырех спектральных диапазонах. Основными преимуществами спутника являются широкая полоса охвата в сочетании с большим запасом бортовой памяти, высокой точностью геопозиционирования и возможность заказа полигонов сложной формы.

Существует несколько уровней обработки снимков *QuickBird* в зависимости от задач потребителей.

Снимки уровня Basic. Снимки QuickBird этого уровня предназначены для тех потребителей, у которых есть все необходимые средства для обработки изображений. В состав набора данных включают информацию, необходимую для фотограмметрической обработки, – сведения о модели камеры и пространственных параметрах съемки. Снимки уровня *Basic* проходят радиометрическую коррекцию и процедуру внесения поправок, вызванных искажениями камеры. В то же время они не трансформированы в картографическую проекцию, и к ним не применялась геометрическая коррекция. Снимки уровня *Basic* характеризуются как «геометрически необработанные», однако при их дальнейшей обработке с учетом вспомогательных данных *ISD (Image Support Data)* можно добиться среднеквадратичной точности горизонтальной привязки 14 м (без учета влияния рельефа).

Уровень Standard. Снимки этого уровня предназначены тем потребителям, которых устроит средняя точность привязки. В дополнение к процедурам обработки, которые проходят снимки уровня *Basic*, также применяется геометрическая коррекция.

Данные трансформируются в картографическую проекцию, необходимую заказчику. Пространственное разрешение выровнено по всему полю снимка. При геометрической коррекции устраняются эффекты, связанные с особенностями орбиты спутника, вращением и кривизной поверхности Земли, а также искажения, возникающие при панорамной съемке.

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

3. ОБРАБОТКА ДАННЫХ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ

Большая часть данных дистанционного спутникового зондирования сразу поступает в цифровом виде, что позволяет непосредственно применять для их обработки современные компьютерные технологии, при использовании которых становится возможным осуществлять усвоение и реализацию спутниковой информации с помощью автоматизированных систем обработки данных. Подобные системы обычно содержат две группы блоков, различающихся по технологическому назначению. Первая группа блоков обеспечивает автоматизацию решения технических задач, в том числе и географическую привязку изображения. Вторая группа позволяет автоматизировать решение содержательных задач, т. е. выдает информацию о характеристиках исследуемых объектов.

3.1. Основные этапы обработки спутниковых изображений

Методы цифровой обработки изображений играют значительную роль в космических исследованиях, в том числе при составлении карт по космическим снимкам. Цифровая обработка изображений для получения географического результата представляет собой определенную для каждой задачи последовательность стандартных процедур. Ниже рассмотрены основные этапы обработки данных.

Наземная система обработки данных предназначена для извлечения полезной информации из мультиспектральных данных дистанционного зондирования и передачи ее потребителям. Система обработки является промежуточным звеном между датчиком дистанционного зондирования и пользователем. Поэтому ее характеристики во многом зависят как от характера данных, так и в значительной степени от требований потребителей информации дистанционного зондирования.

Обработка данных дистанционного зондирования в соответствии с мировой практикой подразумевает несколько уровней, представленных в табл. 3.1.

Уровни обработки спутниковых данных

Уровень	Глубина обработки снимка
0	Первичные данные, дополненные орбитальной информацией
1	Радиометрически откорректированное и географически привязанное изображение (дополнительно устраняются искажения, вносимые аппаратурой и вращением Земли)
2	Преобразованное в заданную картографическую проекцию изображение с учетом координат опорных точек
3	Геометрически преобразованное изображение с учетом цифровой модели местности (для суши)
4	Мультиспектральная обработка, включающая в себя совместную обработку разновременных данных или данных, полученных с различных датчиков

В общем случае обработка данных дистанционного зондирования включает три этапа:

1-й этап – предварительная обработка;

2-й этап – первичная обработка;

3-й этап – вторичная или тематическая обработка.

На *1-м этапе* после приема спутниковых данных, записи их на магнитный носитель и выполнения необходимых декодирующих и корректирующих операций происходит преобразование данных (с учетом калибровок), переданных с космического аппарата, непосредственно в изображение или космический снимок (например, синтез радиолокационных изображений из радиоголограмм, переданных по радиолинии), а также преобразование их в форматы, удобные для последующих видов обработки.

На *2-м этапе* проводят радиометрические и геометрические преобразования (коррекцию) для исправления радиометрических и геометрических искажений, вызванных нестабильностью работы космического аппарата и датчика, а также географическую привязку изображения с наложением на него сетки координат, изменение масштаба изображения и представление изображения в необходимой географической проекции (геокодирование).

3-й этап – тематическая обработка – включает как цифровой анализ с применением статистических методов обработки (методы выделения признаков и классификация для количественных и качественных оценок и т. п.), так и визуальное дешиф-

рирование и интерпретацию. Тематическую обработку целесообразно проводить в интерактивном или полностью автоматизированном режиме. Для этих целей разработаны различные виды программного обеспечения тематической обработки с использованием специализированной компьютерной техники, в основном зарубежного производства.

Радиометрические преобразования используются для коррекции определенных типов искажений в системе сбора данных, таких как некомпенсированная нестабильность электронных устройств. Радиометрическая точность обеспечивается системами внутренней и внешней калибровки. Информация, необходимая для окончательной калибровки данных, должна содержаться в структуре передаваемого на Землю сигнала и учитываться при последующей обработке. Иногда вводится поправка на изменения параметров среды во время зондирования (состояние атмосферы, изменение освещенности и т. п.). Радиометрические преобразования используются также для абсолютной калибровки данных, т. е. для преобразования интенсивности изображения, измеренной датчиком, в значение измеряемых физических параметров (например, перевод цвета изображения в значения содержания хлорофилла).

Геометрические преобразования. При обработке спутниковых данных одной из основных целей является получение изображений с требуемыми геометрическими характеристиками. Это связано с тем, что не подвергнутое специальной обработке спутниковое изображение (рис. 3.1) отличается по своим геометрическим характеристикам от карты в любой стандартной географической проекции и имеет отличное от нее распределение искажений.

С помощью геометрических преобразований изменяют геометрию изображения либо корректируют геометрические искажения, вносимые аппаратурой дистанционного зондирования. Геометрические искажения возникают за счет ограниченности разрешения каждой системы дистанционного зондирования, кривизны Земли, изменения орбит и высот спутников, а также вследствие дефектов или погрешностей в системе регистрации данных. Для устранения геометрических искажений и приведения спутникового изображения к стандартной географической проекции снимок необходимо геометрически трансформировать, т. е. под-

вергнуть его процедуре *геометрической коррекции* по данным, которые характеризуют положение датчика в пространстве в момент съемки и геометрию подстилающей поверхности.

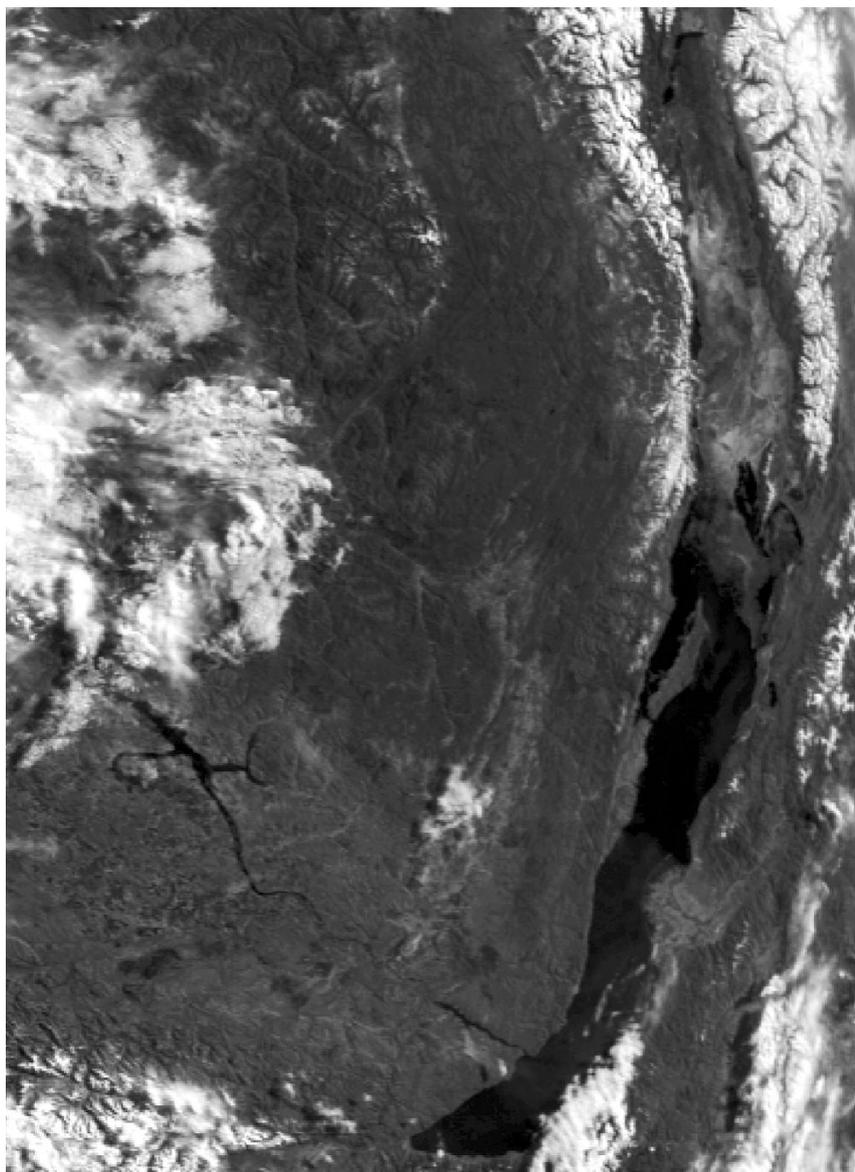


Рис. 3.1. Фрагмент изображения, полученного 10 мая 2007 г. со спутника NOAA-12, 2-й канал AVHRR

Трансформация спутниковых изображений в картографическую проекцию, основанная только на использовании модели орбиты спутника, часто не обеспечивает достаточного уровня точности. На рис. 3.2, А отчетливо прослеживается существенный сдвиг береговой линии оз. Байкал, оставшийся после процедуры геометрической коррекции по орбитальным данным. Для устранения этой проблемы существуют процедуры *географической привязки*.

Современные пакеты программ, предназначенные для обработки спутниковых данных, предусматривают возможность географической привязки по опорным точкам, позволяя оператору в интерактивном режиме задавать на спутниковом изображении точки, географические координаты которых имеются в базе данных.

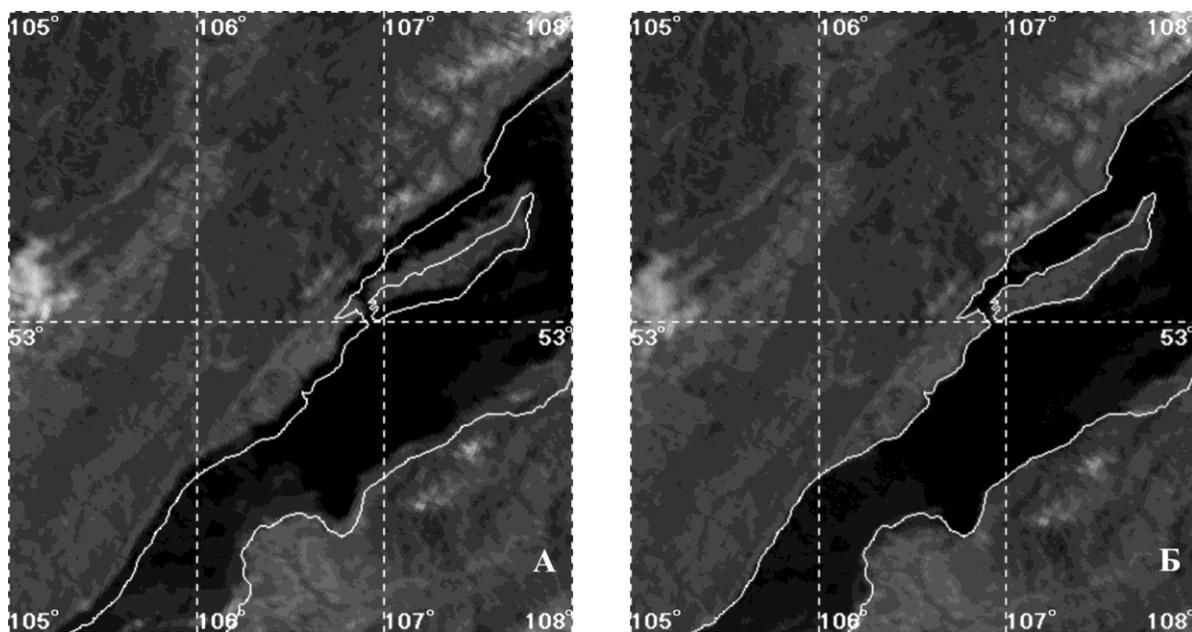


Рис. 3.2. Спутниковое изображение после геометрической коррекции по орбитальным данным (А) и последующей географической привязки (Б)

«Совмещение» и «наложение данных» – это термины, которыми обозначаются процессы геометрического выравнивания одного множества данных относительно другого. Например, одно множество может быть данными дистанционного зондирования океана, другое – картой. Заметим, что существует большое разнообразие данных, которые можно совместить или наложить друг на друга. Например, распределение данных дистанционного зондирования океана в виде изображения или снимка можно наложить на данные о подводной топографии, о контактных подспутниковых измерениях, о метеорологических параметрах и т. п.

Масштабирование, преобразование проекций, исправление систематических искажений – процедуры, необходимые для получения изображения в нужном масштабе или географической проекции и для устранения различных искажений, возникших из-за нестабильности платформы космического аппарата. При приведении снимков (или карт и снимков) к геометрически

идентичному виду стремятся к тому, чтобы среднеквадратическая ошибка трансформирования не превышала 0,5 пикселя.

Сжатие и архивация данных является одним из наиболее важных элементов обработки данных дистанционного зондирования, так как при этом приходится обрабатывать огромные потоки данных и хранить обработанную информацию. Путем уменьшения формата или объема данных в коммуникационных системах возможно понизить требования к передаче, хранению и обработке данных, что в конечном итоге приводит к снижению стоимости системы обработки в целом.

Под **улучшением изображений** в широком смысле понимают процедуры улучшения любой разновидности данных, представленных в виде изображения, а в узком – процедуры, улучшающие визуальное восприятие данных, представленных в виде изображения. Все процедуры улучшения изображений могут быть полезны безотносительно от того, действительно ли данные дистанционного зондирования должны быть визуализированы. Например, фильтрация, позволяющая улучшить выделение контуров или границ, может быть частью более сложной процедуры. Другие операции предназначены для уменьшения различных видов аппаратурных шумов и тем самым могут быть использованы для улучшения последующего классификационного анализа.

Преобразование снимков. В отличие от операций улучшения снимков, для преобразования снимков используются данные из нескольких спектральных диапазонов, причем эти данные могут соответствовать даже различным датам проведения съемки (многовременные данные). В результате преобразования формируются новые снимки, на которых гораздо четче выделяются определенные объекты и области интереса. К простейшим преобразованиям относятся операции попиксельного сложения, вычитания, умножения и деления. Например, операция *вычитания* состоит в том, что из значения яркости каждого пикселя одного снимка вычитается значение яркости соответствующего пикселя другого снимка, который совмещен с первым. Результирующий снимок называется разностным. Объекты, отражательная способность которых изменилась незначительно за время между двумя съемками, будут окрашены на разностном снимке в светло-серые тона, а темные и яркие области снимка

будут соответствовать значительным изменениям отражательной способности. Этот тип преобразования полезен для картографирования городской инфраструктуры, наблюдения за лесозаготовками, оценки посевных площадей и других подобных задач.

Сложение изображений является усредняющей операцией, позволяющей снизить уровень шума на снимке. Эту операцию широко используют при пространственной фильтрации для выделения объектов определенного масштаба. Операция *умножения* снимков при обработке данных дистанционного зондирования применяется крайне редко. В отличие от нее, операция *деления*, на которой основано вычисление многих спектральных признаков, является одним из наиболее часто используемых преобразований. Эта операция позволяет подчеркивать малейшие изменения в спектральной отражательной способности различных земных покровов.

К преобразованию снимков прибегают при расчете вегетационных индексов (1.3)–(1.6), при вычислении температуры поверхности по спутниковым измерениям, например с использованием двухканальных методов (1.10) и т. д.

Интерпретация данных дистанционного зондирования. Использование снимков в географических исследованиях и картографировании основано на их чтении и толковании, что предполагает, помимо их коррекции и улучшения, выполнение автоматического распознавания и дешифрирования изображенных объектов, их классификацию и т. д.

Дешифрирование снимков – метод исследования территорий, акваторий и атмосферных явлений на основе зависимости между свойствами объектов и характером их воспроизведения на снимках. Дешифрирование включает обнаружение, распознавание, интерпретацию, а также определение качественных и количественных характеристик объектов и отображение результатов в графической (картографической), цифровой или текстовой формах.

Различают дешифрирование снимков *общегеографическое* (топографическое), *ландшафтное* и *тематическое* (отраслевое) – геологическое, почвенное, лесное, гляциологическое, сельскохозяйственное и др.

Дешифрирование делят на *визуальное* и *компьютерное*, однако это деление условно, так как визуально дешифрируют и фо-

тоотпечатки, и растровые, состоящие из пикселей, снимки на экране компьютера. Визуальное распознавание объектов базируется на знании их дешифровочных признаков (глубина интерпретации существенно зависит от географической подготовки дешифровщика). Компьютерное дешифрирование включает также методы автоматизированной классификации исследуемых объектов.

Дешифрирование выполняется по принципу от общего к частному. Всякий снимок – прежде всего информационная модель местности, воспринимаемая исследователем как единое целое, а объекты анализируются в развитии и неразрывной связи с окружающей их средой.

Тематическое дешифрирование выполняют по 2-м логическим схемам: 1-я предусматривает вначале распознавание объектов, а затем их графическое выделение, 2-я – вначале графическое выделение на снимке однотипных участков, а затем их распознавание. Обе схемы завершаются интерпретацией, научным толкованием результатов дешифрирования. При компьютерном дешифрировании эти схемы реализуются в технологиях кластеризации и классификации с обучением.

Объекты на снимках различают по дешифровочным признакам, которые делят на *прямые* и *косвенные*. К прямым относят форму, размер, цвет, тон и тень, а также сложный объединяющий признак – рисунок изображения. Косвенными признаками служат местоположение объекта, его географическое соседство, следы взаимодействия с окружением.

При косвенном дешифрировании, основанном на объективно существующих связях и взаимообусловленности объектов и явлений, дешифровщик выявляет на снимке не сам объект, который может и не изобразиться, а его индикатор. Такое косвенное дешифрирование называют *индикационным*, географическую основу его составляет индикационное ландшафтоведение. Его роль особенно велика, когда прямые признаки теряют значение из-за сильной генерализованности изображения. При этом составляют особые индикационные таблицы, где для каждого типа или состояния индикатора указан соответствующий ему вид индицируемого объекта. Такая методика тщательно отработана, например, для гидрогеологического дешифрирования, когда по распространению растительности определяют не только наличие, но и глубину залегания и минерализацию грунтовых вод.

Индикационное дешифрирование позволяет от пространственных характеристик переходить к временным. На основе пространственно-временных рядов можно установить относительную давность протекания процесса или стадию его развития. Например, по гигантским речным меандрам, оставленным в долинах многих сибирских рек, по их размерам и форме оценивают расходы воды в прошлом и происходившие изменения.

Индикаторами движения водных масс в океане часто служат битые льды, взвеси и др. Движение вод хорошо визуализируют и температурные контрасты водной поверхности – именно по тепловым инфракрасным снимкам выявлена вихревая структура Мирового океана.

Дешифрирование многозональных снимков. Работа с серией из 4–6 зональных снимков сложнее, чем с одиночным снимком, и их дешифрирование требует некоторых особых методических подходов. Различают *сопоставительное* и *последовательное* дешифрирование.

Сопоставительное дешифрирование состоит в определении по снимкам спектрального образа, сравнении его с известной спектральной отражательной способностью и в опознавании объекта. Вначале на зональных снимках выявляют совокупности объектов, различные в разных зонах, а затем, сопоставляя их (вычитая зональные схемы дешифрирования), выделяют в этих совокупностях индивидуальные объекты. Наиболее эффективно такое дешифрирование для растительных объектов.

Последовательное дешифрирование основано на том, что зональные снимки оптимально отображают разные объекты. Например, на снимках мелководий благодаря неодинаковому проникновению лучей разных спектральных диапазонов в водную среду видны объекты, расположенные на разных глубинах, и серия снимков позволяет выполнить послойный анализ и затем поэтапно суммировать результаты.

Дешифрирование разновременных снимков обеспечивает изучение изменений объектов и их *динамики*, а также косвенное дешифрирование изменчивых объектов по их *динамическим признакам*. Например, сельскохозяйственные культуры опознают по смене изображения в течение вегетационного периода с учетом сельскохозяйственного календаря.

Различают *полевое* и *камеральное дешифрирование*. При полевом дешифрировании объекты опознают на местности, сличая их с натурой. Это наиболее достоверный вид дешифрирования, но и наиболее дорогой. Его разновидностью можно считать *аэровизуальное дешифрирование*.

При камеральном дешифрировании объект распознают по прямым и косвенным признакам без непосредственного выхода на местность. На практике обычно комбинируют оба вида дешифрирования, заранее подготавливают *дешифрованные эталоны* – снимки типичных объектов с нанесенными результатами дешифрирования. Их используют при камеральном дешифрировании, дополняя *географической интерполяцией* и *экстраполяцией*.

Под *цифровой классификацией* понимают процесс отнесения пикселей изображения к тому или иному классу. Классификация объектов лежит в основе автоматизированного дешифрирования снимков. При этом исходят из того, что каждому пикселю многозонального снимка соответствует набор значений спектральных признаков или вектор в спектральном пространстве, размерность которого равна числу съемочных зон. Тогда процесс классификации сводится к распределению всех элементов раstra по классам в соответствии с отражательной способностью или значением спектральной яркости каждого объекта в одной или нескольких зонах спектра, например типов растительности или категорий использования земель.

Трудности классификации связаны прежде всего с изменчивостью признаков – отражательная способность меняется в зависимости от времени суток, сезона и т. д. Часто классификация бывает неопределенной, поскольку элементы раstra могут принадлежать сразу к нескольким классам – это так называемые «смешанные элементы». Но в процессе классификации неопределенность игнорируется, и каждый элемент помещается в один из классов.

Классификация опирается на математическую теорию *распознавания образов*. Согласно ей пространство признаков нужно разделить на замкнутые области с признаками, характерными для одного из классов, и затем отнести каждый пиксель к тому классу, в область которого попал его вектор признаков.

Границы получаемых областей называют решающими (разделяющими) границами, а сами области – областями решения. Способ отнесения пикселей снимка к классам объектов (облас-

твям решения) определяет правило классификации, которое обеспечивает соответствующий алгоритм. Правило классификации обычно формируют на основе признаков типичных объектов, принадлежность которых к данному классу заранее установлена, например, на тестовых участках.

Алгоритмы подразделяют на 2 типа: алгоритмы контролируемой и неконтролируемой классификаций. При контролируемой классификации правила перехода от показателей спектральной яркости к классам объектов вырабатывают на «учебном» (тестовом, эталонном) участке, а затем автоматически применяют и на остальной части снимка. Эти алгоритмы иногда называют «классификацией с обучением».

Контролируемую классификацию реализуют с помощью алгоритмов, использующих разные способы учета спектральных характеристик эталонных объектов:

- ♦ **дискриминантные функции**, которые в простейшем случае представляют собой линии, разделяющие объекты на классы, если они не пересекаются в пространстве признаков (рис. 3.3, а);

- ♦ **минимальные расстояния R** , когда классифицируемые объекты относят к тому или иному классу, вычисляя евклидово расстояние в пространстве признаков между проверяемыми и эталонными пикселями и относя каждый пиксель к тому классу, до эталона которого это расстояние минимально (рис. 3.3, б);

- ♦ **алгоритм параллелепипеда**, когда в признаковом пространстве выделяют замкнутые прямоугольные области, границы которых задают на основе анализа гистограмм распределения спектральных яркостей эталонных объектов в двух, трех или более зонах спектра. Каждый пиксель снимка относят к тому классу, в чей параллелепипед он попадает по своим значениям яркости (рис. 3.3, в);

- ♦ **метод максимального правдоподобия**, основанный на статистических оценках характеристик классов объектов (рис. 3.3, г). Смысл его сводится к определению вероятности попадания пикселя в тот или иной класс. В общем случае вероятностное распределение спектральных признаков, которыми характеризуется каждый класс, определяет возможность нахождения пикселя в любом месте пространства признаков. Этот метод обычно применяют в случаях, когда спектральные характеристики классов объектов мало различаются, как это часто бывает при распознавании растительных сообществ.

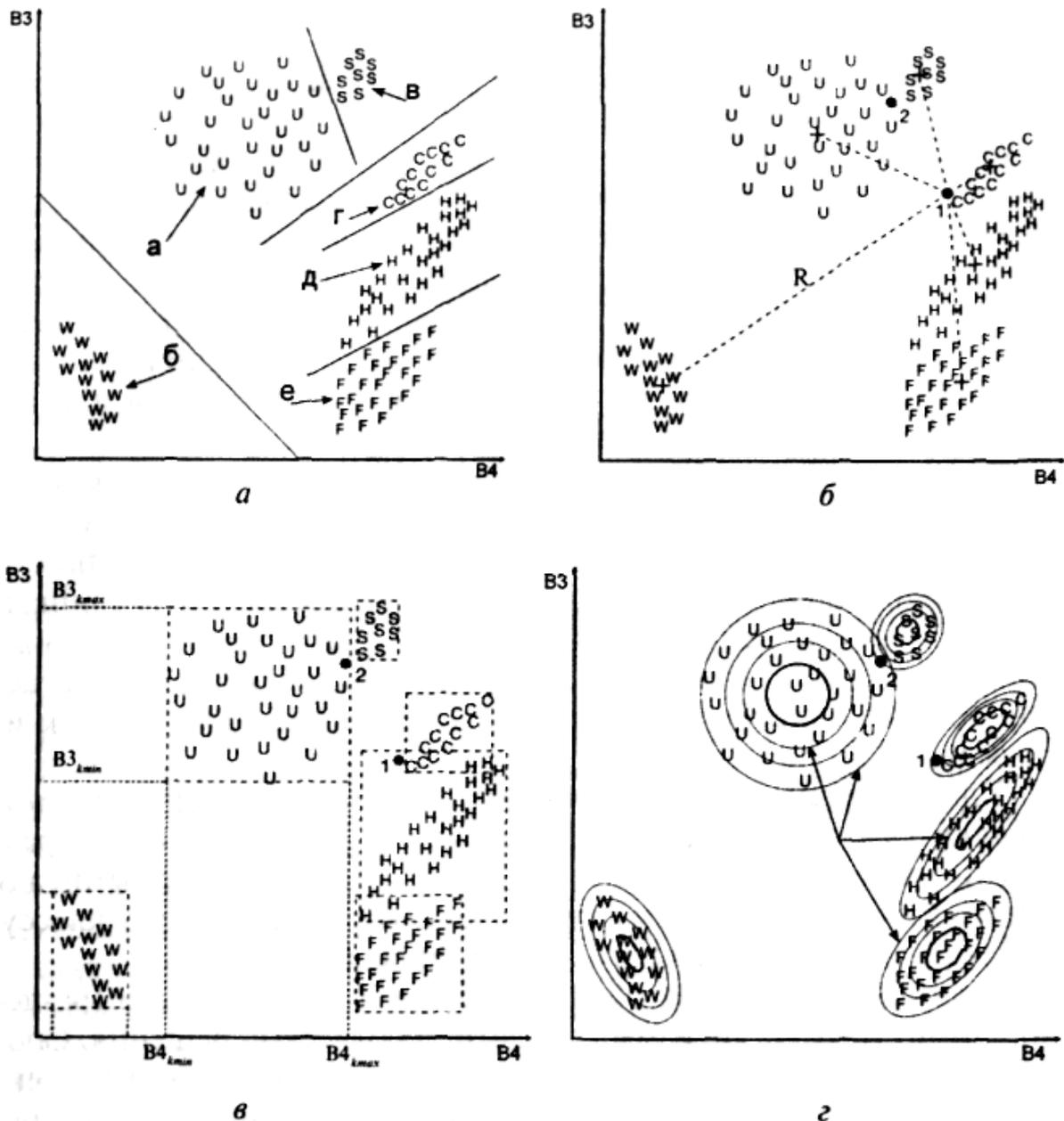


Рис. 3.3. Методы классификации: буквами обозначены разные классы объектов, 1 и 2 – точки произвольных измерений признаков [Картоведение ..., 2003]

Алгоритмы неконтролируемой классификации реализуют часто применяемые в исследованиях многопараметрически определенных объектов *методы кластеризации*, основанные на так называемых *пороговых процедурах*. В них предполагается, что первоначальная информация о природных различиях объектов, зафиксированная в спектральных яркостях, достаточна для разделения классов, и поэтому можно обойтись без эталонов.

В общем случае при *пороговой* классификации сравнивают значения яркости двух соседних пикселей снимка. Если их раз-

личие превышает некоторую, заранее заданную величину d (порог), то считается, что эти пиксели принадлежат разным объектам и между ними проходит разделяющая граница. При таком способе классификации точность обычно невысока, тем не менее при отсутствии априорной информации выполнение этой процедуры целесообразно.

Алгоритмы кластеризации осуществляют объединение пикселей с близкими значениями яркости в группы – кластеры и позволяют вычислить средневзвешенные значения яркостей всех пикселей, вошедших в кластер, которые определяют положение центра кластера в пространстве признаков. Простейшей мерой близости пикселей является евклидово расстояние.

Компьютерную обработку снимков выполняют построчно с повторением проверки условия для всех элементов строки и в конечном итоге – всего снимка. В результате создается карта кластеризации, а также массив спектральных координат центров кластеров с известным числом пикселей в каждом из них. Дешифровщик, используя карту кластеризации, а также дополнительную информацию, может оценить соответствие кластеров классам объектов и принять решение об их объединении в нужные тематические группы (выделы).

Существуют различные модификации алгоритмов кластеризации, отличающиеся в основном способом приближения выделяемых кластеров к классам путем дополнительных проверок «качества» получаемых кластеров. При этом оценивают расстояние между центрами кластеров (при небольшом расстоянии повышается вероятность пересечения кластеров и возникает необходимость их объединения) и разброс пикселей в кластерах (большая дисперсия яркости пикселя относительно центра кластера отражает случайность его попадания в данный «рыхлый» кластер, который, скорее всего, должен быть разделен). Оценки выполняются итерационно с последовательным уточнением характеристик кластеров. На таких оценках основан известный алгоритм *ISODATA*, который используется во многих растровых ГИС-пакетах.

В состав программного обеспечения автоматизированной обработки аэрокосмических снимков обычно входят несколько алгоритмов контролируемой и неконтролируемой классификации. Применение того или иного алгоритма определяется нали-

чем априорной информации, качеством самого снимка, решаемой задачей, опытом и интуицией дешифровщика.

Мониторинг и картографирование изменений в природе, хозяйстве и их взаимодействия связаны с *составлением карт динамики*. Компьютерная реализация этих методов главным образом направлена на обеспечение точного пространственного совмещения разновременных карт, аэро- и космических снимков для извлечения динамической информации.

Прежде всего необходимо определить классы динамических объектов и их временной интервал (сезон, год и т. п.).

Обеспечить спектральную идентичность снимков крайне трудно из-за разнообразия определяющих ее параметров. Яркая коррекция позволяет делать разновременные снимки максимально сравнимыми при условии, что сезонные различия минимальны, а облачность отсутствует.

Подходящие алгоритмические процедуры выявления и картографирования изменений основаны на методах контролируемой, неконтролируемой или гибридной классификации и оверлейных ГИС-технологиях.

Наиболее часто применяют следующие операции:

♦ *создание композиций разновременных снимков* за два срока и выделение изменившихся и неизменившихся кластеров пикселей;

♦ *использование алгебры изображений* – вычитание, синтез или вычисление отношений соответствующих зон (после их приведения к единой системе координат и размеру);

♦ *сопоставление результатов классификации разновременных снимков*, полученных путем автоматизированного дешифрирования нужных объектов на геометрически совмещенных снимках;

♦ *применение бинарных масок* – специально создаваемых изображений, содержащих только 0 и 1, которые применяют для маскирования неизменившихся или не интересующих дешифровщика объектов, что позволяет выделить изменения;

♦ *использование карт как источников данных за первую дату*, когда результаты съемки сравнивают с картой, составленной на более ранний срок. В этом случае карту сканируют, снимок трансформируют в проекцию карты, выполняют его классификацию, а далее применяют для карты и классифицированного снимка описанные выше операции;

♦ *ручное цифрование классов изменений по экрану* – выделение контуров площадных объектов на разновременных картах классификации или снимках высокого разрешения способом так называемого цифрования по растровой подложке, с последующим совмещением полученных векторных карт на одной основе.

Заключительный этап классификации – это оценка достоверности результатов, т. е. определение процентного отношения правильно определенных объектов к общему количеству классифицируемых. Достоверность классификации вначале оценивают визуально, выявляют грубые промахи и несоответствия. Затем переходят к количественной оценке, сравнивая результаты классификации с тестовыми участками, в качестве которых могут использоваться результаты наземных наблюдений, карты и снимки крупного масштаба, данные публикаций и фондовые материалы. Если полученные результаты не удовлетворяют исполнителя, он уточняет обучающую выборку (например, путем деления крупных классов на более мелкие), значения порогов и т. д. Затем повторяет процесс. Практический опыт показывает, что достоверности классификации в 90–95 % можно добиться для 2–3-х классов. Удовлетворительными считаются результаты, если правильно определены 70–85 % классифицируемых объектов. Для оценки точности составления карт динамики строят «матрицы динамики» классов объектов, аналогичные матрицам классификации.

Представление данных – один из важных видов обработки и анализа данных. Результаты, полученные после обработки и анализа данных дистанционного зондирования, представляются конечным потребителям в определенном, строго оговоренном виде и формате (таблицы, массивы данных, графики, схемы, карты). Причем пользователи делятся на множество категорий – от так называемых продвинутых пользователей, которые смогут потреблять продукты дистанционного зондирования с минимальной обработкой или без обработки вообще, до абсолютно неподготовленных, которым нужны конечные продукты дистанционного зондирования в виде таблиц, карт или графиков.

Формы представления данных в значительной степени зависят от характера приложений и от используемой процедуры обработки. Для задач исследования пространственной и временной изменчивости гидрофизических характеристик одним из наиболее подходящих способов является представление данных в виде карт.

Средства визуализации позволяют сформировать визуальные представления для результатов анализа спутниковых снимков. Использование цвета при визуализации изображения обусловлено несколькими причинами. Во-первых, цвет облегчает распознавание и выделение объекта на изображении, во-вторых, человек в состоянии различать тысячи различных оттенков цвета и всего лишь около двух десятков оттенков серого. Второе обстоятельство особенно важно при визуальном анализе изображений.

Во многих программных пакетах для визуализации данных применяется модель RGB (Red; Green; Blue). Модель RGB – аппаратно-ориентированная модель, используемая в дисплеях для аддитивного формирования оттенков самосветящихся объектов (пикселей экрана). Данная модель идеально подходит для светящихся поверхностей (мониторы, телевизоры, цветные лампы и т. п.). В основе ее лежат три цвета: Red – красный, Green – зеленый и Blue – синий. Модель RGB базируется на основе строения глаза. Начало трехцветной теории цветового зрения было положено еще М. В. Ломоносовым (1711–1765), который отметил, что с помощью этих трех основных цветов можно получить почти весь видимый спектр. Например, желтый цвет получается сложением красного и зеленого; первичный синий в формировании желтого цвета не участвует.

Цвет в этой цветовой модели описывается тремя значениями цветов в диапазоне от 0 до 255. Каждое значение соответствует одному из базовых цветов и указывает на его содержание в данном цвете. Значения записывают в следующем порядке: красная, зеленая и синяя составляющие. В таблице 3.1 приведено описание ряда цветов, включая базовые, в цветовой модели RGB.

Таблица 3.1

Описания некоторых цветов в цветовой модели RGB

Красный	Зеленый	Синий	Результат
0	0	0	Черный
255	0	0	Красный
0	255	0	Зеленый
0	0	255	Синий
0	255	255	Голубой
255	0	255	Пурпурный
255	255	0	Желтый
255	255	255	Белый

Для целей представления данных в виде картографических изображений разрабатываются палитры в соответствии со средствами используемого программного обеспечения.

3.2. Обзор программных средств обработки данных дистанционного зондирования

Несмотря на то что обработка данных дистанционного зондирования включает стандартные этапы, конкретная реализация этих этапов во многом зависит от используемого программного обеспечения. Сегодня в системах обработки данных дистанционного зондирования стали стандартом рабочие станции и персональные компьютеры с высокоскоростными процессорами и накопителями большой емкости, что предъявляет соответствующие требования к процедурам обработки данных. В настоящее время разработано множество пакетов прикладных программ различного уровня для обработки данных дистанционного зондирования и изображений, начиная с распространяемых бесплатно и заканчивая дорогими высокопрофессиональными [Информационные технологии ..., 2007].

Системы для обработки данных дистанционного зондирования появились фактически в результате дальнейшего качественного развития программных средств, предназначенных для цифровой обработки изображений общего назначения (графических редакторов), таких как Adobe PhotoShop, Corel Photo-Paint и т. п. Оба класса систем имеют много общего: работают с растровой моделью данных, используют базирующиеся на аналогичном математическом аппарате методы обработки изображений. Однако следует отметить ряд существенных отличий, связанных со спецификой данных дистанционного зондирования:

- данные дистанционного зондирования – это файлы весьма большого объема, для эффективной работы с которыми необходимы специальные средства, в том числе особые форматы;
- в данных дистанционного зондирования числовое значение пикселя оказывается важным в задачах восстановления полей каких-либо характеристик снятого объекта;
- данные дистанционного зондирования – это многомерные данные, число и параметры спектральных зон съемки кото-

рых не позволяют трактовать их как RGB-изображения, кроме того, в них могут использоваться еще и другие координаты измерения (например, время);

- данные дистанционного зондирования нуждаются в предварительной геометрической и радиометрической коррекции;
- данные дистанционного зондирования – это пространственная информация, имеющая, как правило, координатную привязку;
- важным свойством программного обеспечения по обработке данных дистанционного зондирования является возможность быстрого перехода от предварительной обработки и тематического дешифрирования к выполнению операций моделирования и пространственного анализа средствами геоинформационных систем.

Из перечня зарубежного программного обеспечения по обработке данных дистанционного зондирования следует выделить ERDAS Imagine, ENVI, ER Mapper, IDRISI и др. Из отечественных программных продуктов отметим программные продукты СканЭкс и Sputnik. Большинство существующих пакетов программ направлено на решение нескольких конкретных узких задач, связанных с обработкой и анализом данных. В такой ситуации для осуществления всего цикла работ пользователю необходимо иметь в своем распоряжении как минимум несколько программных продуктов. Лишь немногие пакеты программ обеспечивают возможность осуществления всего комплекса работ с данными дистанционного зондирования, к ним относится зарубежный программный продукт ERDAS Imagine и отечественная разработка Sputnik, позволяющие решать широкий спектр задач по обработке и анализу данных дистанционного зондирования. Кроме того, большинство существующих программных комплексов, таких, например, как ERDAS Imagine, предназначенных для обработки данных дистанционного зондирования, в основном ориентировано на их интерактивную обработку. В то же время в последние годы стали особенно актуальны задачи создания автоматизированных систем обработки спутниковых данных, и для их решения требуется специализированный программный инструментарий.

ERDAS Imagine. Программный пакет ERDAS Imagine, поставляемый на рынок фирмой ERDAS, сочетает в себе функции растровой и векторной ГИС и системы для обработки изображений, ориентированной на данные аэро- и космических съе-

мок, и предназначен для профессионалов в области ДЗЗ и фотограмметрии. Широкий набор инструментов, дающий возможность обрабатывать данные из любого источника и представлять результаты в любом виде – от профессионально оформленных печатных карт до трехмерных моделей местности, делает ERDAS Imagine одним из лучших программных продуктов для анализа и обработки данных ДЗЗ.

Ядром программного обеспечения ERDAS Imagine является один из трех вариантов базовых пакетов: Imagine Essentials, Imagine Advantage и Imagine Professional. Каждый последующий пакет включает в себя функциональные возможности предыдущего и расширяет их.

В качестве специализированных инструментов компания ERDAS разрабатывает дополнительные модули, которые можно приобрести отдельно от базового варианта и подключить к нему для получения новых функций. Такими модулями являются Imagine VirtualGIS, Imagine OrthoBASE, Imagine Subpixel Classifier, Imagine Radar Mapping Suite, Imagine Developers Toolkit, Stereo Analyst и др.

Модуль трехмерной визуализации и анализа Imagine VirtualGIS позволяет производить реалистичные трехмерные сцены из снимков и моделей рельефа местности, а также эффект движения по создаваемому ею виртуальному миру в реальном времени при наличии графического ускорителя.

Imagine OrthoBASE – основа фотограмметрических решений ERDAS. Этот модуль позволяет обрабатывать сотни аэрофотоснимков, выдавая на выходе фотоплан картографической точности. Вариант OrthoBASE Pro позволяет автоматически получить модель рельефа местности. Второй фотограмметрический продукт Stereo Analyst позволяет работать с парами снимков в стереорежиме и выполняет стереодешифрирование, подобно традиционным фотограмметрическим приборам.

Модуль Imagine Subpixel Classifier реализует особый метод классификации изображений, который направлен на решение проблемы смешения множества объектов в пределах одного пикселя.

Imagine Radar Mapping Suite реализует различные аспекты обработки радарных изображений. Инструмент программиста Imagine Developers Toolkit позволяет дополнить ERDAS Imagine любыми функциями, которые нужны заказчику.

ERDAS Imagine предоставляет набор средств для улучшения изображения, повышения его читаемости и информативности, составления карт землепользования и выделения объектов с применением контролируемой (на основе принципа максимального правдоподобия, минимального расстояния, расстояния Махаланобиса) и неконтролируемой классификации (иерархический кластерный анализ), выявления изменений, происшедших с течением времени на какой-либо территории и т. д.

ERDAS Imagine обеспечивает возможность точной привязки аэро- или космических снимков к реальным координатам, преобразование их в картографические проекции с использованием различных параметров земного эллипсоида.

ERDAS Imagine позволяет интерактивно конструировать модели, используя специальный объектно ориентированный графический редактор алгоритмов Model Maker, открывая доступ более чем к 200 операциям по обработке изображений и манипулированию данными ГИС. В частности, очень просто могут быть созданы модели для описания природной среды и происходящих в ней процессов.

Для создания профессионально оформленной картографической продукции и демонстрационной графики может быть использован специальный редактор Map Composer. Картографические композиции могут включать один или несколько слоев изображения, тематических векторных карт, аннотаций.

Модуль Vector в ERDAS Imagine работает с векторно-топологической моделью данных ГИС ARC/INFO, обеспечивая уникальную комбинацию возможностей растровой и векторной ГИС в одном и том же пакете. С его помощью можно создать полную географическую базу данных на исследуемую территорию, включая в нее векторные электронные карты. Кроме того, у него имеются средства редактирования векторных карт, включая построение топологии.

Внутренний формат графических данных IMG является открытым для растровых данных. ERDAS Imagine позволяет напрямую просматривать и обрабатывать файлы различных векторных и растровых форматов, а также обладает широкими возможностями импорта и экспорта изображений.

Достоинством системы является ее открытость, т. е. возможность написания пользователем и внедрения в нее дополни-

тельных модулей обработки изображений, для чего в системе предусмотрен специальный набор функций разработчика.

ERDAS ER Mapper. Система ERDAS ER Mapper, известная ранее как ER Mapper, использует единый интегрированный интерфейс, позволяющий получать быстрый и удобный доступ ко всем функциям обработки и анализа данных, поддерживаемых системой. Обработываемые данные могут быть объединены в рабочие наборы, в которые могут входить растровые, векторные и аннотационные слои. Рабочие наборы могут формироваться на основе данных растровых аэрокосмических снимков, цифровых рельефов местности, данных магнитной и сейсмической разведки и т. д.

Главной особенностью системы является то, что она не требует обязательного сохранения на диске результатов выполнения той или иной операции над данными, если пользователю этого не требуется. Вместо этого повторяющиеся последовательности операций объединяются и хранятся в виде алгоритмов, представляющих собой запись определенной последовательности шагов обработки, которые необходимо выполнить над тем или иным рабочим набором данных. Преимущество такого подхода заключается в значительном повышении эффективности работы с дисковым пространством, что главным образом положительно отражается на экономичности его использования. В алгоритмах могут записываться операции многоуровневой фильтрации, яркостного трансформирования (коррекции), обработки посредством формул и т. д.

Формулы представляют собой наборы арифметических и логических операций, задающих правила обработки многозональных снимков. Аргументами формулы обычно являются отдельные спектральные каналы обрабатываемого снимка. Большой набор стандартных формул по обработке изображений, предоставляемых системой, позволяет ускорить процесс создания эффективных алгоритмов обработки. ER Mapper содержит много разнообразных «шаблонных» алгоритмов, а также позволяет создавать собственные пользовательские алгоритмы обработки.

ER Mapper также предоставляет широкий выбор утилит импорта и экспорта данных большинства стандартных растровых и векторных форматов, наиболее распространенных форматов КС (Landsat, SPOT, NOAA и т. д.), а также данных в форматах многих широко известных ГИС (ArcInfo, ArcView, MapInfo и

т. д.). Всего в системе поддерживается до 130 разнообразных форматов данных.

Большое разнообразие функций обработки данных ДЗЗ позволяет решать широкий спектр задач как предварительной, так и тематической обработки. В системе представлены эффективные утилиты, позволяющие выполнять проекционное трансформирование (более чем в 40 проекций), геометрическую коррекцию снимков, производить географическую привязку, составлять мозаики из перекрывающихся аэрокосмоснимков, осуществлять слияние разнородных данных (например, снимков разных спутников), а также выполнять контролируемую и неконтролируемую классификацию снимков с целью извлечения содержательной тематической информации и т. д.

ER Mapper поставляется в виде единого комплекта, что исключает необходимость приобретения дополнительных модулей. Система ER Mapper является открытой и позволяет пользователям расширять ее возможности, предоставляя для этого набор специализированных библиотек, дающих доступ ко всем функциям системы и базирующихся на языке программирования С.

ENVI. Программный комплекс ENVI (Environment for Visualizing Images – среда для отображения снимков) включает набор функций для обработки данных ДЗЗ и их интеграции с данными ГИС. ENVI лицензирован ведущими операторами космических данных, поэтому обеспечивает поддержку данных ДЗЗ, полученных со спутников Quick Bird, Ikonos, Orb view, Cartosat-1, Formosat-2, Resourcesat-1, SPOT, IRS, Landsat и др.

ENVI включает в себя функции:

- обработки и глубокого анализа гиперспектральных снимков;
- исправления геометрических и радиометрических искажений;
- интерактивного улучшения изображений;
- интерактивного дешифрирования и классификации;
- анализа снимков в радиодиапазоне;
- построения запросов;
- оцифровки;
- и многие другие.

ENVI содержит спектральные библиотеки и инструменты для выполнения спектрального и топографического анализа, анализа растительности и классификации изображений по следующим алгоритмам:

- K-means, ISODATA;
- метод параллелепипедов;
- алгоритмы минимального спектрального расстояния, расстояния Махаланобиса;
- метод максимального правдоподобия;
- классификация с помощью метода спектрального угла;
- двоичное кодирование;
- дерево принятия решений;
- нейронная сеть.

С помощью алгоритма «Дерево принятия решений» возможен совместный анализ различных данных (цифровая модель рельефа DEM – высота, угол и направление уклона; гидрогеологические особенности – глубина залегания подземных вод, характер грунтов; особенности растительного покрова) для выделения районов, подверженных эрозионным процессам, пожароопасных участков.

Средствами обнаружения количественных и качественных изменений, входящими в ENVI, на тематических или панхроматических снимках можно находить области, на территории которых произошли изменения.

Функции ENVI, обеспечивающие топографическое моделирование, позволяют вычислять уклоны, виды из заданной точки наблюдения, отмывки рельефа, а также кривизну и выпуклость поверхности по снимкам с данными высот. Дополнительный инструмент классификации по топографическим признакам позволяет классифицировать каждый пиксель по шести классам топографии местности: горы, гребни, перевалы и равнины, каналы и впадины. С помощью ENVI можно создавать отмывки рельефа, совмещенные с цветными снимками, что позволяет придать полученному изображению более реалистичный вид. С помощью инструмента определения зон и линий видимости ENVI Line-of-Sight Calculator можно определять, какие пиксели видимы из заданной точки. Инструменты ENVI, предназначенные для работы с векторами, позволяют преобразовывать векторные контуры высот в регулярные растровые цифровые модели рельефа (ЦМР).

В программный комплекс ENVI встроен язык программирования IDL (Interactive Data Language), с помощью которого можно существенно расширять функциональные возможности программы для решения специализированных задач, создавать

собственные и автоматизировать существующие алгоритмы обработки данных и выполнять пакетную обработку данных.

ENVI имеет интуитивно понятный графический интерфейс, позволяющий начинающему пользователю быстро освоить все необходимые алгоритмы обработки данных.

IDRISI. ГИС IDRISI (Университет Кларка, США) представляет собой растровую ГИС, которая предназначена для анализа пространственной информации, получаемой из различных источников. В состав пакета IDRISI для Windows входит блок обработки данных ДЗЗ, включающий возможности как общей обработки снимков (контрастирование, фильтрация, координатная привязка, создание псевдоцветных композиций, определение NDVI, анализ главных компонент и др.), так и тематического дешифрирования. Для некоторых съемочных платформ существуют специальные способы обработки – в частности, преобразование данных 6-го канала Landsat в температурные показатели. В состав пакета входит мощный модуль анализа растровых карт, в том числе построенных на основе результатов обработки данных ДЗЗ. Пакет имеет развитые возможности ввода и импорта-экспорта данных, а поддержка векторной графики у него довольно слабая.

Оставаясь очень простым в освоении, пакет IDRISI в настоящее время находит широкое применение в небольших по объему обработки данных ДЗЗ-проектах, в основном научно-практического характера. При этом круг пользователей может быть намного шире, если учесть, что по сравнению с другими зарубежными программами стоимость пакета невелика.

MultiSpec. Программный пакет MultiSpec (Университет Пердью, США) предназначен для интерактивной обработки мультиспектральных и гиперспектральных снимков, прост в использовании и распространяется бесплатно по Интернету.

В MultiSpec есть уникальные функции, полезные и при наличии дорогих коммерческих пакетов для обработки снимков. MultiSpec располагает набором алгоритмов для:

- импорта и визуализации изображений разных форматов;
- яркостной коррекции изображений с построением гистограмм;
- трансформирования в заданную систему координат;
- выполнения двух основных типов компьютерной классификации снимков: без обучения и с обучением.

Предлагается два алгоритма классификации без обучения:

- 1) алгоритм быстрого выделения кластеров, который пригоден для быстрого, одношагового разделения многозонального снимка на пространственно однородные области (кластеризации);
- 2) итеративный алгоритм ISODATA.

Для классификации с обучением можно выбрать один из шести алгоритмов:

1. Метод минимального расстояния;
2. Метод линейного дискриминантного анализа Фишера: используется корреляция между значениями яркости в разных спектральных зонах, граница между классами в многомерном поле признаков принимается линейной;
3. Метод максимального правдоподобия;
4. Метод спектрально-пространственной классификации ЕСНО (Extraction and Classification of Homogeneous Objects – распознавание и классификация однородных объектов): учитываются не только спектральные характеристики снимка, но и пространственная однородность создаваемых классов;
5. Метод спектральной корреляции SAM (Spectral Angle Mapper – картографирование спектральной корреляции);
6. Метод «сравнения фильтра» (Matched Filter, на основе СЕМ – Constrained Energy Minimisation, ограниченной/условной минимизации энергии).

Последние два метода используются для классификации гиперспектральных снимков.

MultiSpec занимает мало места на диске, может использоваться на большинстве компьютеров с достаточно ограниченными техническими возможностями. Пакет широко применяется в школьном и университетском эколого-географическом образовании и в других областях.

Программные продукты компании «СканЭкс». Научно-технологический центр «СканЭкс» предлагает пользователям полный цикл программного обеспечения (ПО) для приема, хранения, предварительной и углубленной тематической обработки и интерпретации спутниковых снимков. Предлагаемые программные решения включают ПО управления станциями, ПО предварительной обработки данных, ПО организации архивов данных ДЗЗ, ПО пакетной обработки растровой и векторной информации и линейку коробочных программных продуктов, предназначенных для общей и тематической обработки данных оптической и радиолокационной космической съемки. Коро-

бочные программные продукты могут использоваться вне предлагаемой компанией «СканЭкс» технологии обработки данных.

ScanEx Image Processor представляет собой современную технологию для предварительной и тематической обработки спутниковых снимков и создания конечных продуктов – карт, физических индексов, моделей, а также экспорта данных в ГИС и системы обработки изображений. ScanEx Image Processor состоит из базовой конфигурации и дополнительных подключаемых модулей.

Компанией «СканЭкс» разработана нейросетевая растровая интерпретационная система ScanEx NeRIS, позволяющая применять при обработке исходных данных ДЗЗ как традиционные методы (визуализация, фильтрация, получение новых изображений расчетными методами), так и современные методы, использующие адаптивные алгоритмы на основе искусственных нейронных сетей Кохонена.

Специализированное Windows-приложение MeteoGamma предназначено для обработки в оперативном режиме данных 5-канального радиометра AVHRR. MeteoGamma используется для исследования облачного покрова в оперативной синоптической практике, а также для проведения мониторинга окружающей среды в летний период.

Программный комплекс Sputnik, разработанный Институтом космических исследований РАН (рис. 3.4), имеет следующие характеристики [Возможности построения ..., 2004]:

- работает под единой программной оболочкой;
- имеет объектно ориентированную архитектуру;
- имеет возможность легкого расширения и добавления внешних процедур и модулей обработки данных;
- имеет возможность легко создавать цепочки процедур обработки данных и поддерживать их выполнение;
- обеспечивает работу в полностью автоматизированном режиме;
- обеспечивает возможность удаленного контроля за своим функционированием;
- позволяет проводить разработку отдельных модулей независимыми группами программистов.

В настоящее время комплекс Sputnik позволяет решать различные задачи, возникающие в процессе обработки спутниковых данных. Он позволяет сегодня работать с данными следующих приборов:

- AVHRR – установлен на спутниках серии NOAA;

- MSY-Э – установлен на спутниках серии «Ресурс», «Океан-О», «Метеор-3М»;
- MSY-СК – установлен на спутниках серии «Ресурс», «Океан-О»;
- MODIS – установлен на спутниках серии Terra, Aqua;
- VEGETATION – установлен на спутниках серии SPOT и др.



Рис. 3.4. Окно программного комплекса Sputnik

Основной задачей программного комплекса Sputnik является предоставление современного инструментария для создания, поддержки и развития автоматизированных комплексов обработки космической информации. Для реализации блоков полностью автоматизированной обработки спутниковых данных в программном комплексе Sputnik разработана подсистема создания и поддержки работы макрокоманд (макросов) – представляющих собой последовательность операций, записанных во внешний файл. Основной единицей макроса служит макрооперация – это стандартная операция комплекса, способная работать в автоматическом режиме.

4. ПРИМЕНЕНИЕ ДАННЫХ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ

4.1. Применение данных дистанционного зондирования в картографии

Материалы аэрокосмического зондирования широко применяются в картографии, в особенности – материалы космической съемки, которая, будучи более экономичной, по детальности теперь приближается к аэросъемке. Эти материалы имеют важные преимущества перед другими источниками для составления карт:

- обзорность космических изображений – от глобального охвата до десятков километров при детальной съемке – обеспечивает экономичное картографирование обширных пространств;

- съемка из космоса одной и той же территории с разным разрешением и генерализацией позволяет параллельно создавать и обновлять карты разных масштабов, избавляя от необходимости составлять карты более мелких масштабов по крупномасштабным, что неизбежно удлиняло процесс картографирования;

- центральная проекция, в которой строится изображение, при большой высоте центра проектирования близка к ортогональной, что упрощает фотограмметрическую обработку при создании карт;

- повторные съемки с заданной периодичностью обеспечивают динамическое картографирование и мониторинг быстро меняющихся во времени процессов и явлений;

- обеспечивается картографирование труднодоступных районов – пустынь, болот, высокогорий, полярных островов, Антарктиды, решается проблема съемки других планет и их спутников;

- выразительность и наглядность космических снимков обусловили появление новых видов картографической продукции – фотокарт и спутниковых карт биофизических характеристик земной поверхности;

- комплексное отображение на одном снимке всех компонентов земных ландшафтов способствует наиболее правильной передаче пространственных взаимосвязей картографируемых объектов.

Аэрокосмические снимки нашли в картографии разнообразное применение при составлении и оперативном обновлении топографических карт, создании тематических карт и фотокарт, картографировании малоизученных и труднодоступных районов.

Создание фотокарт. Наглядное, выразительное отображение местности на снимках вызывает естественное стремление использовать эти снимки в дополнение к карте, а иногда и вместо нее. Это привело к созданию особого вида картографической продукции – фотокарт. Фотокарты в сравнительно крупных масштабах, до 1 : 50 000, начали создавать в 1950-х гг., используя материалы аэросъемки. Построить высококачественные фотокарты более мелких масштабов не удавалось, так как мозаичное фотоизображение, смонтированное из многих снимков, было неоднородным, пестрым. Появление космических снимков с большим пространственным охватом и генерализованностью, получаемых в широком диапазоне масштабов и разрешения, вызвало быстрое развитие этого нового вида картографических произведений, весьма разнообразных по содержанию и форме. Высококачественные фотокарты начали составлять в масштабах 1 : 100 000 и мельче. Но производственное изготовление фотокарт стало возможным лишь после накопления фондов снимков обширных территорий.

Массовое получение снимков с первой долговременно работавшей орбитальной станции «Салют-4» завершилось созданием серии фотокарт южных республик бывшего Советского Союза. Через несколько месяцев работы первого американского ресурсного спутника *Landsat* была смонтирована из почти 600 снимков фотокарта США, репродуцированная затем в широком диапазоне масштабов – от 1 : 250 000 до 1 : 5 000 000. Позже по снимкам со спутника *Landsat* созданы фотокарты многих стран и даже континентов.

С появлением новых, более совершенных и детальных снимков возрос интерес к фотокартам туристических объектов, национальных парков. Стала традиционной красочная печать фотокарт из снимков Тематического картографа *Landsat* с впечатыванием на обороте топографической карты того же масштаба. Массовое распространение получили фотокарты городов, созданные по детальным снимкам SPOT.

Цифровая полиграфия и использование цифровых моделей рельефа сделали фотокарты особенно выразительными. Так,

прекрасная серия фотокарт материков создана по снимкам AVHRR/NOAA, с отмывкой рельефа суши и морского дна на основе цифровой модели. Чрезвычайно выразительна созданная по радиолокационным снимкам со спутника Radarsat фотокарта Антарктиды, где контрастное изображение рельефа льда подчеркнуло ледниковые потоки.

Кроме общегеографических создаются специальные фотокарты объектов и явлений, требующих оперативного слежения за их динамикой, – снежного покрова материков, морских льдов Северного полярного бассейна и т. п. Иногда фотокарты дополняют тематической нагрузкой – результатами дешифрирования геологических структур, контурами типов почв. Их можно считать **тематическими фотокартами**.

К фотокартам можно отнести и особые виды спутниковой картографической продукции, получаемой на основе обработки данных съемки путем расчета различных индексов – вегетационного, цветового и др., которые фиксируют распределение, нередко в глобальном масштабе, биофизических характеристик земной поверхности. Наиболее распространены карты вегетационного индекса *NDVI* и цветового индекса вод океана, коррелирующего с содержанием фитопланктона.

Фотоосновы тематических карт. Фотопланы и фотокарты используют в географических исследованиях не только как самостоятельные картографические произведения, но, кроме того, и в качестве фотооснов тематических карт. Математические элементы фотоосновы должны полностью соответствовать требованиям к математическим элементам соответствующих топографических карт (масштаб, проекция, нарезка листов). Картографическая сетка на фотооснове не вычерчивается, а обозначается выходами меридианов и параллелей за внутренней рамкой. Общегеографическая нагрузка должна быть минимальной, чтобы не закрывать фотографическое изображение местности. Картографическими знаками наносят гидросеть, рельеф, крупные населенные пункты и связывающие их важнейшие дороги, политико-административные границы.

Технология изготовления фотооснов включает два этапа:

- фотограмметрическая обработка для изготовления фотоплана;
- картографические работы, включая нанесение на фотоплан общегеографических элементов содержания (при этом со-

вмещают два процесса – дешифрирование снимков и составление основы карты).

Составление и обновление топографических карт. На топографических картах отображаются: рельеф, гидрография, растительность, почвы и грунты, населенные пункты, дорожная сеть, социально-экономические и другие объекты, что позволяет комплексно оценивать территорию. На данный момент на карте мира практически не осталось белых пятен – топографические карты покрывают почти всю поверхность суши нашей планеты, хотя не все они одинаково детальные и значительная часть этих карт не обновляется систематически. Особенно слабо изучены труднодоступные районы высокогорий, пустыни, марши, приполярные острова.

Между тем современный мир очень изменчив (рис. 4.1): растут города, появляются новые поселения, строятся дороги, коммуникационные сети, инженерные сооружения, осваиваются новые районы добычи полезных ископаемых, вырубается леса, изменяется структура землепользования. Поэтому постоянно возникает задача обновления топографических карт. Государственные топографические карты основных масштабов для России уже созданы, составление топографических карт заново требуется реже – только в случае кардинальных изменений, таких как строительство новых городов и крупных сооружений.



Рис. 4.1. Фрагмент топографической карты г. Иркутска, составленной по состоянию местности на 1981 г. (А), спутниковый снимок сверхвысокого разрешения 2010 г. (Б) (по материалам Google Earth): отчетливо читается увеличение зон жилой и дачной застройки, изменение плановых очертаний береговой линии р. Ангары в районе о-ва Конный, появление нового моста через р. Ангару

В качестве первичного материала для топографических карт традиционно использовались аэрофотоснимки. Космические цифровые снимки открывают новые возможности: удешевление повторных съемок, увеличение площади охвата местности и снижение искажений, связанных с рельефом. Кроме того, упрощается генерализация изображения на мелкомасштабных картах: вместо трудоемкого упрощения крупномасштабных карт можно сразу использовать космические снимки среднего разрешения. Поэтому съемки из космоса используются все шире и шире и в перспективе могут стать основным методом обновления топографических карт.

Создание и обновление топографических карт предъявляет к материалам космической съемки повышенные требования в отношении их разрешения и возможности стереообработки. Исходя из графической точности (0,1 мм), снимки для стереофотограмметрической обработки при создании карт масштаба 1 : 100 000 должны иметь разрешение не более 10 м, а для дешифрирования ряда топографических объектов более высокое разрешение – 1–2 м. Для составления топографических карт требуются космические снимки более высокого разрешения, чем для их обновления. Следует учитывать, что при составлении и обновлении топографических карт определенного масштаба одни и те же типы космических снимков могут быть пригодны или непригодны для различных элементов содержания топографических карт.

Снимки Landsat 7 ETM+ и Terra ASTER с размером пикселя 15 м позволяют составлять многие элементы содержания карт масштаба 1 : 200 000 и мельче. Некоторые параметры, например длину, ширину и материал мостов, изображаемых на картах 1 : 200 000, нельзя получать по снимкам, поэтому необходимо привлекать дополнительные источники данных.

Космические фотоснимки используют на всех этапах построения и сгущения фотограмметрических сетей для планового обоснования топографических съемок и высотного обоснования мелкомасштабных съемок. Контурную нагрузку получают при дешифрировании космических снимков, для чего используют богатый опыт дешифрирования аэрофотоснимков. С помощью *цифровых фотограмметрических систем* выполняют автоматические стереоизмерения, строят цифровые модели рельефа и трассируют горизонталы, изготавливают ортофотопланы и графические оригиналы карт.

По космическим снимкам составляют и обзорно-топографические карты, минуя многоступенчатый переход от крупных масштабов к средним и мелким. Есть опыт создания по космическим снимкам и общегеографических карт, например базовой карты страны в масштабе 1 : 2 500 000, составление которой проведено с использованием фотопланов на основе космических снимков масштаба 1 : 1 000 000.

При обновлении карт по снимкам вначале определяют степень устаревания карт и выделяют районы первоочередного обновления, к которым относят территории сельскохозяйственного освоения, интенсивной добычи полезных ископаемых, городского, дорожного, гидротехнического строительства, где обновление приходится выполнять через один-два года, тогда как в малообжитых районах достаточно проводить его через пять–десять лет. От степени устаревания зависит, необходимо ли проводить полное обновление с пересоставлением оригинала карты или можно ограничиться внесением исправлений в издательский оригинал карты камеральным путем.

Применение космических снимков для обновления карт снижает продолжительность и трудоемкость составительских и редакционных процессов. Сокращается время на подбор источников, ознакомление со спецификой территории, упрощается генерализация. Одновременно повышаются детальность и точность карт.

Обновление карт выполняют разными методами. В последнее время получают развитие цифровые технологии. *Обновление карты на фотопланах* осуществляют в тех случаях, когда изменения контуров составляют более 40 % или плановая точность карты не соответствует предъявляемым к ней требованиям. Процесс создания фотоплана включает сгущение опоры, трансформирование снимков, изготовление фотоплана и репродукций к нему, дешифрирование. Обновление на издательских оригиналах, выполняемое в случаях, когда изменяется менее 20 % контуров карты, предусматривает дешифрирование изменений на снимках и перенос их на издательский оригинал карты.

Тематическое картографирование. Космические снимки позволили не только ускорить (процесс) составления и обновления тематических карт, но и открыть новые явления, а также создать новые типы карт. Например, только на космических снимках видны системы облачности, оперативная съемка кото-

рых позволяет метеорологам уточнять прогнозы и следить за опасными стихийными явлениями, например ураганами. Геологи составляют по мелкомасштабным космическим снимкам карты линейных и кольцевых структур, необходимые для разведки полезных ископаемых. На крупномасштабных аэроснимках эти структуры не видны.

Снимки широко используются для обновления геологических, геоморфологических, гидрологических, океанологических, метеорологических, ландшафтных карт, карт почв и лесной таксации и т. д. Для каждого типа тематических карт имеется своя методика составления и обновления по космическим снимкам, использующая в определенном сочетании рисунок снимка и значения яркости в каждой его точке (соответствующие спектральной отражательной способности поверхности, ее температуре или другим характеристикам, в зависимости от типа снимка). Использование космических снимков при составлении тематических карт позволяет отображать большее количество деталей, а значит, приводит к большему соответствию карт природному рисунку.

При тематическом картографировании требования к точности нанесения положения объекта обычно несколько ниже, чем для топографических карт. Поэтому по одним и тем же снимкам можно составлять тематические карты более крупного масштаба. Например, панхроматические снимки, получаемые со спутников IRS с пространственным разрешением 5,8 м, пригодны для создания некоторых элементов содержания топографических карт масштаба 1 : 50 000, а для целей тематического картографирования в зависимости от тематики карт – вплоть до масштаба 1 : 10 000.

Разрешение большей части космических снимков в первые десятки метров соответствует размерам многих объектов земной поверхности. Космические снимки с ресурсно-картографических спутников хорошо отражают рельеф и структуру внешнего покрова Земли – почв и растительности, а следовательно, и ландшафтов, они стали ценным материалом для тематического картографирования.

Особый пласт космического тематического картографирования связан с исследованием экологических проблем и глобальных изменений. Сюда относят и карты обезлесения и опустынивания. Но особенно разнообразны по содержанию глобальные карты со-

стояния атмосферы, тропосферы, радиационных характеристик, озонового слоя, облачности, ветров, океана (топографии его поверхности, температур, биопродуктивности) и мн. др.

В нашей стране наибольший опыт тематического картографирования на основе космической информации накоплен в процессе работы по программе Комплексной картографической инвентаризации природных ресурсов (ККИПР). Созданы серии карт геологического строения, почв, растительности, ландшафтов, использования земель и др. Они отражают современное состояние природных ресурсов, антропогенную нарушенность и загрязнение природной среды, содержат оценку природных условий и ресурсов и дают прогноз ожидаемых изменений. Серии карт созданы для ряда важнейших хозяйственных районов России – Ставрополя, Тверской области, Калмыкии, Прибайкалья, Южной Якутии.

4.2. Применение данных дистанционного зондирования в метеорологии и климатологии

В метеорологии космические методы начали применять раньше, чем в других направлениях изучения Земли. До 1970-х гг. космические снимки получали именно в целях изучения атмосферы и метеорологических процессов, и съемка велась предназначенными для этого метеорологическими спутниками. Они впервые в истории науки дали глобальную картину облачного покрова и наглядно отразили атмосферную циркуляцию, проявленную в структуре облачности. Радиационные измерения со спутников поставляют обширные экспериментальные данные по тепловому балансу Земли. Спутниковые системы изучения глобальных изменений, например EOSAM, ведут наблюдения за водяным паром, аэрозолями в атмосфере, температурой на верхней границе облаков, состоянием озонового слоя и другими параметрами, имеющими экологическое значение. В дополнение к этому спутники выполняют оперативный сбор однородных метеоданных для всей Земли с помощью системы автоматических метеостанций. Поэтому появление метеоспутников радикально расширило возможности развития глобальной и региональной климатологии.

Наблюдения за облачностью. Данные спутниковых наблюдений за облачностью продолжают вызывать особый интерес, поскольку облачность является чувствительным и нагляд-

ным индикатором погодообразующих процессов и условий погоды. Процесс дешифрирования космических изображений облачности имеет важное значение: при правильной идентификации облачности можно определить положение циклонов и антициклонов, связанных с ними атмосферных фронтов, центров завихренности; установить стадию барических образований, определить их эволюцию, предвидеть циклогенез и т. п.

Облачность циклонических возмущений, антициклонов и гребней. Форма и структура облачности циклонических образований на ИК-снимках очень разнообразны. Они зависят от географической широты, характера атмосферных процессов, характера подстилающей поверхности (рельефа, термической однородности) и других факторов.

Но при всем многообразии рисунка облачных полей циклонов они имеют некоторые черты, которые позволяют определить, какой стадии развития циклона соответствует то или иное облачное образование и к каким широтам (тропическим или средним) они относятся.

Развитие внетропического циклона и эволюция его облачного поля разбиты на ряд стадий: волны, молодого циклона, циклона максимального развития, окклюдирующегося циклона, окклюдированного циклона, циклона в стадии заполнения.

По мере развития циклона происходит преобразование облачности (рис. 4.2), вызванное перестройкой термобарического поля, которое сопровождается изменением вертикальных движений воздушных масс. Утолщение фронтальной облачной полосы с прогибом в сторону холодного воздуха на стадии волны по мере развития циклона приобретает очертания фронтальной системы молодого циклона. Наступающий процесс окклюдирования приводит к сближению облачных полос теплого и холодного фронтов и образованию облачной спирали фронта окклюзии, которая по мере окклюдирования циклона все больше закручивается. Окклюдированному, заполняющемуся циклону соответствует или хорошо закрученная спираль из слоистообразной облачности темно-серого и серого тона изображения, или несколько сходящихся к центру узких облачных спиралей кучевообразной облачности светло-серого и белого тона изображения.

Имеют свои особенности и облачные образования орографических циклонов (например, Северного Кавказа, юга Скандинавии), местных (термических) циклонов, возникающих под

влиянием неоднородности поля температуры подстилающей поверхности (например, зимой над Черным, Каспийским, Балтийским морями), средиземноморских циклонов.

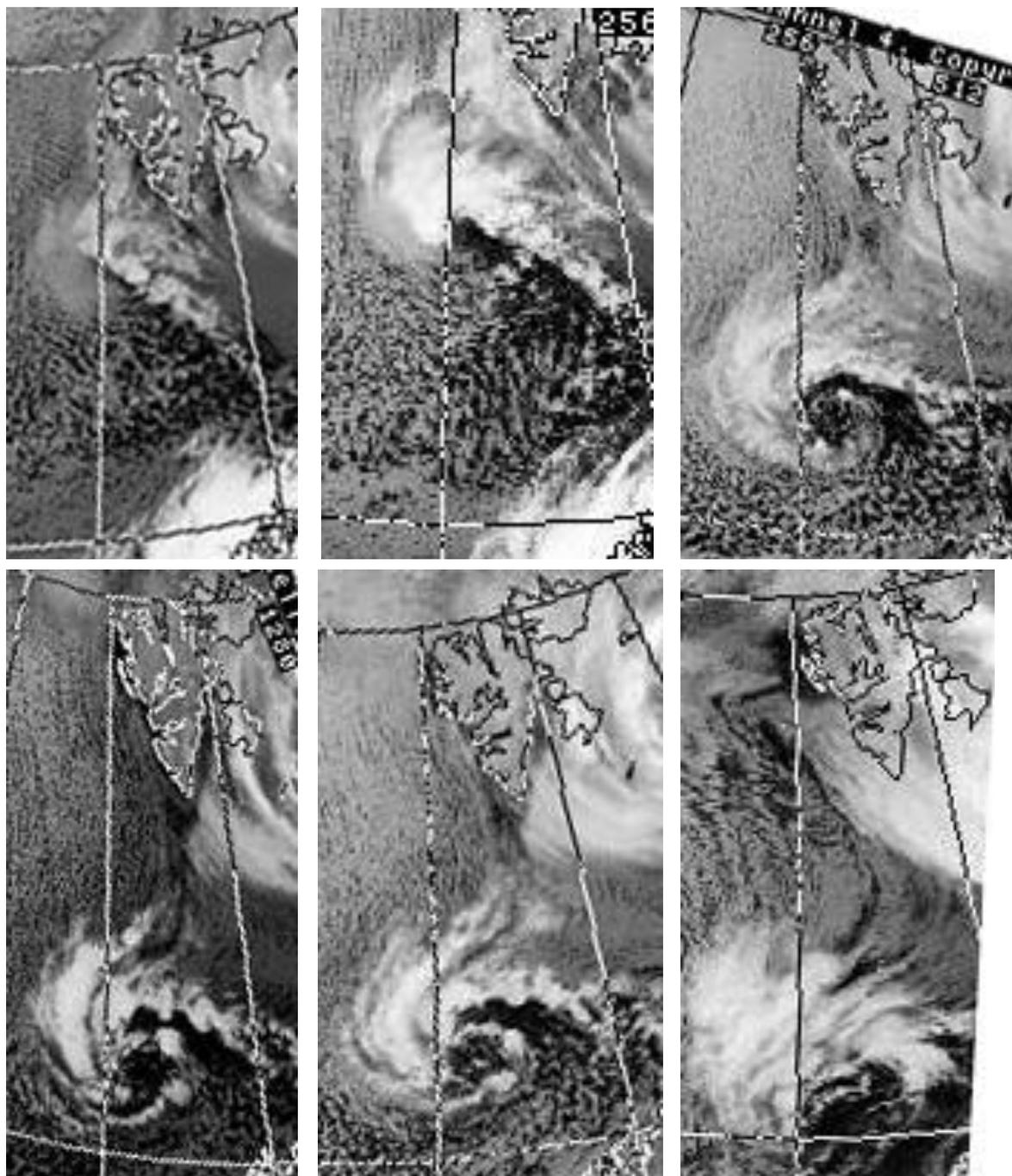


Рис. 4.2. Развитие циклона от зарождения до разрушения на серии спутниковых снимков AVHRR

В антициклонах и гребнях, как правило, наблюдаются внутримассовые облака нижнего яруса и вертикального развития или малооблачная погода.

Зимой над континентом и в антициклоне, сформированном в холодном воздухе, – ясно, над теплой морской поверхностью

или теплой сушей преобладают открытые конвективные ячейки или гряды. В теплое время года в хо-лодных антициклонах могут образовываться конвективные мезовихри.

В антициклонах, сформированных в теплых воздушных массах, характер облачного поля зависит от соотношения температуры подстилающей поверхности и воздушной массы. При равенстве или незначительном различии этих температур в антициклоне наблюдается малооблачная погода, при значительной отрицательной разности (температура подстилающей поверхности ниже температуры воздуха) в антициклонах наблюдаются туманы, слоистообразные и слоисто-кучевообразные облака.

Анализ фронтальных облачных полос на космических изображениях. С облачными вихрями вплотную связаны облачные системы атмосферных фронтов, изображаемые на снимках в виде светлых полос различной ширины, протяженности, яркости и структуры. Анализ карт облачности, карт погоды и барической топографии показал, что фронтальные разделы часто прослеживаются в поле облачности значительно дольше, чем в поле других элементов. При этом внешний вид облачности и конфигурация облачной полосы часто позволяют определить вид фронта на снимке. Это обстоятельство может служить основой для уточнения анализа синоптического положения в конкретном районе.

Облачные полосы **холодных фронтов** (рис. 4.3) имеют четкую структуру в виде яркой полосы шириной 200–300 км и длиной более 1000 км, очень часто с вкраплениями округлых ярких пятен с резко очерченными краями. Полосы формируются из слоисто-дождевой облачности и отдельных скоплений кучево-дождевых облаков. Обычно они имеют однородный тон изображения, на фоне которого четко прослеживаются вкрапления округлых ярких пятен облаков вертикального развития.

Для активных холодных фронтов характерно изображение в виде непрерывной хорошо развитой облачной полосы. Для фронтов с пониженной активностью облачная полоса обычно менее широкая, с отдельными разрывами контура.

Очень часто облачные полосы холодного фронта бывают отделены безоблачными зонами от предфронтальной и зафронтальной облачности. На снимках, которые получены для теплого периода года, перед фронтальной зоной на некотором расстоянии от основной облачной полосы очень часто видны гряды кучево-

дождевых облаков, расположенные параллельно фронту. За фронтом иногда могут наблюдаться скопления кучевых облаков, сформированных в ряды, ячейки или ансамбли, не имеющие определенной структуры. Такие облака являются результатом конвекции. Для облачных зон холодных фронтов характерна заметная циклоническая кривизна (прогиб в сторону теплого воздуха).

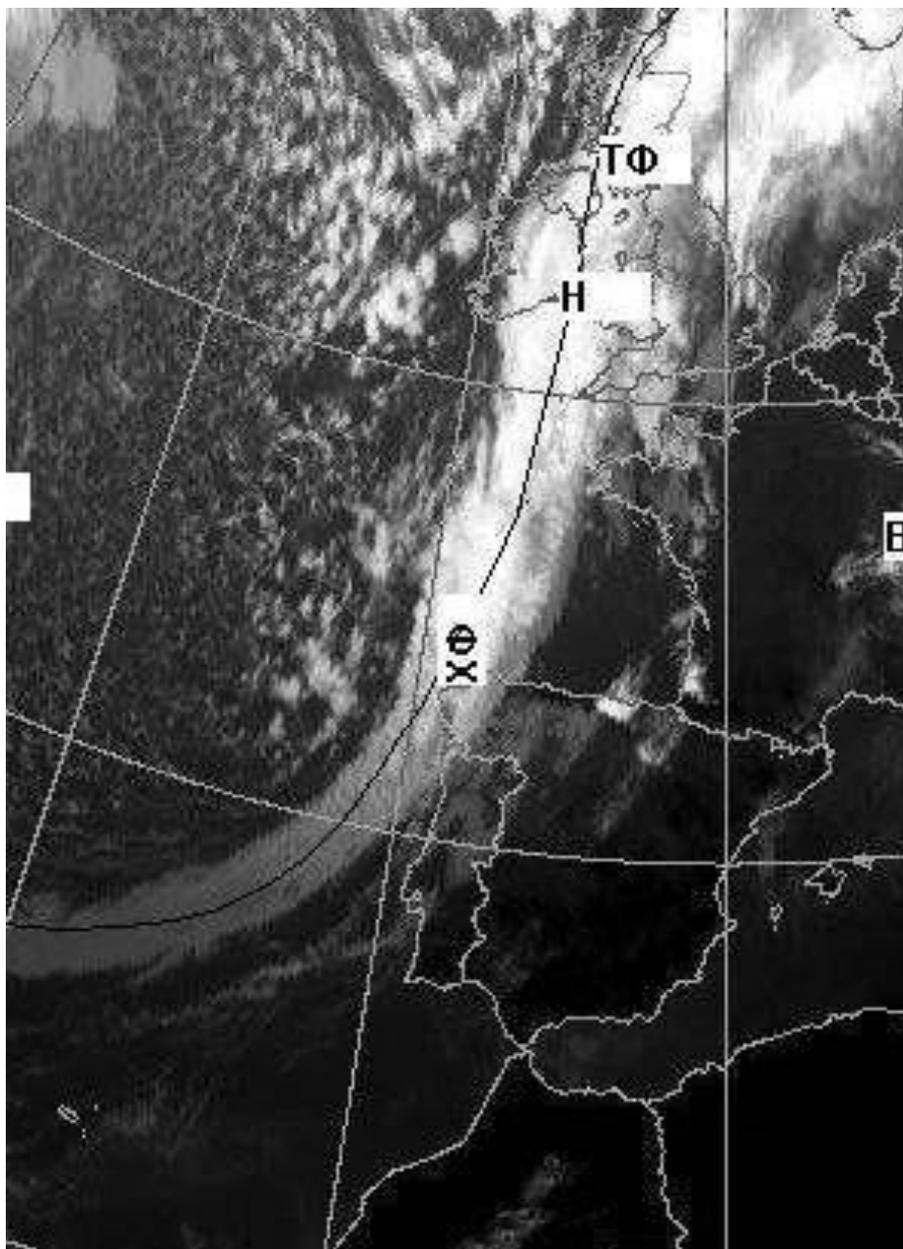


Рис. 4.3. Холодный фронт (ХФ) и теплый фронт (ТФ)

Теплый фронт (см. рис. 4.3), как правило, хорошо выражен в поле облачности лишь в начальных стадиях развития циклона, поэтому распознавание этих фронтов на снимках гораздо сложнее, чем холодных. Изображение облачности теплого фронта на

ИК-снимках отличается большим разнообразием размеров и рисунков облачного покрова. Наиболее типичной для теплого фронта является облачная зона характерного полосного строения шириной 300–500 км и длиной от нескольких сотен до тысячи километров, причем длинные облачные полосы на теплых фронтах встречаются редко.

Облачная полоса, соответствующая теплему фронту, в процессе окклюдирования сливается с облаками холодного фронта. Обычно облачная зона на теплом фронте размывается, и на снимках бывает виден лишь незначительный выступ у точки окклюзии, соответствующий ранее существовавшей облачной полосе теплого фронта. В то же время холодный фронт остается очень четко выраженным.

Облачная зона теплого фронта имеет антициклоническую кривизну и выгибается в сторону холодного воздуха. Облачная полоса этого фронта сформирована из однородной слоисто-дождевой облачности. На снимках, полученных в летнее время, очень часто могут наблюдаться отдельные образования кучево-дождевых облаков. Ширина фронтальной облачной полосы на всем ее протяжении неодинакова. Там, где происходит развитие волны и циклона, она расширена, в области тыловых гребней – сужена и размывта. Размытые теплые фронты иногда бывают видны на снимках в виде полос перистой облачности. Отличительной чертой облачности теплого фронта является резкая, часто с округлыми очертаниями, тыловая ее граница и изрезанная передняя граница, где отдельные облачные валы и удлиненные просветы располагаются параллельно основной облачной полосе.

Перед облачной зоной теплого фронта в холодном воздухе могут наблюдаться мелкие, беспорядочно разбросанные облака кучевых форм, за фронтом в теплом воздухе – облака конвекции. Эти облака характерны в основном для летнего времени, они свидетельствуют о неустойчивости и высоком влагосодержании теплого воздуха. Исследования показывают, что положение облачной полосы теплого фронта обычно хорошо согласуется с положением приземной ложбины. При этом линию фронта у поверхности Земли следует проводить вблизи внутреннего края облачной полосы.

Облачная зона, соответствующая *фронту окклюзии* (рис. 4.4), представляет собой плотную (яркую) облачную полосу шириной

около 300 км. Обычно она имеет форму спирали, напоминающую внешним видом гигантскую запятую, вершина которой находится в центре циклонической циркуляции на уровне облачности.

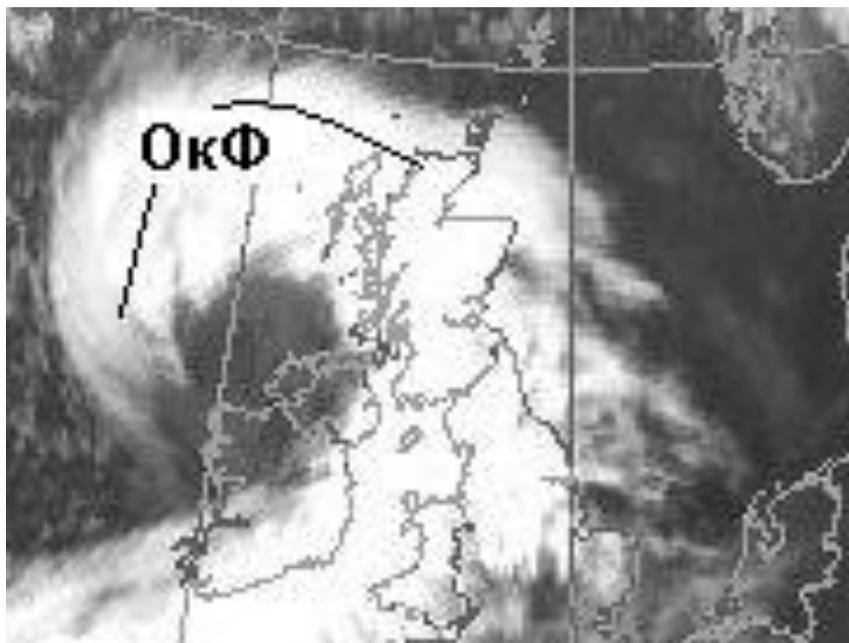


Рис. 4.4. Фронт окклюзии (OkF)

Для облачной спирали характерна резко очерченная внутренняя (тыловая) граница, за ней наблюдается безоблачная или малооблачная полоса, причем на некотором расстоянии от нее могут быть видны облака кучевообразных форм в виде гряд, конвективных ячеек или скопления облаков, не имеющих четкой структуры. В отличие от внутренней границы облачной полосы фронта окклюзии, внешняя (передняя) граница более расплывчатая, часто изорванная. Облачная полоса в этом случае состоит из отдельных валов облаков, которые чередуются с просветами, причем те и другие вытягиваются вдоль направления основной облачной полосы.

Линия фронта окклюзии у поверхности Земли расположена в пределах облачной полосы. Если облачная полоса имеет резкую внутреннюю границу, то фронт окклюзии находится в тыловой части облачной спирали; если же внутренняя граница является более аморфной, фронт окклюзии у поверхности Земли смещается к центральной части облачной полосы. Облачная система окклюзии часто переходит в облачную систему холодного фронта без заметного раздвоения на облачность холодного и теплого фронтов. Иногда положение точки окклюзии можно

определить по небольшому выступу с правой стороны облачной полосы. Этот выступ представляет собой остатки облачности теплого фронта. Исследование облачных полос фронтов окклюзии показывает, что на синоптической карте облачной спирали этого фронта соответствует передняя часть циклона. Со временем фронт окклюзии может трансформироваться в холодный, теплый или стационарный фронт. В этом случае облачная полоса начинает приобретать характерные признаки и конфигурацию соответствующих облачных систем.

Существует определенное соответствие между изображением поля облачности и *характером синоптических процессов*. На снимках оно проявляется достаточно четко: циклонам в разных стадиях развития, атмосферным фронтам разного типа, антициклонам, тыловым частям циклонов и другим барическим образованиям соответствуют облачные поля определенной структуры, характеризующей атмосферный процесс.

Каждому из атмосферных возмущений синоптического масштаба (циклоны и антициклоны, ложбины и гребни, струйные течения и фронтальные разделы) соответствует облачное поле вполне определенной структуры, но варьирующей в зависимости от конкретных термодинамических условий. Именно эти вариации характера облачного поля дают представление о деталях синоптических процессов.

В основу анализа снимков облачности положены два тезиса. Первый тезис: облачность не появляется беспричинно, она возникает при благоприятной для этого синоптической обстановке. Поэтому присутствие облаков над какими-либо участками земной поверхности не следует рассматривать как случайное малозначащее явление. Второй тезис: тенденция развития синоптического процесса обнаруживается в поле облачности раньше, чем ее признаки появляются в полях метеоэлементов. Поэтому изменение облачного покрова свидетельствует об эволюции полей метеоэлементов.

На снимках удастся обнаружить характерную облачность теплой адвекции или возникающего циклона раньше, чем их признаки проявляются на синоптической карте или картах барической топографии. С помощью снимков с искусственных спутников Земли определяется ее структура, размеры и другие характеристики. Подобный анализ облачных образований делает прогноз более точным.

Проведение синоптического анализа на основе космических снимков заключается в следующем:

- по фронтальным облачным полосам восстанавливается положение при-земных атмосферных фронтов и устанавливается тип фронта, его активность, скорость перемещения (быстро или медленно перемещается фронт);

- определяются положение центров циклонической циркуляции (вершины волновых возмущений, центры основных и частных циклонов) и стадии развития циклонов;

- проводятся изобары с учетом установленных на первом и втором этапах анализа типов фронтов, скорости их перемещения, стадии развития циклонических возмущений и структуры поля внутримассовой облачности;

- после восстановления синоптической ситуации составляется прогноз эволюции и перемещения облачных образований и связанных с ними синоптических объектов.

Использование спутниковых данных для прогнозирования метеорологических условий. Космические снимки облачности используются как для анализа синоптического положения, так и для прогноза облачности и зон осадков. Анализ облачности по снимкам проводится одновременно с анализом метеорологических данных на синоптических и барических картах.

Прогноз количества осадков является одной из наиболее сложных задач при соответствии прогноза погоды. Снимки облачного покрова широко используются как дополнительная, а над районами, малоосвещенными данными наблюдений, как основная информация для оценки синоптической обстановки и возможных условий погоды.

Типы облачности, различаемые на спутниковых снимках, не полностью соответствуют тем формам облаков, которые наблюдают метеорологи с Земли. Различия в масштабах обзора вносят различия и в определение облачных форм. На снимках метеорологических спутников в силу недостаточной разрешающей способности аппаратуры видны не отдельные облака, а их скопления, поэтому в название вида облачности по спутниковому снимку входит более обобщенное понятие. Например, слоистая облачность включает в себя все формы слоистообразных облаков.

Вместе с тем идентичность в определении по спутниковым снимкам и по наблюдениям с Земли тех форм облаков, из кото-

рых выпадают осадки, достаточно велика, и это дает основание использовать снимки облачного покрова для анализа и прогноза зон осадков. Осадки выпадают в тех местах, где на снимках видна облачность кучево-дождевых и слоистых форм, а также облачность, которая представляет собой сочетание кучево-дождевых облаков со слоистыми. При этом, если из облаков такого вида выпадает дождь, то обязательно присутствуют перистые облака. Снег может выпадать при их отсутствии.

Вероятность выпадения осадков из облаков перечисленных видов определяется линейными размерами отдельных облаков, различимых на снимке, и их количеством, т. е. степенью закрытия облаками земной поверхности. Повторяемость выпадения дождя возрастает по мере увеличения размеров и общего количества облачности.

Вопрос о возможности обнаружения зон, где выпадает большое количество осадков, представляет практический интерес. Дожди, когда количество осадков за 12 ч превышает 10 мм, явление важное, а иногда и опасное. Определение положения зон таких осадков – одна из основных задач синоптика. Решению этой задачи могут помочь снимки облачного покрова, полученные с метеорологического спутника.

В большинстве случаев осадки бывают связаны с тремя основными облачными системами: облачными вихрями, полосами и облачными массивами, которые имеют нерегулярную форму. Для летних осадков характерна еще одна облачная система, которая представляет собой скопление изолированных кучевообразных облаков. Практически из всех облачных систем, которые имеют форму вихрей и полос, выпадают дожди.

Определение верхней границы облаков. Для определения высоты верхней границы облаков используют сведения о температуре верхней границы. Эта температура определяется по данным измерений уходящего излучения в окне прозрачности атмосферы. Высота верхней границы облаков по данным спутниковых наблюдений определяется с точностью до 1 км. Восстановление характеристик облачного покрова осуществляется по спутниковым данным в видимой и инфракрасной областях спектра.

Для обеспечения высокого качества измерений облачного покрова осуществляются взаимные калибровки аппаратуры разных спутников при их одновременной эксплуатации, а также данные наземных метеорологических станций.

Исследование вертикальных профилей атмосферы. К важным достижениям космического дистанционного зондирования относится оперативное определение вертикальных профилей атмосферы (температура, влажность и др.). Для исследования поля вертикальных профилей атмосферы на спутниках серии NOAA установлена аппаратура TOVS (TIROS Operational Vertical Sounder). Радиометр TOVS представляет собой комплекс из трех независимых систем, данные которых могут быть использованы для восстановления вертикальных профилей температуры, влажности воздуха, поля ветра, концентрации озона и других параметров.

Результаты спутниковых исследований вертикальных профилей атмосферы представляют значительный интерес для метеорологии и авиации. Данная информация необходима при построении численных моделей погоды, контроля многолетних глобальных температурных изменений, при изучении взаимосвязи климата с параметрами атмосферы, уточнении численных моделей атмосферы. Кроме того, эта информация может быть использована для определения структуры высотных ветров (геострофических ветров), которая в свою очередь является основой штормопредупреждения и прогнозирования опасных приповерхностных ветров. Также важно дистанционное определение температуры и влажности в приземном слое и на различных высотах над поверхностью с точки зрения мониторинга лесных пожаров.

Альтернативным методом получения вертикальных профилей атмосферы является аэрологическое зондирование с помощью радиозондов – миниатюрных метеостанций, поднимаемых баллонами в воздух и снабженных радиопередатчиками. Данные о передвижении радиозонда помогают определить скорость и направление ветра. задача дополнения данных аэрологического зондирования спутниковыми данными достаточно актуальна. Также представляет интерес сравнение спутниковых данных и данных аэрологического зондирования. Решение такого рода задач – необходимая часть дистанционных исследований, которые нуждаются в постоянной проверке их достоверности, точности, надежности.

4.3. Применение данных дистанционного зондирования в океанологии

Космические методы позволяют перейти от наблюдений в отдельных точках морей и океанов (обеспечиваемых буйковыми или судовыми методами) к глобальному охвату. При этом регистрируются в основном косвенные показатели, и необходимо изучение их связи с исследуемыми явлениями.

Съемка поверхности океана в тепловом ИК-диапазоне только открыла возможность изучения глобального распределения температур и позволила визуализировать течения, динамику океанических вод, океанические фронты, вихри, приливы, волны цунами, апвеллинги. Выявлена динамическая структура океана, прежде представлявшегося инертной водной массой. Измерения уровня океана с помощью спутниковой радиоальтиметрии способствуют определению топографии поверхности с точностью 2–3 см. Анализ топографии поверхности позволил составить карты рельефа дна Мирового океана. Спутниковые скаттерометры фиксируют волнение и дают возможность составлять глобальные карты приповерхностных ветров. С помощью многоканальных спектрометров видимого диапазона составляют карты цветового индекса, коррелирующего с концентрацией хлорофилла фитопланктона, что важно для изучения биопродуктивности океана. Со спутников ведут комплексные исследования мелководного шельфа, осуществляют мониторинг морских льдов, наблюдение за загрязнением поверхности.

Уровень моря. Спутниковая радиоальтиметрия дала возможность получения глобальной десятидневной картины топографии поверхности океана с точностью до 2 см. Это позволяет определять отклонения уровня водной поверхности от геоида, исследовать мезомасштабную и крупномасштабную циркуляции океанов и морей, обнаруживать разрушительные волны цунами задолго до их приближения к берегу, следить за приливами в зонах континентальных шельфов, штормовыми нагонами и деформациями уровня, связанными с западными пограничными течениями и их меандрами.

Радиолокатор альтиметрического спутника измеряет время прохождения радиосигнала от спутника до поверхности океана и обратно. На основе полученных значений и точных данных об орбите вычисляют высоту поверхности океана как разность ме-

жду высотой орбиты и высотой спутника над поверхностью океана (рис. 4.5). Сегодня спутниковые альтиметрические измерения высоты морской поверхности при точности 2–3 см дают пространственное вдольтрековое разрешение 5–7 км с периодичностью 3–35 суток.

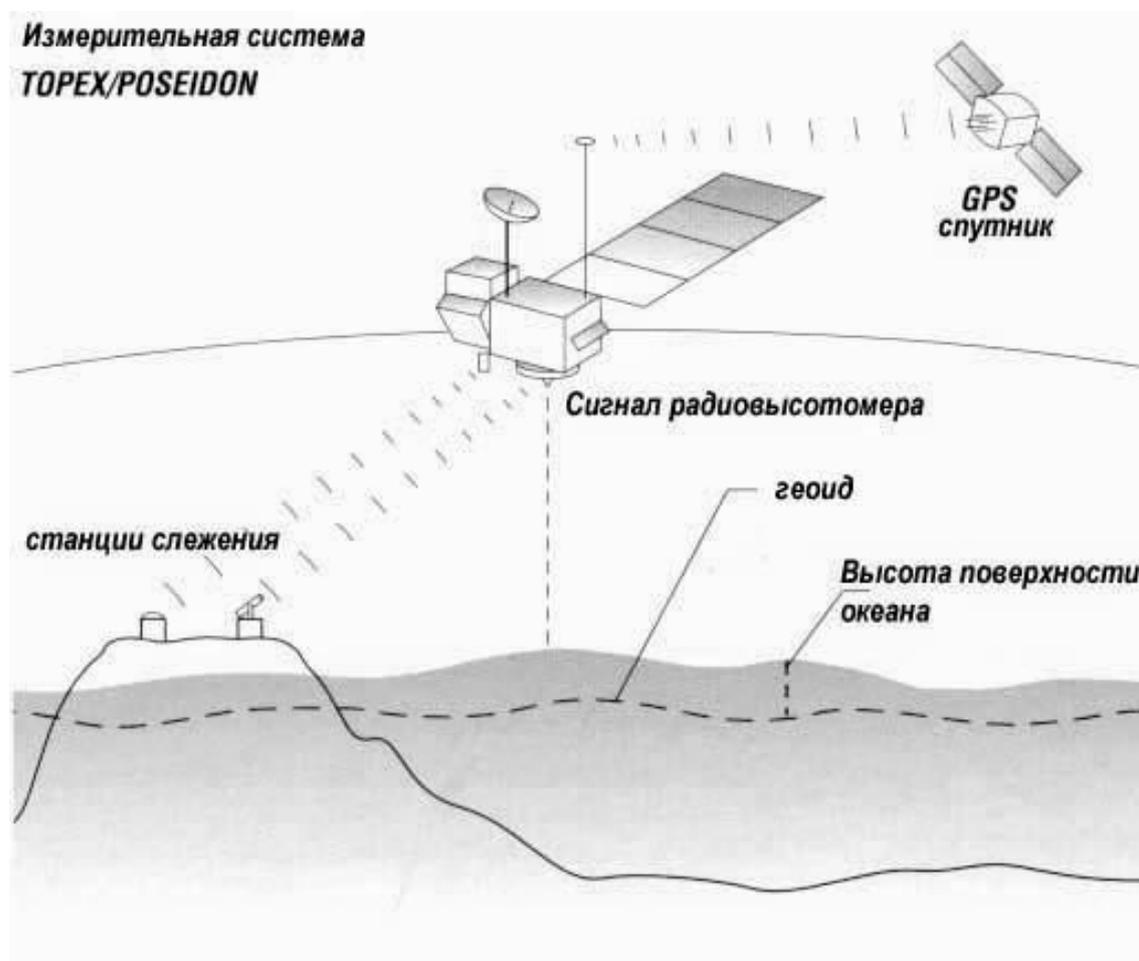


Рис. 4.5. Схема работы альтиметра TOPEX/Poseidon
[Интернет-семинары ..., 2013]

Мониторинг уровня океанов, морей, крупных внутренних водоемов, высоты ветровых волн в различное время осуществляется с помощью альтиметров, установленных на спутниках TOPEX/Poseidon (1992–2006), Jason-1 (2001–2013) и др. Эти системы являются совместным проектом НАСА и Национального центра космических исследований Франции. В июне 2008 г. по этой программе на орбиту был запущен очередной спутник, Jason-2, главная цель которого – поддержание непрерывности мониторинга уровня Мирового океана, начатого спутниками TOPEX/Poseidon и Jason-1. На 2015 г. планируется запуск спутника Jason-3. Альтиметрические спутники имеют не-

обычное наклонение их орбит (66°), которое позволяет осуществлять съемку 95 % свободной, не покрытой льдами поверхности Мирового океана.

Кроме перечисленных выше спутников, также существенный вклад в изучение топографии поверхности океана внесли спутники Seasat (1978), GEOSAT (1985–1988), ERS-1 (1991–1996), ERS-2 (1995–2011). У спутников Seasat, ERS-1 и ERS-2 дополнительно имелся инструментарий для измерения параметров ветра, волнения и т. д., а GEOSAT – преимущественно альтиметрический спутник.

Рельеф дна. Подводный рельеф из космоса можно наблюдать и фиксировать на снимках в видимом диапазоне в редких случаях: неперенные условия – высокая прозрачность воды и штилевая погода. Водная толща ослабляет яркость, контрастность и четкость наблюдаемых подводных объектов: интенсивность проникающего в воду солнечного излучения падает, а спектральный состав изменяется; инфракрасное излучение полностью поглощается поверхностными слоями воды. В прозрачных водах, когда практически отсутствуют взвеси и фитопланктон, красные лучи проникают на глубину до 10 м, желтые – на глубину 20 м и только сине-голубые лучи достигают глубины 50 м, где интенсивность света уменьшается в 100 раз. На больших глубинах дно солнечным светом практически не освещается. Таким образом, просматриваемая зона ограничивается небольшими глубинами – до 20 м в водах средней прозрачности (например, в Черном, Каспийском морях) и до 40 м в прозрачных водах (например, в Карибском море). Поэтому космические снимки обеспечивают изучение рельефа дна лишь в зоне мелководного шельфа.

На космических снимках в видимом диапазоне хорошо отображается строение дна в мелководной зоне, отчетливо выделяются отмели и банки, лагуны внутри атоллов; видны формы донного рельефа: вдольбереговые валы, бары, гряды, приливные дельты, русла палеорек, эрозионные ложбины, карстовые воронки, коралловые рифы и др. Для такого изучения оптимальна многозональная съемка. Поскольку лучи разных спектральных диапазонов способны проникать в водную толщу на разную глубину, серия зональных снимков обеспечивает разноглубинные срезы дна и водной толщи, что открывает перспективы использования многозональных снимков для батиметрического и тематического картографирования мелководного шельфа.

Хорошие возможности для изучения и батиметрического картографирования мелководий в ряде случаев дает радиолокационная съемка (рис. 4.6).



Рис. 4.6. Эстуарий р. Эльбы во время отлива на радиолокационном изображении спутника «Алмаз»: хорошо видна древовидная структура сточных желобов и каналов [Интернет-семинары ..., 2013]

В конце 60-х гг. первые наблюдения подводной топографии в мелководных морях с помощью радиолокатора бокового обзора (РЛСБО) с самолета были проведены в Северном море. Во время полета океанографического спутника Seasat в 1978 г. была впервые показана возможность регистрации элементов подводного рельефа с помощью радиолокатора SAR и получены радиолокационные изображения подводных песчаных банок. Поверхностные проявления, связанные с подводной топографией, наблюдались также на радиолокационных снимках, полученных спутниками «Космос-1870», ERS-1 и «Алмаз». Проведенные исследования показали, что космический радиолокатор дает дополнительную возможность обстоятельного и детального исследования донного рельефа мелководных участков шельфа. Механизм проявления подводной топографии на радиолокационных изображениях связан с обтеканием приливным течением форм донного рельефа (например, песчаных банок); вариации течения при обтекании банок модулируют короткие ветровые волны на морской поверхности.

Подводный рельеф на радиолокационных снимках наблюдается именно в приливных морях и необходимым условием его наблюдения является сильное приливное течение и ветровое волнение на поверхности. Космический радиолокатор дает уникальную возможность исследования донного рельефа мелковод-

ных участков шельфа с глубинами 5–40 м. Другими средствами дистанционного зондирования такую информацию в условиях повышенной мутности приливных вод получить практически невозможно. В приливно-отливной зоне шельфа во время отлива на снимках выделяются основные морфоструктуры и особенности геолого-геоморфологического строения дна, что позволяет оценить интенсивность прибрежных процессов.

Косвенно информацию о подводном рельефе можно получить, исследуя эффекты рефракции длинных волн в прибрежной зоне и над отдельными формами подводного рельефа, а также изучая внутренние волны и их поверхностные проявления в шельфовой зоне, особенности генерации, распространения и диссипации которых часто связаны с крупномасштабными формами подводного рельефа.

Данные об уровне моря и топографии поверхности океана используются для восстановления картины рельефа дна океана: уже первые опыты радиопрофилирования с орбитальной станции Skylab (1973) показали связь топографии водной поверхности с рельефом морского дна. Радиолокационная система спутника Seasat вместе с радиовысотомером подтвердила предположение о существовании сложного рельефа поверхности океана, обусловленного как неравномерностью распределения масс внутри земного шара, так и неровностями рельефа морского дна. Над возвышением дна высотой 3,2 км поверхность поднимается примерно на 1 м. По альтиметрическим данным со спутников Seasat, ERS, обеспечивающим определение топографии поверхности с точностью 5–10 см, по картам рельефа морской поверхности восстановлены крупнейшие черты донного рельефа и составлена карта рельефа дна Мирового океана (рис. 4.7).

Поверхностные волны. Ветровое волнение и зыбь постоянно видоизменяют состояние поверхности моря, влияя на формирование поверхностных признаков других явлений в океане. Для их регистрации и наблюдения возможно применение систем, работающих как в видимом диапазоне (рис. 4.8), так и в микроволновом радиодиапазоне.

Длинные поверхностные волны хорошо различимы на радиолокационных снимках в основном из-за наличия на их поверхности коротких гравитационно-капиллярных волн, которые модулируются орбитальным движением, формой волны, а также локальным ветровым потоком вдоль профиля волны.

На радиолокационных снимках можно выделить различные системы волн, распространяющихся в разных направлениях, наблюдать рефракцию волн на мелководье и интерференцию за препятствиями, иногда отдельные пятна и полосы пены, прибойную зону и другие детали. Методами спектрального анализа по радиолокационным изображениям можно определять важные параметры морского волнения: длину волны и направление распространения, а также количество систем волнения. На различных стадиях развития волнения картина взволнованной поверхности, изменяясь во времени и в пространстве, меняет и структуру изображения, это позволяет при помощи дистанционных средств контролировать эти изменения.

Приводный (приповерхностный) ветер. Информация о скоростях и направлении ветра имеет первостепенное значение при изучении взаимодействия океана и атмосферы, циркуляции океанических вод и их влияния на погоду и климат Земли. Эти же данные необходимы и при изучении таких явлений в океане, как эль-ниньо.

Данные о скоростях и направлении приповерхностного ветра необходимы для уточнения прогнозов погоды, выявления зарождающихся ураганов, тропических циклонов, прослеживания путей их следования, расчета интенсивности штормов на море; они используются в навигации для прокладывания курсов судов и при планировании работ на нефтепромыслах в шельфовой зоне. Во всех случаях информация о ветрах, ежедневно получаемая из космоса, оказывается значительно более дешевой и оперативной, чем получаемая наземными методами.

Поле приводного ветра над океаном (скорость и направление ветра у поверхности) может быть измерено микроволновыми скаттерометрами. Принцип скаттерометрии (рис. 4.9) основан на том, что радиолокационная система скаттерометра посылает микроволновые импульсы и принимает отраженный от поверхности сигнал. Зондирующий радиоимпульс, направленный под углом к морской поверхности, рассеивается из-за ее шероховатости, обусловленной ветровыми волнами, которые тем выше, чем сильнее ветер. Таким образом, часть отраженного сигнала, принимаемая радаром, хорошо коррелирует со скоростью приводного ветра, и по величине коэффициента обратного рассеяния определяется скорость ветра, а по его зависимости от азимутального угла (угол между направлением движения и положением оси антенны) определяется направление ветра.

Первый скаттерометр был установлен на борту американского спутника SeaSat (1978 г.), он впервые показал возможность измерения скорости ветра из космоса. Однопроходный скаттерометр, имевший трехантенный радар, работал на борту европейского спутника ERS-1 с 1991-го по 1996 г. В 1996 г. НАСА и Национальным космическим агентством Японии был выведен на орбиту спутник ADEOS (Advanced Earth Observing Satellite), имевшим на борту скаттерометр NSCAT, обеспечивавший получение данных о приводном ветре с разрешением 50 км на протяжении 9-ти месяцев 1996–97 гг.

В июне 1999 г. НАСА был запущен спутник QuikScat, имевший на борту новый скаттерометр SeaWinds. В зону его видимости попадало 90 % территории Мирового океана, не покрытой льдом, таким образом пути атлантических и азиатских тропических циклонов прослеживались дважды в сутки, что позволяло существенно повысить точность определения их траектории и прогноза интенсивности. В 2009 г. QuikScat выработал свой ресурс и закончил свою миссию. Аналогичный скаттерометр SeaWinds был установлен на борту спутника ADEOS-II, работавшего на орбите с декабря 2002 г. по октябрь 2003 г.

Сейчас продолжает функционировать скаттерометр ASCAT (Advanced Scatterometer), установленный на борту европейского метеорологического спутника MetOp-1 (Meteorological Operational), который был выведен на орбиту 10 октября 2006 г. Он представляет собой усовершенствованную модель скаттерометра AMI.

В 2009 г. запущен на рабочую солнечно-синхронную орбиту индийский спутник Oceansat-2, оснащенный в том числе микроволновым сканирующим скаттерометром SCAT (Scanning Scatterometer), который также позволяет определять скорость и направление ветра у морской поверхности.

В настоящее время точность измерения скорости ветра скаттерометрами не превышает 1,7 м/с, а направления – 17°. Пространственное разрешение современных скаттерометров составляет 25 км и ниже.

Данные о приповерхностных ветрах над любыми участками Мирового океана, получаемые с космических скаттерометров, как во времени, близком к реальному, так и архивные, размещаются в сети Интернет на сайте Remote Sensing Systems (<http://www.remss.com>) (рис. 4.10) и других ресурсах.

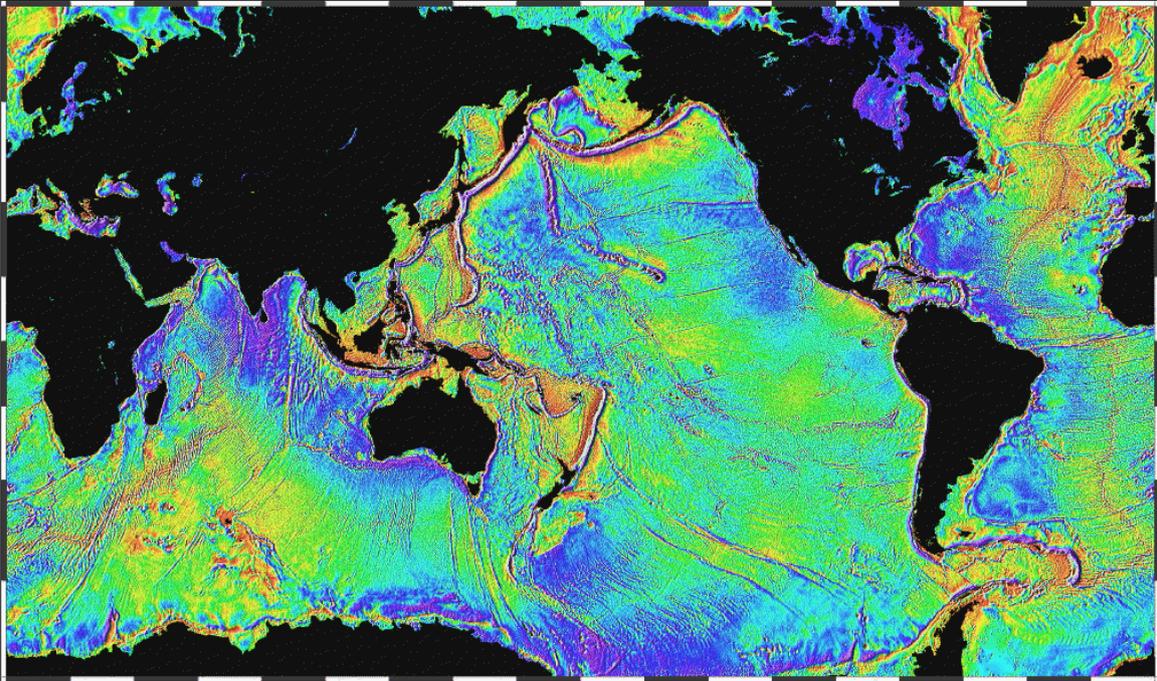


Рис. 4.7. Карта рельефа дна Мирового океана [Интернет-семинары ..., 2013]

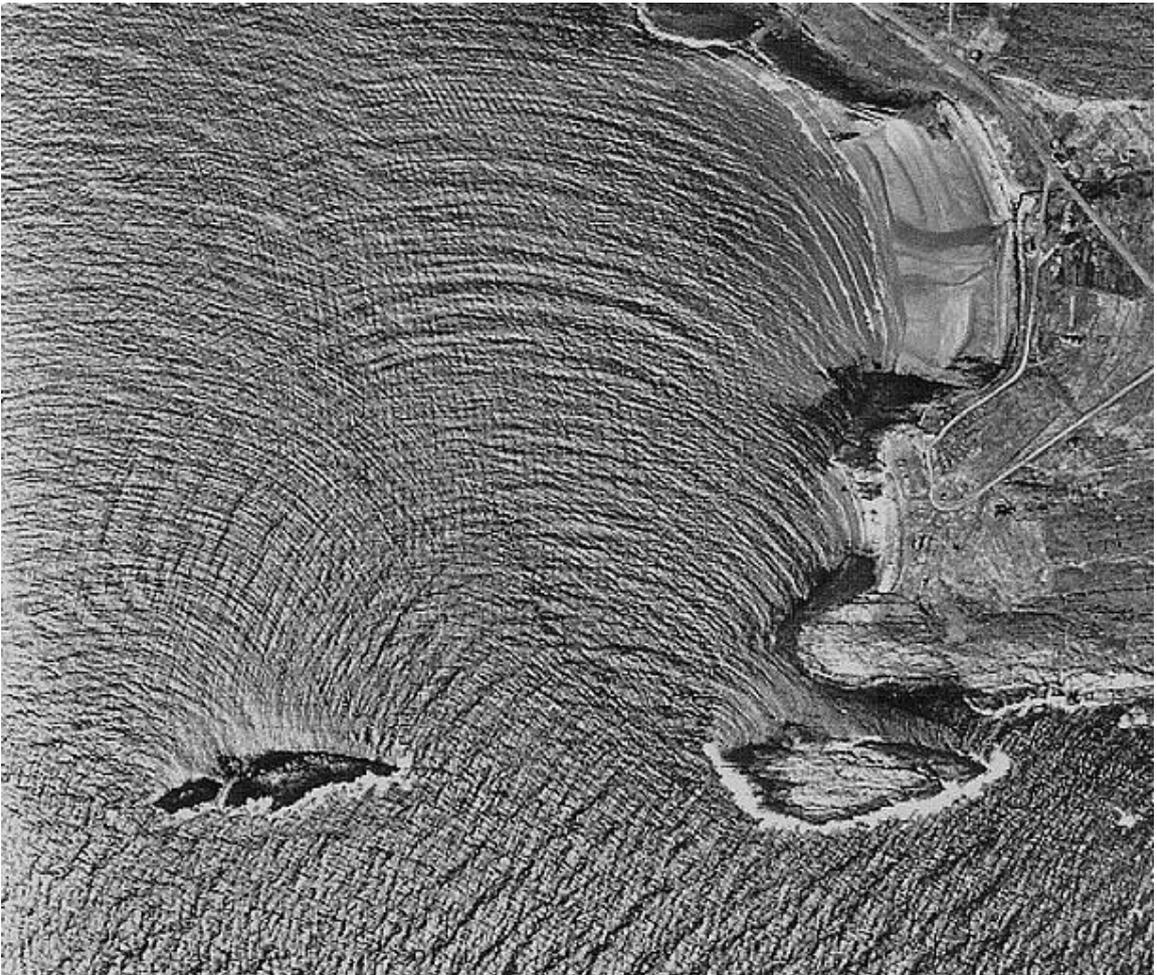


Рис. 4.8. На аэрофотоснимке хорошо видны эффекты рефракции, интерференции и обрушения океанских волн [Интернет-семинары ..., 2013]

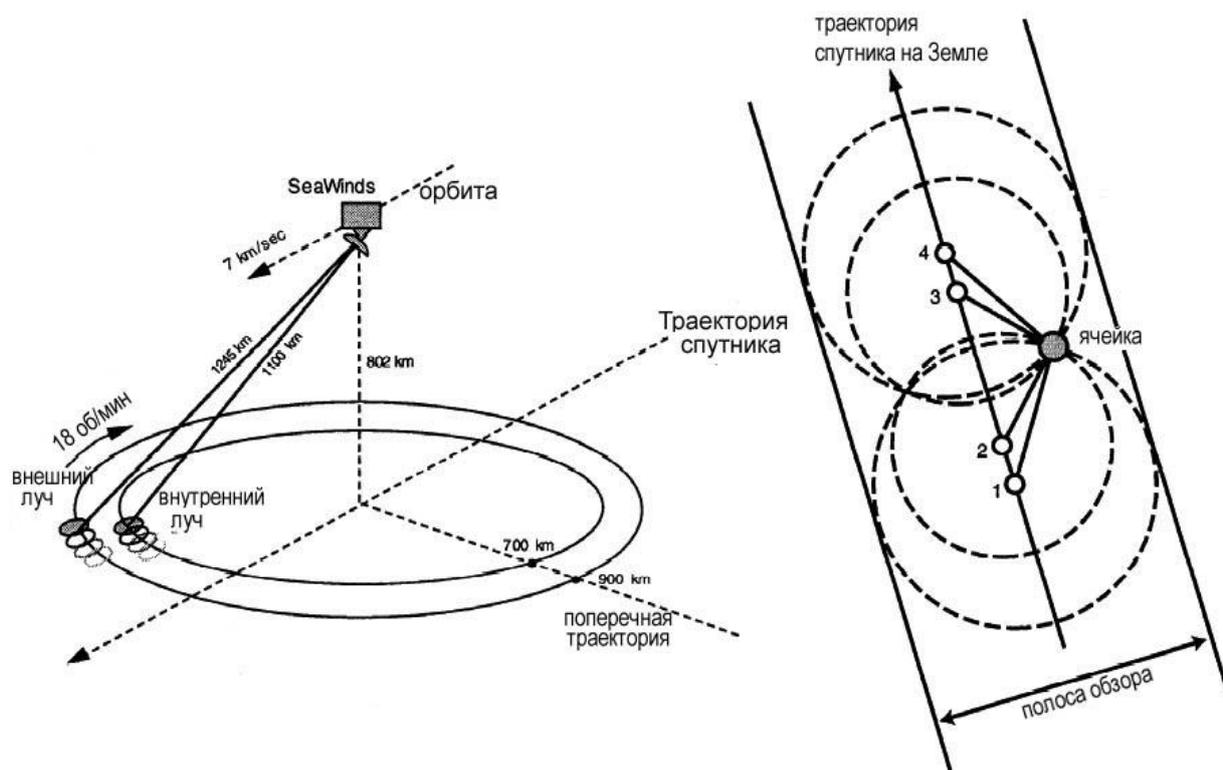


Рис. 4.9. Принцип действия скаттерометра SeaWinds [Интернет-семинары ..., 2013]

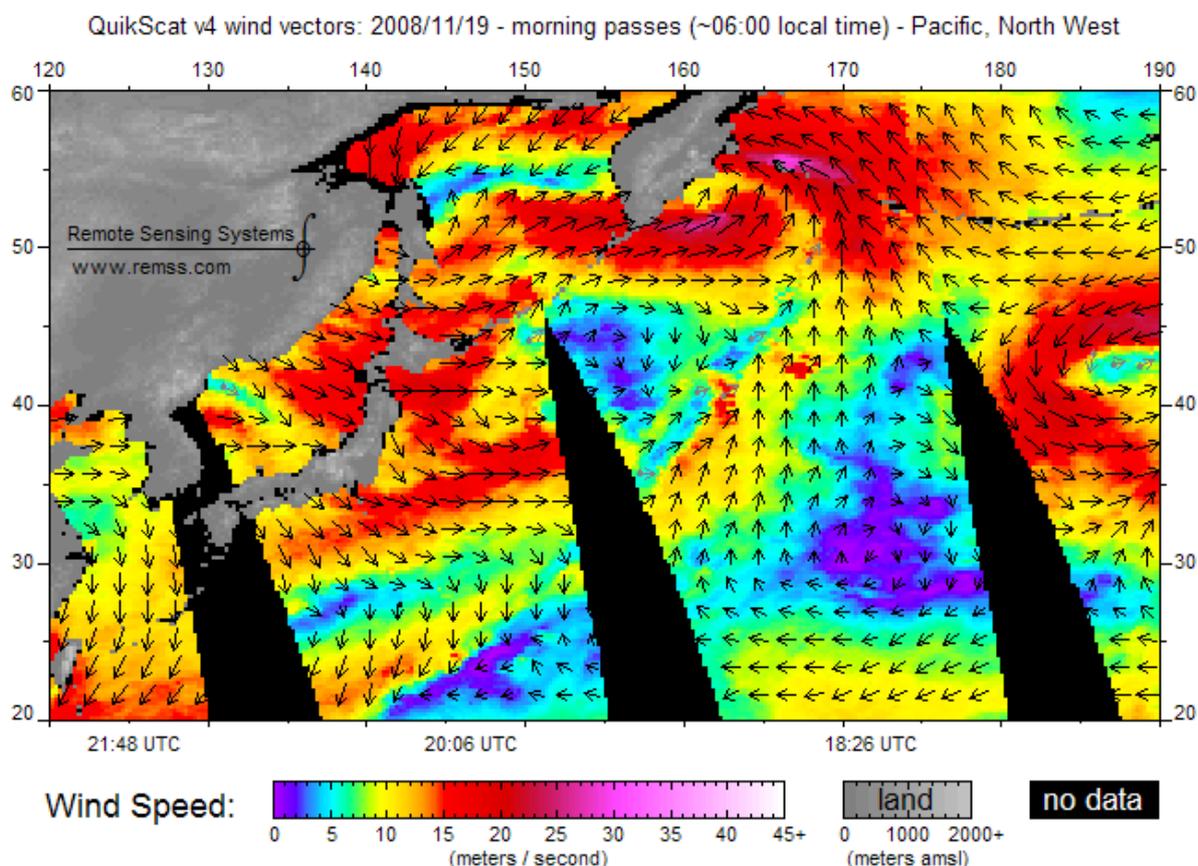


Рис. 4.10. Распределение ветра над северо-западным районом Тихого океана 19 ноября 2008 г. по данным скаттерометра QuikScat [Remote Sensing Systems, 2013]

Специальный микроволновый радиометр SMM/I – еще один прибор спутникового базирования, широко используемый для измерения скорости ветра, устанавливаемый с 1987 года на спутниках U. S. Defense Meteorological Satellite Program, орбиты которых совпадают с полярными орбитами метеоспутников NOAA. Прибор измеряет испускаемую поверхностью океана под углом около 60° от вертикали микроволновую радиацию, интенсивность которой зависит от скорости ветра, водяного пара в атмосфере и водности облачных капель. Одновременные измерения на нескольких частотах позволяют рассчитать скорость ветра у поверхности. Измерения скорости ветра с помощью SSM/I имеют точность 2 м/с.

Морские льды. Сравнительно недавно единственным способом получения данных о ледовой обстановке были визуальные наблюдения с самолетов, кораблей и экспедиционных судов. Помимо ряда преимуществ, визуальным наблюдениям свойственны недостаточная точность определения характеристик и привязки к месту наблюдений, субъективность количественных оценок, малая обзорность, высокая стоимость, ограниченность во времени и пространстве.

Уже с середины 1960-х гг. по снимкам со спутников (ESSAT) в автоматическом режиме стали создавать фотокарты морских льдов для северного полушария, сочленяя снимки с отдельных витков, переводя их в картографическую проекцию, выполняя фильтрацию облачности на основе выбора минимальной яркости изображения за несколько дней и разделяя типы льдов разной сплоченности по яркости изображения. Однако облачность и зависимость от условий освещения в приполярных странах сдерживали развитие таких методов мониторинга льдов.

С внедрением в космические исследования радиолокационной съемки наиболее перспективными стали космические радиолокационные системы наблюдения за ледовым покровом, позволяющие получать всепогодную, независимую от времени суток и года, точную и оперативную информацию.

Морской лед представляет собой весьма динамичную природную среду (рис. 4.11). Одновременно существует множество видов льда, имеющих различную историю развития. При росте и разрушении морского льда условия на его поверхности и толще постоянно меняются, что в основном предопределяет разнооб-

разие шероховатости его поверхности и внутреннего строения. Существенный вклад в это разнообразие вносят пространственно-временные вариации характеристик снежного покрова.

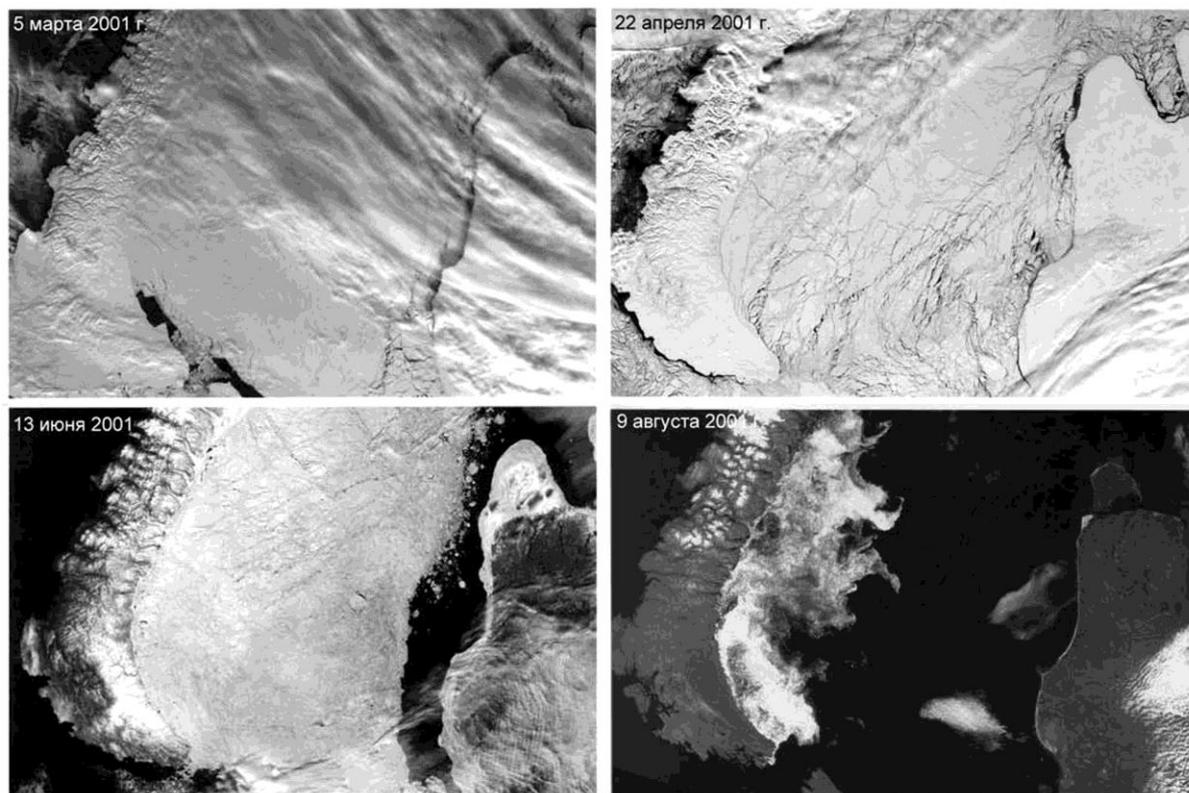


Рис. 4.11. Динамика схода ледяного покрова в Карском море на снимках со спутника Terra, MODIS в 2001 г. [Интернет-семинары ..., 2013]

Основными характеристиками морских льдов, которые необходимы для решения практических задач, являются их сплоченность, положение кромки льдов (дрейфующих или припайных), дрейф (направление и скорость), возраст (толщина льдов) и ряд других второстепенных параметров (торосистость, наслоенность, разрушенность и т. п.). Ряд из них, такие как сплоченность, положение кромки и дрейф льдов, достаточно легко определить, используя данные съемок, например в видимом диапазоне, в то время как определение возрастных характеристик ледяного покрова является наиболее сложной задачей, успешно решаемой на основе регистрации собственного микроволнового излучения льдов, т. е. при пассивной микроволновой радиометрической съемке, которую, однако, пока удается выполнить лишь с очень грубым разрешением (6 км). Другой возможный метод решения этой задачи – космическая радиолокация. Для

некоторых видов льдов существует однозначная зависимость яркости изображения/радиолокационных контрастов от их возраста. Современные спутники позволяют получать изображения высокого и среднего разрешения в видимом, тепловом инфракрасном и радио-диапазонах, по которым могут быть оперативно составлены достаточно точные карты ледового покрова для большинства полярных районов. В настоящее время для оперативных наблюдений за ледовым покровом арктических морей применяют спектрорадиометры высокого и среднего разрешения (MODIS на спутниках Terra и Aqua), а также радиолокаторы с синтезированной апертурой SAR на спутниках ERS-2, Envisat и Radarsat и микроволновые радиометры (SSM/I на спутнике DMSP и AMRS-E на спутнике Aqua).

Температура поверхности воды. Мониторинг мезомасштабной структуры и динамики вод может осуществляться с помощью, например, радиометров AVHRR, установленных на нескольких спутниках серии NOAA или спектрорадиометров MODIS.

Съемка с помощью тепловых инфракрасных радиометров, которыми оснащены все функционирующие метеорологические спутники, открыла возможность единовременной глобальной фиксации температур поверхности океана, что невозможно было сделать судовыми или самолетными методами. Глобальные спутниковые карты температур морской поверхности SST (Sea Surface Temperature) составляются по снимкам AVHRR/NOAA с 1981 г. с разным временным и пространственным осреднением, а с 2001 г. они создаются в реальном масштабе времени на основе многоканального алгоритма определения температур и используются в оперативных целях.

Помимо изучения собственно температур воды, тепловая инфракрасная съемка дает материал для исследования динамических процессов в океане, течений, океанических вихрей и фронтов, апвеллингов и других явлений, при изучении которых также привлекают материалы об уровне океанической поверхности.

Картографическая информация о температуре поверхности воды необходима для оценки накопления и расходования тепла водной массой в результате ее теплообмена с атмосферой и ледом озера, для расчета теплового баланса, для разработки методов прогноза сроков вскрытия и замерзания водоема. Температура воды является важнейшим параметром, позволяющим вы-

явить климатические изменения. В связи с этим постоянный мониторинг и оперативное картографирование температуры поверхности воды необходимы при изучении глобального и локального изменения климата.

Пространственно-временные изменения температуры воды являются также одним из важнейших показателей биологической продуктивности акватории, на которую температура оказывает как прямое, так и косвенное влияние. Температура воды определяет условия местообитания морской флоры и фауны и является активирующим или ограничивающим фактором процесса фотосинтеза первичного органического вещества. Распределение температур воды представляет основной диагностический признак для прогноза участков с наиболее вероятными рыбными скоплениями. Ежедневные глобальные и региональные карты температур морской поверхности доступны по Интернету на сайте Remote Sensing Systems (http://www.remss.com/sst/sst_data_daily.html).

Установленный по спутниковым снимкам характер распределения температур воды в океане существенно отличается от прежних представлений о нем. В противоположность отображаемому картами изданных атласов океанов плавному изменению температур на поверхности океана наблюдается весьма сложная и контрастная картина, обусловленная струйными течениями и вихревыми образованиями. В прибрежных районах субтропических и тропических широт фиксируются фронты между теплыми океаническими водами и более холодными прибрежными.

Цвет моря. Цветовые характеристики поверхности моря могут быть использованы для оценки типа океанских вод, изучения аномального цветения вод (рис. 4.12), биопродуктивности районов, перспективных для рыболовства и т. д. Цветовые контрасты являются важным индикатором при наблюдении фронтальных зон – границ течений, вихрей, зон перемешивания, апвеллинга и т. п., в частности, при наблюдении из космоса. Преломленный свет на границе раздела проникает на некоторую глубину и после поглощения и рассеяния на имеющихся неоднородностях (в случае фитопланктона – на пигментах живых организмов и на дендрите – взвешенных продуктах жизнедеятельности) частично возвращается в атмосферу, неся информацию о содержащихся в воде взвешенных и растворенных веществах.

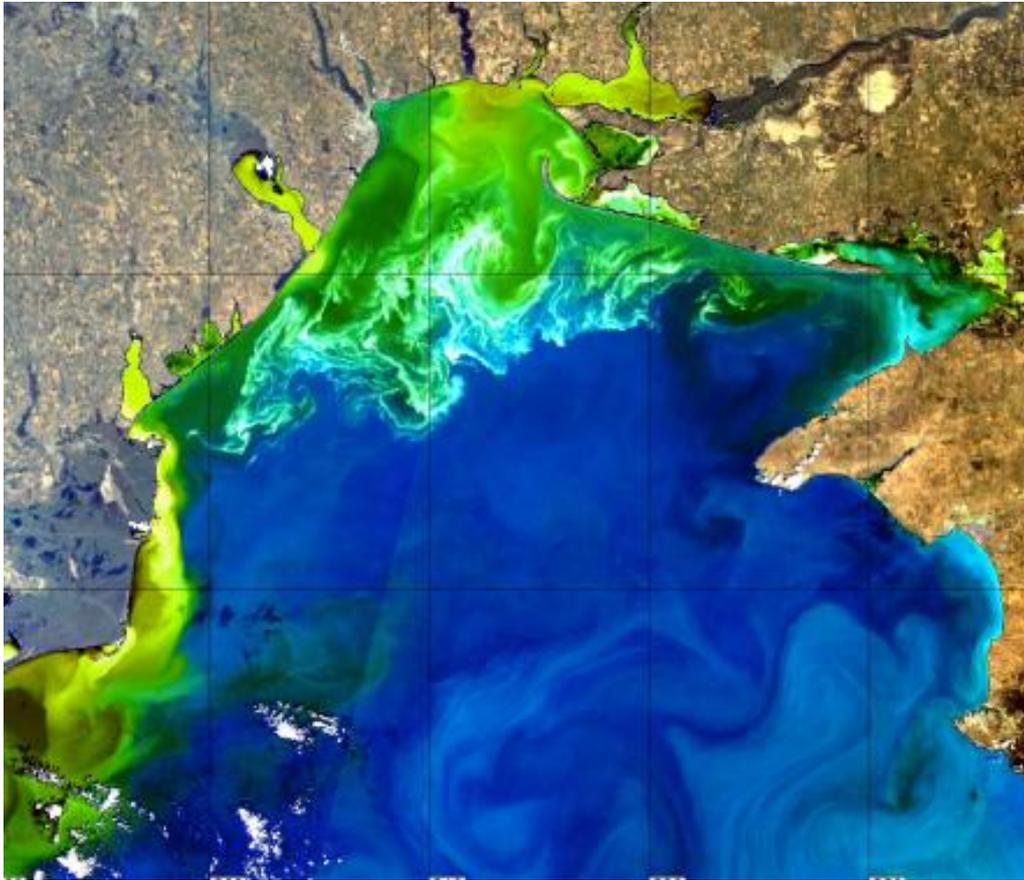


Рис. 4.12. Аномальное цветение вод в северо-западной части Черного моря по данным MERIS/Envisat 16 июля 2010 г.

Спутниковые датчики цвета океана регистрируют величины яркости восходящего излучения на верхней границе атмосферы в нескольких спектральных каналах. Эти величины обусловлены совокупностью многих факторов, и цепочка, связывающая биопродуктивность вод и сигнал, регистрируемый спутниковым датчиком, оказывается достаточно длинной. От первичной продукции (концентрации фитопланктона) непосредственно зависит содержание пигментов фитопланктона и взвешенных частиц, обуславливающих поглощение и рассеяние света морской водой; именно эти два процесса в основном определяют спектральную яркость излучения, выходящего из водной толщи.

В настоящее время современные спутниковые датчики цвета океана обеспечивают получение глобальных и региональных карт распределения концентрации хлорофилла, характеризующего распределение биомассы фитопланктона, с полным покрытием Мирового океана в течение 1–2 дней. Анализ наблюдаемых изменений полезен для установления связи между динамикой морских экосистем и физикой верхнего перемешанного

слоя; в частности, изменение биомассы, изменяющее прозрачность верхнего слоя, будет влиять на поглощение солнечной энергии и нагревание верхнего слоя.

Наконец, данные сканеров цвета моря, помимо концентрации хлорофилла, позволяют рассчитать общее содержание взвешенного вещества и растворенного органического вещества (желтого вещества) в верхнем слое моря.

В настоящее время мониторинг распределения взвешенного вещества и цветения вод осуществляется с помощью сканеров MODIS, установленных на спутниках Terra и Aqua. Ранее съемка велась такими сканерами цвета моря, как CZCS (Coastal Zone Color Scanner), который работал на ИСЗ Nimbus-7 с 1978-го по 1986 г., SeaWiFS (Sea-viewing WideField-of-View Sensor) на спутнике SeaStar, а также спектрорадиометрами MERIS (Medium Resolution Imaging Spectrometer) на ИСЗ Envisat, который завершил работу в 2012 г.

Многие из спутниковых приборов высокого пространственного разрешения (0,5–2,5 м) видимого диапазона спектра с успехом могут использоваться для морских исследований, в первую очередь в прибрежной зоне, где высокое пространственное разрешение необходимо ввиду сильной пространственной изменчивости процессов или их мелких масштабов, например мелкомасштабных вихрей и течений. Такие приборы, установленные на ИСЗ EROS-B, Ikonos и QuickBird, дают панхроматические изображения морской поверхности или суши с пространственным разрешением менее 1 м. Данные с указанных приборов предоставляются за плату, размер которой зависит от вида съемки.

4.4. Применение данных дистанционного зондирования в гидрологии

Данные дистанционного зондирования в гидрологии применяются для:

- дешифрирования болот, рек, озер;
- выявления речных и озерных водосборов;
- мониторинга половодий и паводков;
- осуществления мониторинга ледовой обстановки на реках и озерах;
- контроля качества озерных вод;
- оценки испарения с земной поверхности и количества осадков;

- расчета запаса воды в снеге, наблюдения за процессами снеготаяния в целях прогнозирования стока;
- моделирования гидрологических процессов и т. д.

Космические снимки позволяют следить за развитием негативных процессов в реках, озерах, водохранилищах, предсказывать возможность их возникновения и характер протекания, выявлять их последствия и оценивать все виды ущерба.

Мониторинг половодий и паводков. Климатические особенности нашей страны обуславливают ежегодное прохождение половодий на реках, которое характеризуется выходом вод из меженного русла и подтоплением поймы.

Уровень воды может достигать и превышать критические отметки, в результате чего в зоны подтопления попадают хозяйственные объекты, населенные пункты, расположенные в прибрежных зонах (рис. 4.13), что наносит существенный ущерб экономике района, а также может причинить вред здоровью населения.

Для предупреждения разливов и предотвращения чрезвычайных ситуаций необходим постоянный мониторинг рек в период половодья и паводков.

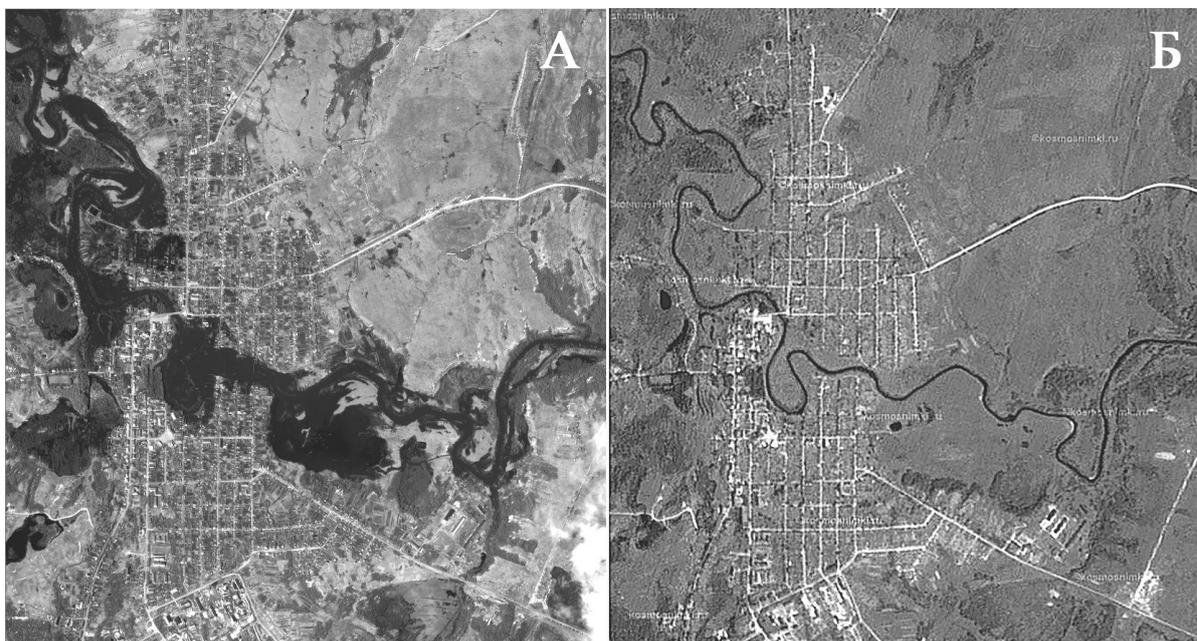


Рис. 4.13. Разлив р. Обши в Тверской области в апреле 2011 г. (А), меженное русло (Б) [ИТЦ «СКАНЭКС», 2013]

Определение зон затоплений при наводнениях и размеров затопляемых площадей в поймах больших рек только на основе наземной информации об уровнях и расходах воды часто не

представляется возможным. Космическая информация позволяет не только наблюдать развитие паводка или половодья, но и получать оперативный прогноз зон затопления, оценивать принесенный ущерб, решать задачи выбора защитных дамб для сдерживания наводнения, выявлять участки, которым еще угрожает затопление и т. д. Применение компьютерных алгоритмов обработки данных делает возможным автоматическое определение границы воды и суши, площадей затопленных земель, а также выявление территорий, находящихся в опасности из-за поднимающегося уровня воды.

При мониторинге половодий наиболее информативными являются материалы съемки радарных спутников (для обеспечения гарантированной всепогодной съемки среднего разрешения), аппаратов высокодетальной оптической съемки (для углубленного анализа ситуации в районах затопления), ресурсных спутников с многоспектральными оптическими сканерами (для оценки состояния ледяного покрова на реках, ледовых переправах и в потенциальных районах образования заторов).

Особое место при мониторинге половодий занимает выявление на реках участков с ледовыми заторами. На многих реках северного полушария, текущих с юга на север, во время весеннего вскрытия существует опасность образования скоплений льда в русле – ледяных заторов. Заторы льда уменьшают живое сечение реки и вызывают подъем уровня воды в месте скопления льда и на некотором участке выше него. Это часто приводит к наводнениям.

При помощи космических снимков можно выявить места, благоприятные для образования заторов. Наиболее вероятно образование заторов льда на узких участках русел рек, в районах мостовых сооружений, поворотов русла в сочетании с сужением реки, на участках разветвления русла с малой скоростью течения, впадения крупного притока, если этот приток вскрывается раньше основной реки, при наличии острова и т. д. Часто заторы возникают в тех местах, где осенью при замерзании реки имели место деформация льда и торошение.

Снимки из космоса позволяют специалистам произвести оценку состояния рек и водоемов в период вскрытия ото льда, а также определить точное местонахождение и протяженность ледяных заторов. На снимке RADARSAT-1 (рис. 4.14) хорошо различим весенний затор льда, образовавшийся 21 апреля 2010 г.

на р. Северной Двине в районе н. п. Орлецы. На снимке видны основные части строения затора: основание затора из заклиненных ледяных полей, гряды торосов за основанием – «гребень» затора, подпираемый ядром массива сжатого битого льда.

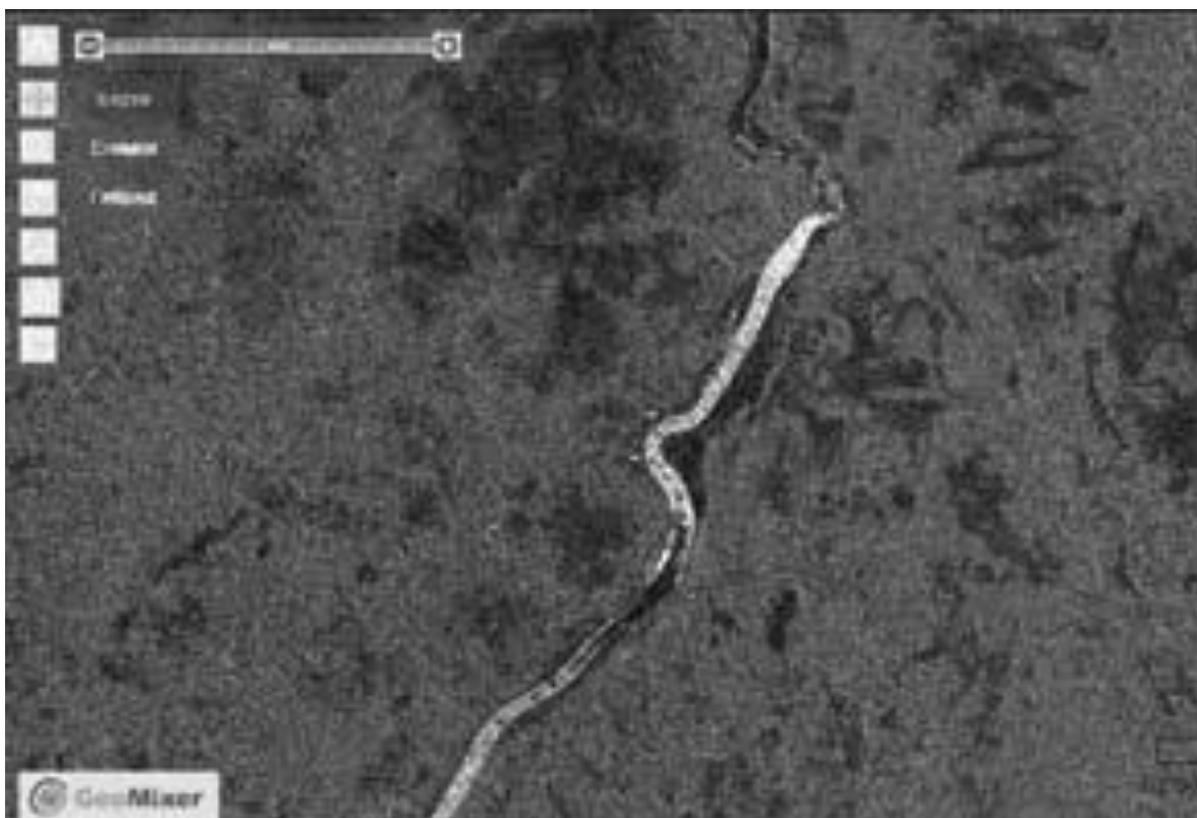


Рис. 4.14. Затор льда, образовавшийся 21 апреля 2010 г. на р. Северной Двине в районе н. п. Орлецы на снимке RADARSAT-1 [ИТЦ «СКАНЭКС», 2013]

Определение снегозапасов. Сезонный снежный покров играет исключительную роль в процессах саморазвития горных регионов, определяет формирование и режим речного стока, оледенения и снежных лавин. Оказывая существенное воздействие на климат, он сам служит индикатором изменения климата. Карты распределения снежного покрова, полученные по результатам дистанционного зондирования, помогают понять пространственные особенности и взаимосвязи ледниковых систем, оценить вклад разных факторов в формирование ледников и условия их существования.

Точную информацию о режиме, распределении и изменчивости снежного покрова необходимо иметь для успешной реализации водохозяйственных мероприятий и регулирования водных ресурсов в бассейнах рек горных территорий при имею-

щемся дефиците воды в степной зоне. Для прогноза максимальных уровней воды и объема речного стока за период весеннего половодья, оценки увлажнения почв талыми водами, расчетов снеговой нагрузки на сооружения при проектировании мероприятий по борьбе со снежными заносами важно точнее оценить запасы воды в снежном покрове и динамику таяния снега в весенний период. Новую информацию о территориальном распределении снежного покрова дает космический мониторинг (рис. 4.15).

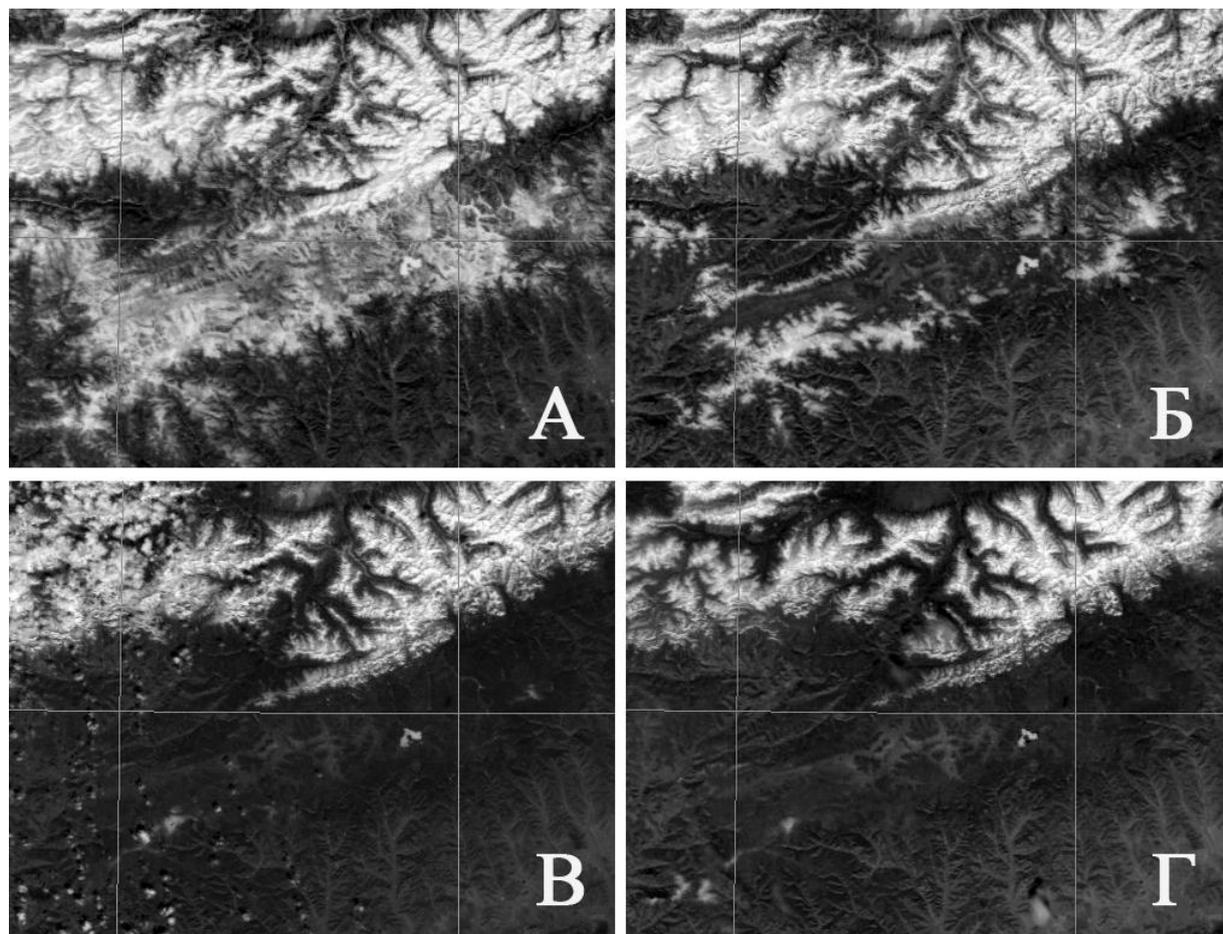


Рис. 4.15. Динамика снежного покрова на хребте Хамар-Дабан весной 2013 г. по данным спектрорадиометра MODIS: 19 апреля (А), 29 апреля (Б), 8 мая (В) и 19 мая (Г) (по материалам ФГУНПП «Росгеолфонд», 2013)

Для определения снегозапасов на горных водосборах с использованием регулярных спутниковых съемок в видимом диапазоне сначала восстанавливается последовательный ход снеговой линии в горах при снеготаянии. Далее рассчитываются запасы воды в снежном покрове «методом теплового проявления» через температуру воздуха и коэффициент стаивания. Результа-

ты таких расчетов (по ряду лет для некоторых горных регионов и речных водосборов) показали перспективность этого направления использования спутниковой информации, особенно в условиях малообжитых и труднодоступных районов.

Одно из направлений использования снимков в гидрологии связано с моделированием и прогнозированием талого стока рек. Ряд параметров моделей стока, относящихся к характеристике водосбора (заболоченность, заозеренность, залесенность, распаханность и др.), наилучшим образом можно оценить по космическим снимкам. При моделировании стока рек снегового питания определяют степень покрытия бассейна водой в твердом или жидком виде на разных фазах формирования стока: долю площади бассейна, покрытой снегом, во время снеготаяния; водность микроозер и других временных затоплений для внеруслового стока и водность речных русел. Хорошо разработан прогноз снегового половодья по данным о заснеженности водосборов и динамике снеготаяния. Для ряда водосборов найдены зависимости стока от площади, покрытой снегом (для равнинных районов), и от высоты снеговой линии (для горных).

Гидрографические исследования. Главными составляющими водосборного бассейна являются его рельеф и конфигурация сети линий стока. Рельеф выступает в качестве одного из главных факторов формирования стока, так как форма земной поверхности определяет поведение воды. На основе ЦМР (цифровых моделей рельефа) возможно вычисление гидрологических и морфометрических характеристик (длина водотоков, положение водоразделов, площадь элементарных бассейнов, угол наклона, расчленение территории и др.) водосборных бассейнов.

Одним из наиболее часто используемых источников данных для построения ЦМР является база данных SRTM (Shuttle Radar Topographic Mission) – данных радарной топографической съемки поверхности земного шара, произведенной методом радарной интерферометрии с борта космического корабля многоразового использования – шаттла. Данная съемка проводилась в течение 11 дней в феврале 2000 г. почти на всей территории суши от 60° с. ш. до 54° ю. ш. и на некоторых участках океанов с помощью двух радиолокационных сенсоров SIR-C и X-SAR. В результате обработки полученных данных радарной съемки была получена цифровая модель рельефа, охватывающая 85 % по-

верхности Земли. Разрешение семиглобальной цифровой модели рельефа SRTM равно 3 арксекундам по долготе и по широте.

Данные SRTM доступны бесплатно в нескольких версиях: предварительной (версия 1), окончательной (версия 2) и обработанных (версии 3 и 4). Окончательная версия прошла дополнительную обработку: выделение береговых линий и водных объектов, фильтрацию ошибочных значений. Обработанные версии производятся CGIAR (Consultative Group for International Agriculture Research), поставляются в формате GeoTIFF (Geo Tagged Image File Format) с исправленными областями, в которых были пропущены значения, и включают сборку мозаик в более крупные фрагменты ($5^\circ \times 5^\circ$, а не $1^\circ \times 1^\circ$, как в двух первых версиях). Последняя версия этой модели обеспечивает абсолютную точность по высоте около 8,8 м и относительную – по высоте 6,2 м; ее данные общедоступны (<http://srtm.csi.cgiar.org>). Возможность свободного доступа обеспечила очень широкий спектр использования этой модели рельефа в отраслевых научных исследованиях. Данные представляют собой простой 16-битный растр, значение пикселя является высотой над уровнем моря в данной точке. Используется система координат WGS84 (World Geodetic System 1984).

Наиболее поздняя из общедоступных семиглобальных ЦМР – ASTER GDEM (<http://gdex.cr.usgs.gov/gdex/>) – охватывает поверхность суши между 83° с. ш. и 83° ю. ш. Сенсор ASTER был создан METI и запущен на борту спутника Terra в декабре 1999 г. Сенсор имеет возможность стереоскопической съемки вдоль полосы пролета с помощью двух телескопов. ЦМР разделена на фрагменты размером $1^\circ \times 1^\circ$. ASTER GDEM распространяется в формате GeoTIFF с разрешением 1 арксекунда. Оценка точности высотного положения точек 20 м и 30 м в плане. Пока эта модель по качеству и точности уступает SRTM, которая создавалась значительно дольше.

На основе данных SRTM во Всемирном фонде дикой природы (WWF) создан набор данных по топографии речных бассейнов и гидрографической сети HydroSHEDS (**H**ydrological data and maps based on **S**huttle **E**levation **D**erivatives at multiple **S**cales – название переводится как «гидрологическая информация и карты, основанные на производных радарной топографии различного масштаба») (рис. 4.16). Проект начат в 2004 г. и к

настоящему моменту готовыми данными покрыта большая часть суши. Исключение составляют территории, расположенные севернее 60° с. ш. и южнее 54° ю. ш., так как там радарная съемка SRTM не велась.

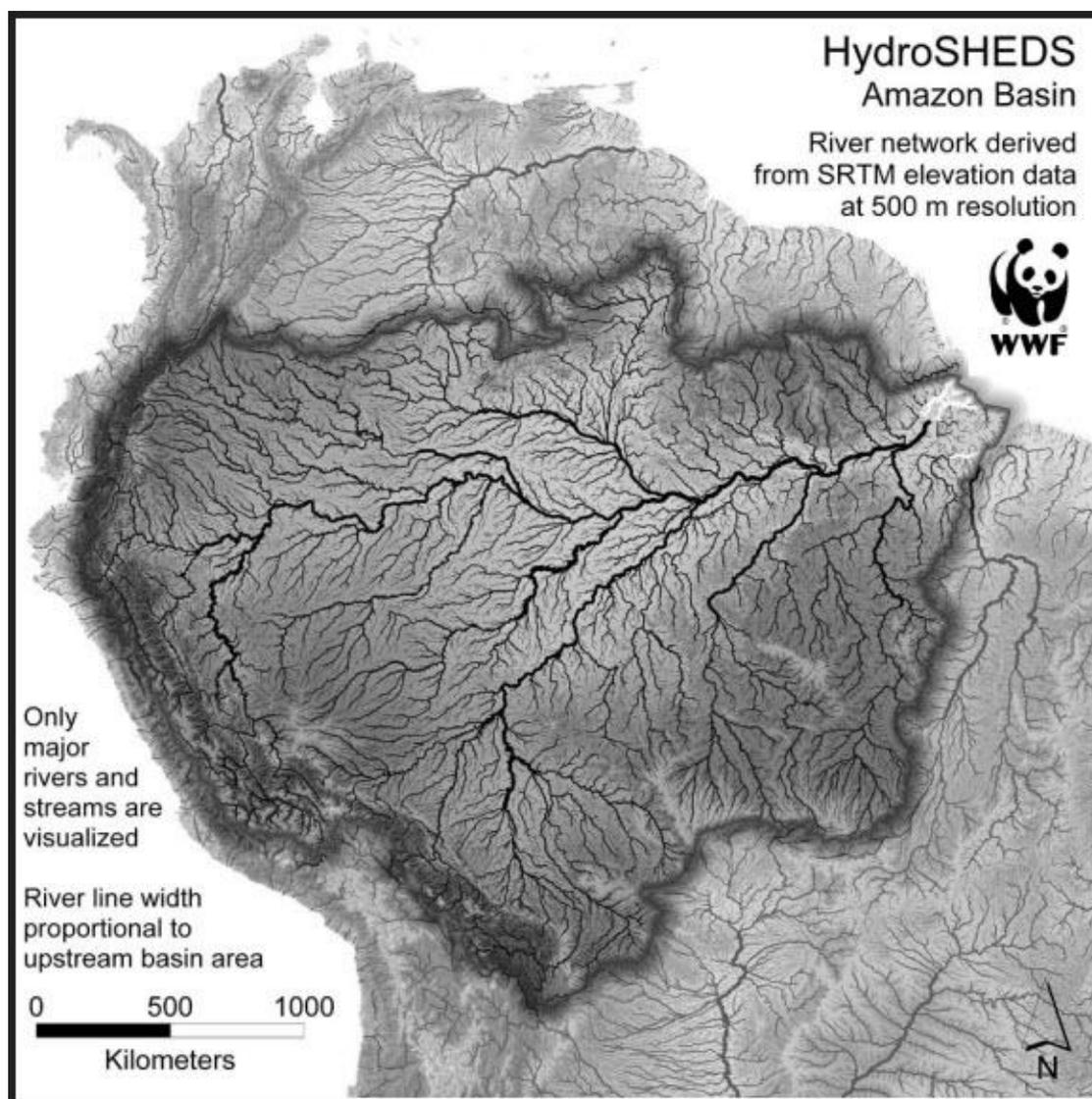


Рис. 4.16. Речная сеть бассейна р. Амазонки, определенная по данным SRTM: толщина ширины водотоков на схеме пропорциональна их площади водосбора; показаны только крупные водотоки [HydroSHEDS, 2013]

На данный момент в наборе присутствуют следующие данные:

- **DEM** – цифровая модель рельефа с заполненными пробелами (система координат WGS84, высота в метрах, разрешение – 3 арксекунды);
- **CON** – гидрографическая ЦМР с разрешением 3, 15 или 30 арксекунд, обработанная несколькими дополнительными алгоритмами для более точной идентификации речных русел;

- **DIR** – сетка направления стока в соседние ячейки (разрешение – 3, 15 и 30 арксекунд) для идентификации речных русел и водосборов;

- **ACC** – грид аккумуляции стока, показывающий, со скольких ячеек вода стекает до данной (разрешение 15 и 30 арксекунд);

- **RIV** – речная сеть, определенная по сеткам DIR и ACC, с разрешением 15 и 30 арксекунд. Пороговое значение количества ячеек для формирования водотока составляет 100 для набора 15 арксекунд;

- **BAS** – речные бассейны с разрешением 15 и 30 арксекунд (бета-версии).

Эти данные совместно с наборами данных о растительности, почвах и метеоусловиях могут быть использованы в математических моделях речного стока: пространственное разрешение позволяет создавать модели речных водосборов площадью от 100 км².

Гидроморфологические исследования. Любая река является динамической системой. Шероховатость, геометрия, структура и профиль ее русла изменяются под влиянием наносов и различных климатических, геологических, гидрологических и антропогенных факторов. Гидравлика и морфология рек – сложный предмет исследований. По проекции поверхности реки на горизонтальную плоскость можно судить о гидродинамических параметрах речного стока и связанных с ними процессах переноса осадков и диссипации энергии – русловых процессах.

Оценка русловых процессов наиболее эффективна с использованием космических снимков, сделанных в разное время. При создании продуктов дистанционного зондирования, характеризующих русловые процессы, используются спутниковые данные различного спектрального диапазона и разрешения. В зависимости от масштаба космической съемки контроль за состоянием русел осуществляется на различных уровнях: региональном, локальном и детальном. Данные с пространственным разрешением 20–100 м позволяют контролировать в регионе состояние рек для раннего предупреждения и прогнозирования рисков, а также фиксировать периоды активизации стока и русловых процессов. По материалам съемок высокого разрешения (5–20 м) решаются задачи мониторинга состояния пойм и русел, контроля и изучения различных явлений в руслах рек на локальном уровне. Материалы детального разрешения (1–5 м)

обеспечивают контроль ситуации на отдельных участках русла, а также вблизи гидротехнических сооружений, мостов, переходов и т. п. Эти данные также необходимы для оценки результатов и последствий русловых процессов. Космический мониторинг состояния русел равнинных рек обеспечивает изучение различных изменений во времени: образование новых островов, изменение меандров, береговой линии и т. п. Своевременное выявление опасного гидрологического явления обеспечивает бесперебойное функционирование линейных сооружений, пересекающих водные объекты, в то время как недоучет динамики русел рек при проектировании трасс переходов приводит к размывам трубопроводов, опор ЛЭП и мостов в период эксплуатации. Особенно часто проблемы возникают в руслах слабоустойчивых рек, где деформации русла наиболее интенсивны. Здесь скорость плановых деформаций может составлять до нескольких метров в год.

На рис. 4.17 приведена серия снимков, на которых заметны изменения в плане положения русла р. Пшехи в Краснодарском крае за период с 2003-го по 2010 г. Анализ последовательных положений русла позволяет определить, что скорость размыва на отдельных участках достигает до 50 м/год, что относит русло на исследуемом участке к категории абсолютно неустойчивых.

Уникальные возможности космической информации используются также при изучении устьев крупных рек. Например, по материалам многозональной космической съемки были изучены объемы и маршруты выноса в оз. Байкал взвесей в дельте р. Селенги, которые определяли морфологию и динамику реки.

Изучение крупных внутренних водоемов с использованием спутниковых данных. Многие методы дистанционного контроля, разработанные первоначально для морей и океанов, сейчас успешно адаптируются для изучения крупных внутренних водоемов: по спутниковым данным определяют уровень воды в водоемах, оценивают цветность и содержание хлорофилла, находят величину и направление приповерхностного ветра, изучают параметры волнового и ледового режима, определяют температуру поверхности и т. д.

Пространственно-временное распределение температуры поверхности воды оз. Байкал в 2010 г., определенное по данным радиометра AVHRR, приведено на рис. 1.11. На карте за 12 июня (см. рис. 1.11, а) практически на всей акватории озера

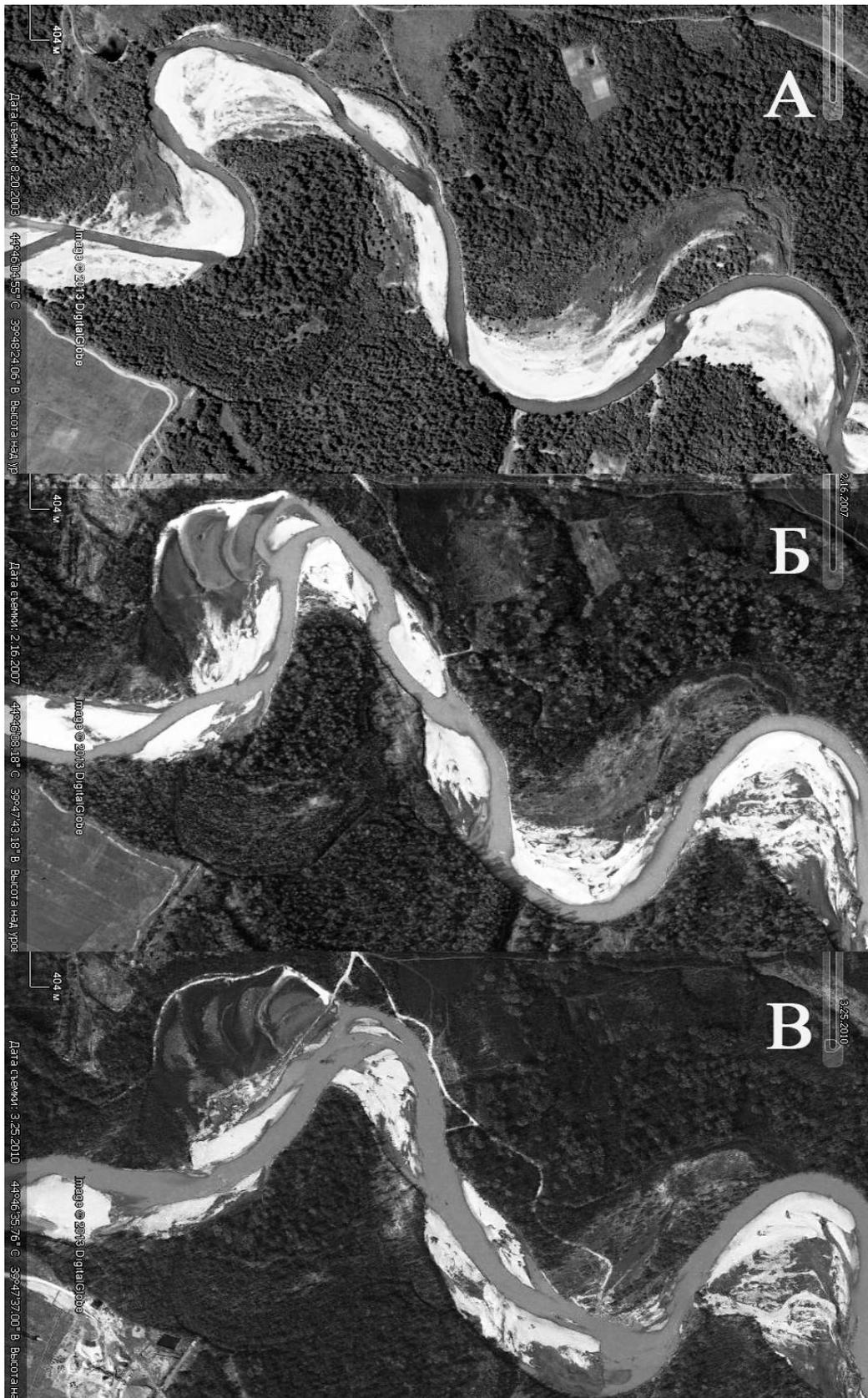


Рис. 4.17. Последовательные положения русла р. Пшехи (Краснодарский край) в 2003 (А), 2007 (Б) и 2010 гг. (В) на спутниковых снимках сверхвысокого разрешения (по материалам Google Earth, 2013)

(за исключением мелководных заливов и проливов) наблюдается гомотермия. Эта ситуация является характерной для этого периода и наблюдается ежегодно. К концу июля – началу июля все более отчетливо прослеживается неоднородное распределение температуры на поверхности озера вследствие влияния притока речных вод, течений и донного рельефа. В целом с июля до середины октября ежегодно наблюдается понижение температуры поверхности воды от берегов озера к его центральным глубоководным частям, что можно наблюдать на представленных картах за соответствующий период (см. рис. 1.11, б-г). Начиная со второй половины октября до ледостава (см. рис. 1.11, д-е) наблюдается обратная картина в распределении температуры на поверхности озера: температура в центральных частях озера в связи со значительной тепловой инерцией больших объемов воды превышает температуру в мелководных заливах и проливах. На карте за 7 ноября (см. рис. 1.11, е) на всей акватории озера (за исключением мелководных частей озера, где температура близка к 0 °С) наблюдается осенняя гомотермия.

Оценка ледовой обстановки по данным спутниковых съемок. В качестве примера на рис. 4.18, б приводится картосхема ледовой обстановки на Ладожском озере, составленная на основе данных со спутника Terra (см. рис 4.18, а). При оценке ледового режима озер многолетние данные о сезонной изменчивости количества льда на озерах определяются в результате анализа картосхем ледовой обстановки, построенных по данным аэровизуальных наблюдений и спутниковых съемок. На основе космических снимков в Государственном гидрологическом институте разработана имитационная модель динамики ледовой обстановки на Ладожском озере. Модель позволяет рассчитать ледовую ситуацию на озере, исходя из предшествующего снимка и прогноза метеорологических элементов на будущее. Упомянутая имитационная модель способна учитывать всякую дополнительную информацию при автоматизированном дешифрировании снимка.

Изучение колебания уровней внутренних водоемов по спутниковым данным ведется на многих внутренних водоемах в первую очередь с использованием данных спутников TOPEX/Poseidon, Jason-1, Jason-2. Период проведения повторных измерений вдоль треков составляет около 10 суток, что соответствует временным характеристикам основных гидрологи-

ческих и гидродинамических процессов. Ниже приведен график колебания уровня Каспийского моря по данным спутниковой альтиметрии (рис. 4.19), на котором отчетливо прослеживаются периоды подъема и спада уровня Каспийского моря.

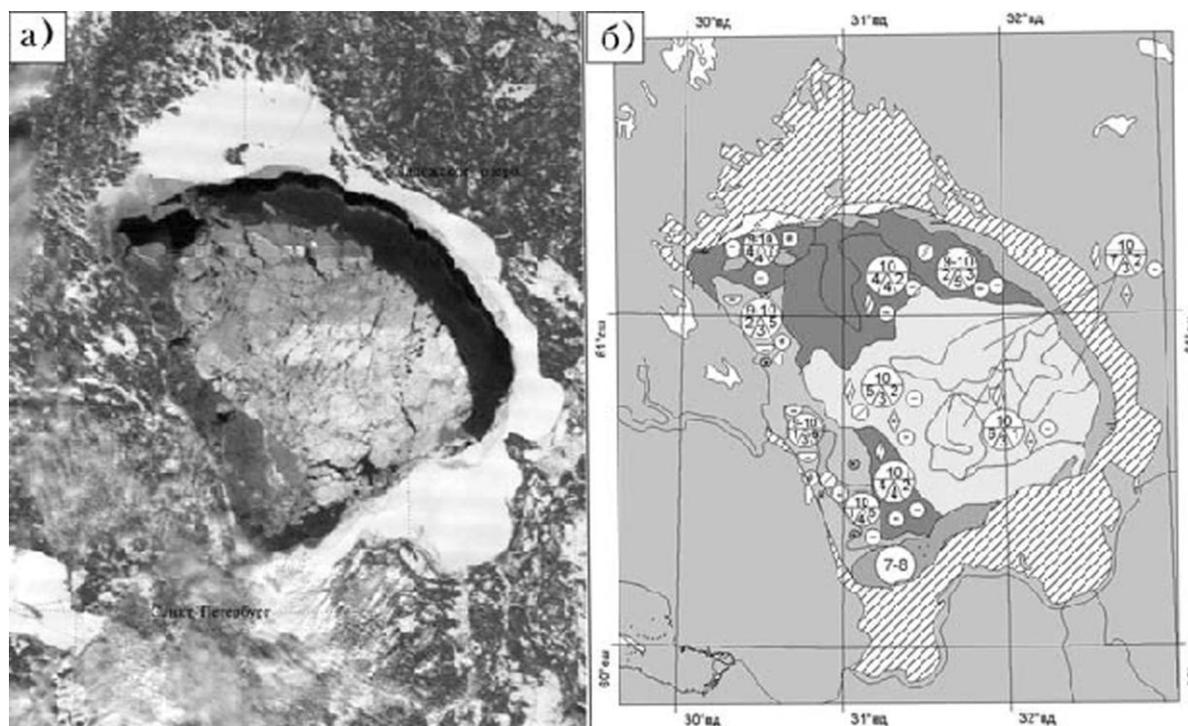


Рис. 4.18. Ледовая обстановка на Ладожском озере 20.04.2004 г. – снимок со спутника Terra (а) и картосхема (б) [Лаборатория дистанционных методов ..., 2013]

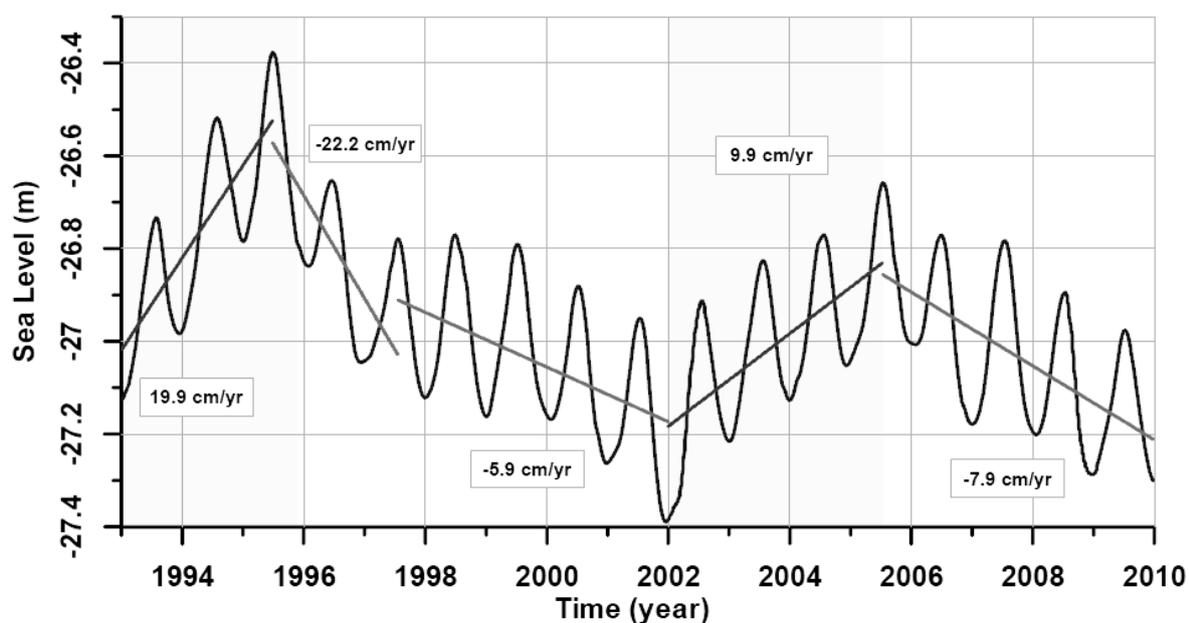


Рис. 4.19. Колебания уровня Каспийского моря по данным спутниковой альтиметрии [Спутниковый мониторинг..., 2013]

На рис. 4.20 прослеживается изменение уровня Сарыкамьшского озера. Сарыкамьшская впадина периодически принимала воды Амударьи, превращаясь в озеро, при изменении ее русла в сторону Аральского моря озеро пересыхало. Водой впадина была наполнена в конце неогена, в верхнечетвертичное время и в XIV–XVI вв. Также воды Амударьи достигали Сарыкамьшской впадины летом 1878 г.

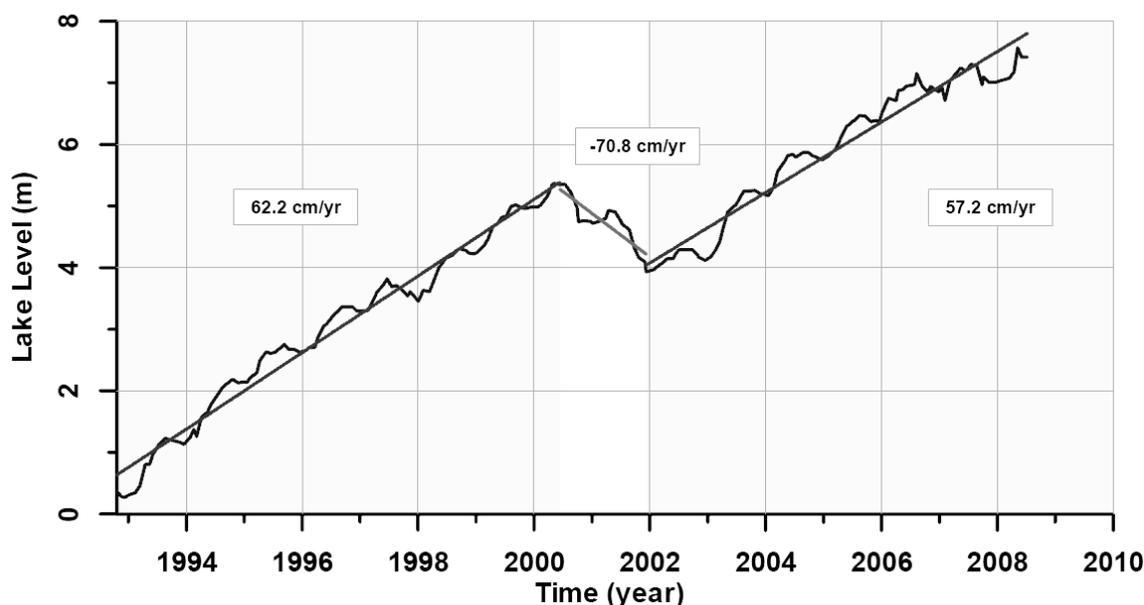


Рис. 4.20. Колебания уровня Сарыкамьшского озера по данным спутниковой альтиметрии [Спутниковый мониторинг ..., 2013]

В 1971 г. вновь был прорыв воды по Куньдарье (старому сухому руслу Амударьи), при этом вновь образовалось озеро. Сейчас Сарыкамьшское озеро подпитывается дренажными водами через коллекторы Дарьялык и Озерный, поступающими с орошаемых земель на левобережье Амударьи. В 2009 г. площадь озера достигала 3800 км² [Спутниковый мониторинг ..., 2013].

Определение площади зеркала водоемов. Одна из крупных уже случившихся экологических катастроф нашего века произошла в Приаралье и связана с усыханием деградирующего Аральского моря. Аральская экологическая катастрофа развивается под влиянием многих неблагоприятных природных и антропогенных факторов, но главное – это продолжающийся бесхозяйственный и плохо ограничиваемый забор речной воды в бассейнах Амударьи и Сырдарьи. После многих лет интенсивного и крайне нерационального ведения хозяйства, связанного с увеличением площади орошаемых земель и интенсивности самого орошения, в Приаралье значительно сократился сток рек,

впадающих в Арал. Большую роль в этом сыграли сооружение крупных оросительных каналов (Каракумский, Большой Ферганский), увеличение забора воды и дополнительные потери воды на испарение с поверхности многочисленных водохранилищ.

В первой половине XX в. режим Аральского моря был довольно устойчив: водоем имел регулярное питание водами впадающих в него рек Амударьи и Сырдарьи и почти стабильный уровень. Однако в 60-х гг. уровень Арала стал быстро падать, и водоем начал менять очертания. В 1988–1989 гг. две части водоема (меньшая северная – Малое море, или Малый Арал, и большая южная, или Большой Арал) полностью разделились. В Малое море поступал небольшой сток Сырдарьи, Большое море питал сток Амударьи. Пролив Берга, соединявший ранее Малое и Большое моря, превратился в небольшой, но достаточно длинный проток, по которому излишки воды из Малого моря сбрасывались в Большое море. В 2005 г. завершилось строительство Кокаральской плотины, которая может спасти Малое море от высыхания. Всего за год, прошедший после сооружения плотины, уровень Малого Арала поднялся на четыре метра. Спустя пять лет уровень воды повысился до отметки 42 м над уровнем океана: это на 14 м выше, чем в Южном Арале, но на 11 м ниже, чем в 70-х гг. прошлого века.

Таким образом, за 50 лет уникальный, ценнейший в экологическом и экономическом отношении Арал обмелел и практически утратил свое рыбохозяйственное, транспортное и рекреационное значение. Усыхающий водоем оказывает отрицательное влияние на природные, социально-экономические, санитарно-эпидемиологические условия прилегающих территорий. Возникли серьезные проблемы с трудоустройством и переселением значительной части населения прибрежных районов. Негативные процессы в самом Арале и Приаралье продолжают развиваться и усиливаться. В этом отношении прогнозы весьма неутешительны.

Дешифрирование разновременных снимков позволяет оценить изменение зеркала Аральского моря и дальнейшие перспективы развития событий. На рис. 4.21 приведена серия разновременных снимков, полученных различными съемочными системами за период времени с 1973-го по 2013 г. На снимках, охватывающих 40-летний период, видны процессы усыхания водоема, сокращения его площади и деления на части, заметно увеличение площади Малого Арала после возведения Кокаральской плотины, препятствующей оттоку вод в Большой Арал.

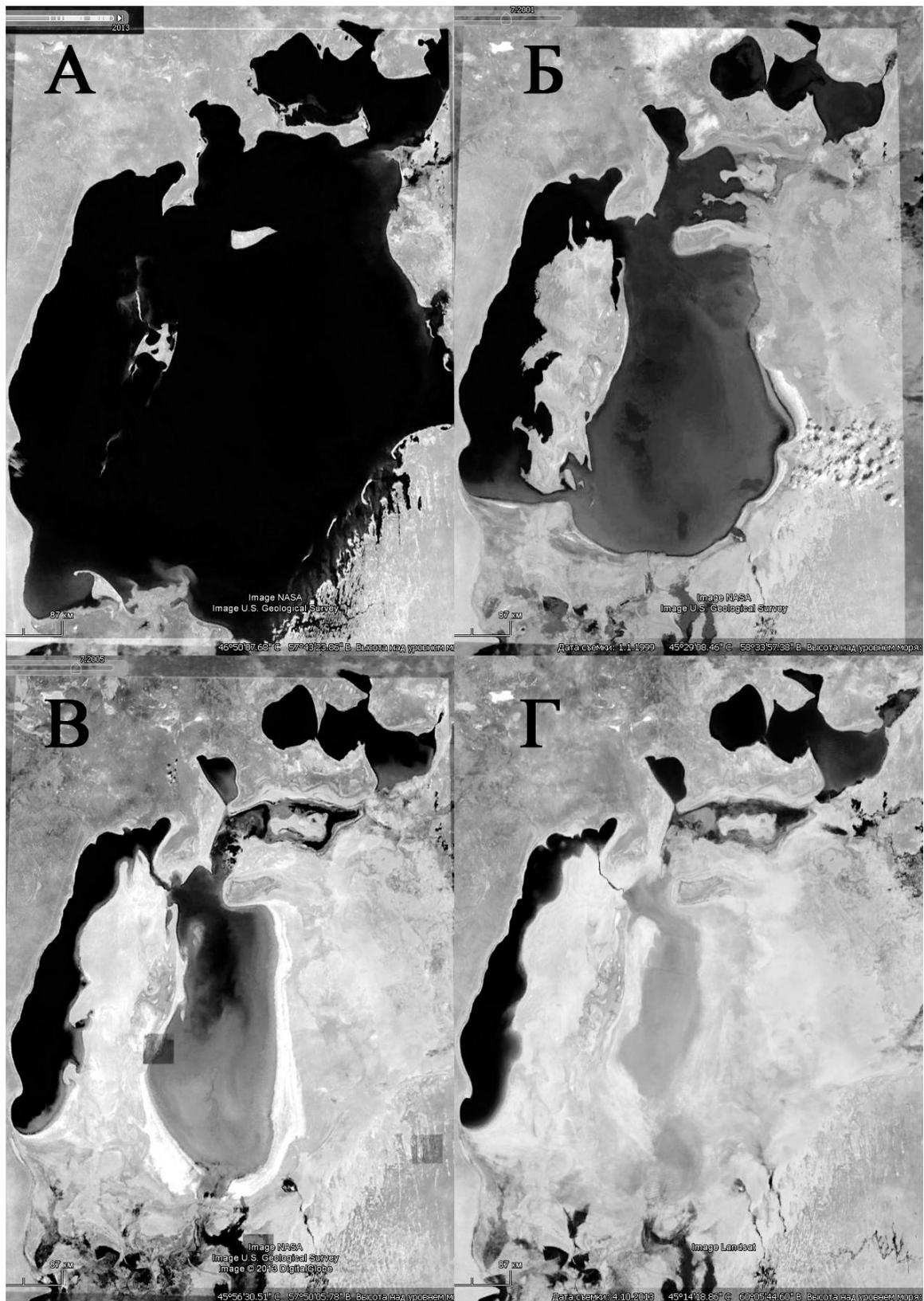


Рис. 4.21. Усыхание Аральского моря по снимкам различных съемочных систем в разные годы: 1973 (А), 1999 (Б), 2004 (В) и 2013 гг. (Г) (по материалам Google Earth, 2013)

4.5. Применение данных дистанционного зондирования в задачах сельского хозяйства

Использование снимков в социально-экономических исследованиях не столь широко, как при изучении природных ресурсов. Наиболее значимо их применение в сельскохозяйственных целях. Аграрная промышленность играет одну из ведущих ролей в экономиках как развитых, так и развивающихся стран. Производство продуктов питания касается всех, а эффективное и прибыльное производство является целью любого государства, региональных структур управления и отдельного производителя. Точная и своевременная информация о состоянии посевов и почвы, оценка качества и количества будущего урожая и, как следствие этого, прогноз цен на аграрную продукцию оказывает существенное влияние как на экономику отдельного региона, так и на всю мировую торговлю в целом.

Обширные территории, занимаемые сельскохозяйственными угодьями, довольно сложно контролировать из-за недостатка точных карт, неразвитой сети пунктов оперативного мониторинга, наземных станций, в том числе и метеорологических, отсутствия авиационной поддержки, ввиду дороговизны содержания штата и т. д. Кроме того, в силу различного рода природных процессов происходит постоянное изменение границ посевных площадей, характеристик почв и условий вегетации на различных полях и от участка к участку. Все эти факторы препятствуют получению объективной, оперативной информации, необходимой для констатации текущей ситуации, ее оценки и прогнозирования. А без этого практически невозможны увеличение производства сельскохозяйственной продукции, оптимизация использования земель, прогнозирование урожайности, уменьшение затрат и повышение рентабельности. Материалы космической съемки могут помочь как для решения комплексных задач управления сельскохозяйственными территориями, так и в узкоспециализированных направлениях.

С помощью спутникового мониторинга возможно контролировать сроки и качество проведения основных агротехнических работ и тем самым оптимизировать управление сельскохозяйственным производством.

По снимкам выполняют инвентаризацию и картографирование земельных угодий на основе международной классифика-

ции использования земель, а снимки высокого разрешения применяют для создания земельного кадастра.

При систематической повторяемости съемок проводят наблюдение за динамикой развития сельскохозяйственных культур и прогнозирование урожайности. Например, зная, как меняется спектральная яркость растительности в течение вегетационного периода с учетом сельскохозяйственного календаря для разных культур, можно по тону изображения полей судить об их агротехническом состоянии и составе культур. Возможность определения состава культур и площадей под ними делает снимки объективным источником сельскохозяйственной статистики. Выявление площадей, занятых основными продовольственными культурами, и оценка их развития с учетом метеорологических условий определяют возможность использования космической информации для прогноза урожайности.

После перезимовки состояние озимых культур оценивается по различию в цвете здоровых и погибших растений, состояние озимых и яровых до уборки урожая – на основе учета степени покрытости почвы всходами и равномерности их распределения. По снимкам высокого разрешения выполняют оценку состояния посевов – их однородности или пятнистости, связанной с вымерзанием, вымоканием, ветровым полеганием, воздействием вредителей. Связи, установленные между биомассой растительности и ее спектральной яркостью, обуславливают регулярное составление карт вегетационного индекса для оценки биомассы посевов и пастбищной растительности.

Применение методов дистанционного зондирования в сельском хозяйстве позволяет оперативно и точно осуществлять:

- классификацию типов сельскохозяйственных культур;
- оценку состояния посевов (оценку всхожести, смены фаз, развития и созревания культур);
- определение областей вымерзания озимых посевов, раннее выявление засухи;
- выделение участков эрозии, заболачивания, засоленности и опустынивания;
- определение областей гибели сельскохозяйственных культур от болезней, насекомых, дефляции, загрязнения пестицидами;
- характеристику и состояние почвы;
- прогноз урожая (качественно и количественно);
- учет и инвентаризацию посевных площадей;

- мониторинг состояния пастбищ, степени поражения болезнями и грызунами, зоны нарушения растительности в результате выпаса скота, проективное покрытие травяной растительностью;
- слежение за качеством и своевременностью проведения различных сельскохозяйственных мероприятий;
- общий мониторинг сельскохозяйственной деятельности.

На спутниковых снимках прекрасно отображаются специфические черты, присущие тому или иному типу ведения сельского хозяйства. Например, сельское хозяйство в пустынях полностью базируется на искусственном орошении, которое в свою очередь основывается на работе водоопреснительных установок и насосных станций. Здесь выращиваются в основном пшеница и овощи, для защиты от солнца используется пленка. Круглая форма полей обусловлена наличием орошающей системы, представляющей собой трубу-радиус, которая вращается вокруг центральной точки поля, где находится скважина, и разбрызгивает воду, подаваемую из скважины с помощью насоса. Такой способ орошения широко применяется в аридных районах по всему миру. Снимок со спутника позволяет подробно рассмотреть особенности взаимного расположения, а также размеры полей, которые имеют диаметр порядка 1 км (рис. 4.22).

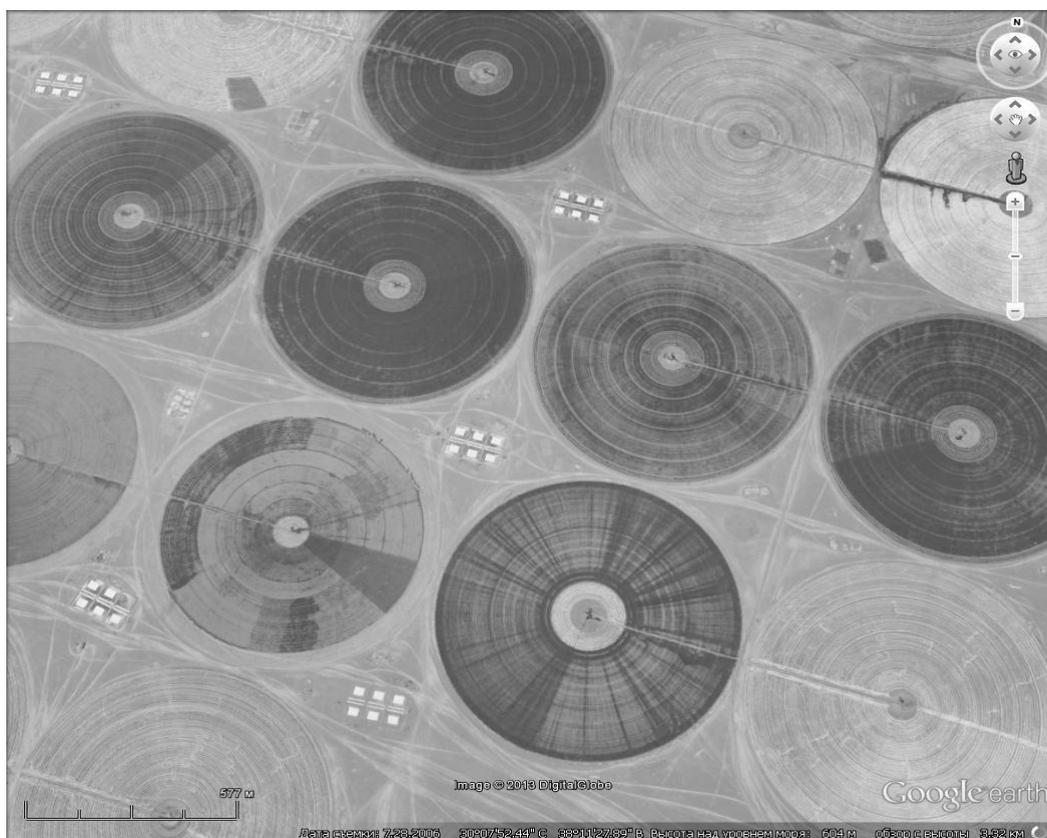


Рис. 4.22. Поля круглой формы в Саудовской Аравии (по материалам Google Earth, 2013)

4.6. Применение данных дистанционного зондирования в области лесного хозяйства

Аэрофотометоды с 1930-х гг. традиционно применяют для инвентаризации лесов. Недостаточная изученность лесного фонда нашей страны побудила искать методы обследования неустроенных резервных лесов с применением аэрокосмической съемки. Разработаны методы фотостатистической и картографической инвентаризации лесов, предусматривающие трехступенчатое получение информации: космическая съемка – выборочная аэрофотосъемка – выборочные наземные обследования, – что сокращает сроки выполнения работ. По снимкам контролируют состояние лесов, их изменение под влиянием природных и техногенных факторов (ветровалы, вредители, промышленные выбросы, вырубки) (рис. 4.23). Разработаны методы использования космических снимков для контроля за соблюдением правил рубки леса, лесовозобновлением, изменениями, связанными со стихийными бедствиями и хозяйственной деятельностью. Большое внимание уделяется контролю за лесными пожарами – оценке пожароопасной ситуации в лесах, слежению за возгоранием и развитием пожаров с целью их локализации и тушения; учету площадей выгоревших лесов, определению ущерба от пожара, контролю за лесовозобновлением на горях. Разработаны ГИС для этих целей.

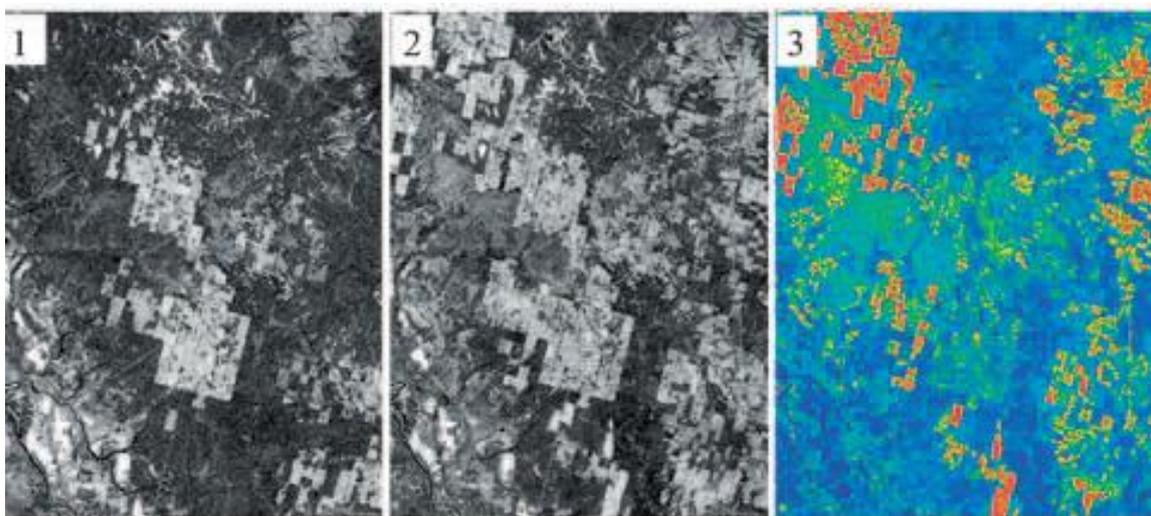


Рис. 4.23. Изображение, полученное в результате вычитания фрагментов двух снимков TM/Landsat 5:

1 – май 1985 г., 2 – май 2009 г., 3 – разностное изображение, оттенками оранжево-красного цвета показаны вырубки за прошедший период [Лабутина, Балдина, 2011]

В области лесного хозяйства методы дистанционного зондирования используются при инвентаризации лесов с целью определения качественных и количественных характеристик лесных массивов, т. е. определения типов лесонасаждений и доминирующих пород, оценки запасов лесоматериалов.

Важными задачами, решаемыми при помощи данных дистанционного зондирования, также являются:

- обнаружение и наблюдение лесных пожаров;
- определение оценки ущерба, нанесенного лесными пожарами, болезнями леса, загрязнением воздуха, бурями, кислотными дождями;
- контроль уничтожения лесов в результате планомерных и бесконтрольных вырубок, приводящих к уменьшению фонда ценных пород деревьев.

Лесные пожары являются частью природного репродуктивного цикла, способствуя обновлению растительного покрова и высвобождению питательных веществ из почвы. Однако внезапно возникающие и быстро распространяющиеся лесные пожары представляют угрозу для населения, промышленных объектов и животного мира. Ключевой в этой связи является информация, помогающая предупреждать возникновение обширных лесных пожаров, контролировать распространение огня, оценивать возможные последствия пожара и планировать мероприятия по тушению и восстановлению поврежденных территорий.

Технология дистанционного зондирования успешно применяется для решения перечисленных выше задач, позволяя комплексно исследовать удаленные и часто недоступные территории (рис. 4.24 и 4.25).

Лесные службы разных стран картографируют пожароопасные ситуации, очаги пожаров, площади гарей, оценивают ущерб от пожаров. Для этого новые возможности открывает спектральная съемка. Например, материалы, получаемые системой MODIS с большим числом каналов в тепловой инфракрасной части спектра, позволяют выявлять пожары на ранних стадиях возгорания. Очаги возгорания можно дешифровать как визуально, так и автоматизированно, используя яркостные температуры тепловых ИК-каналов. Алгоритмы детектирования пожаров в автоматическом режиме основаны на значительной разнице температур земной поверхности (обычно не выше 10–25 °С) и очага пожара (300–900 °С). Существенные различия в тепловом

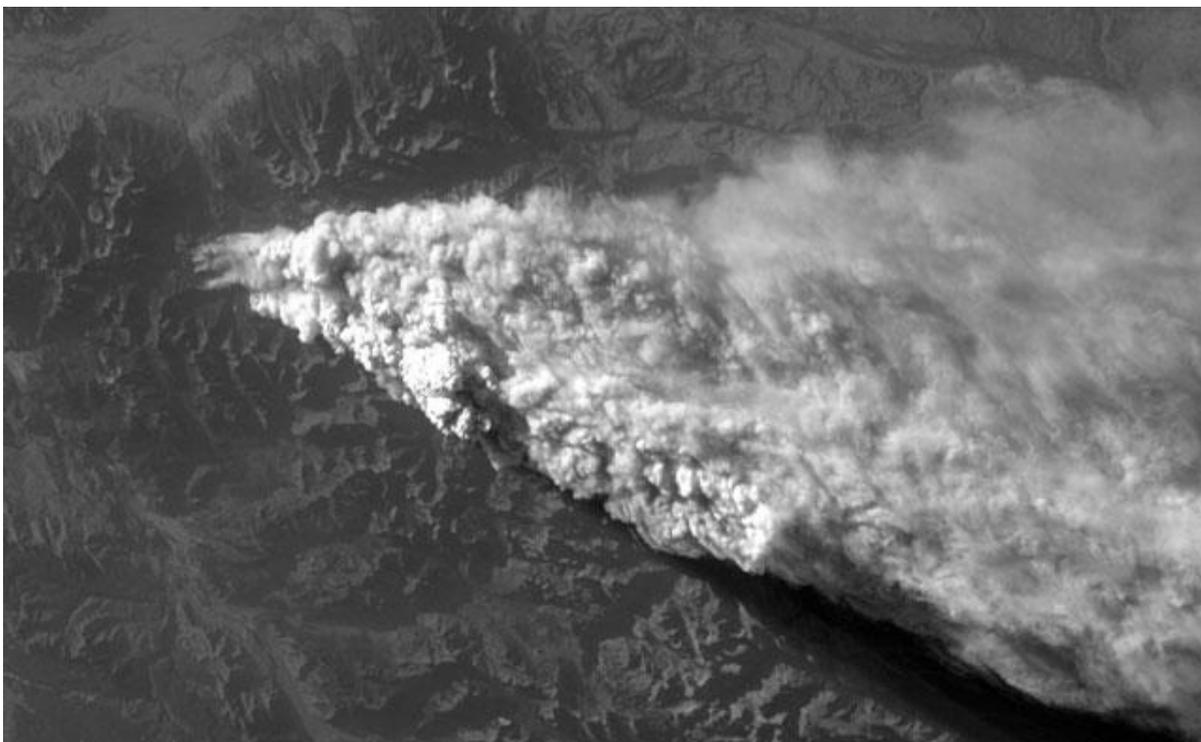


Рис. 4.24. Лесной пожар в Монтане (США) на снимке от 13 августа 2007 г., сделанного с «Шаттла»

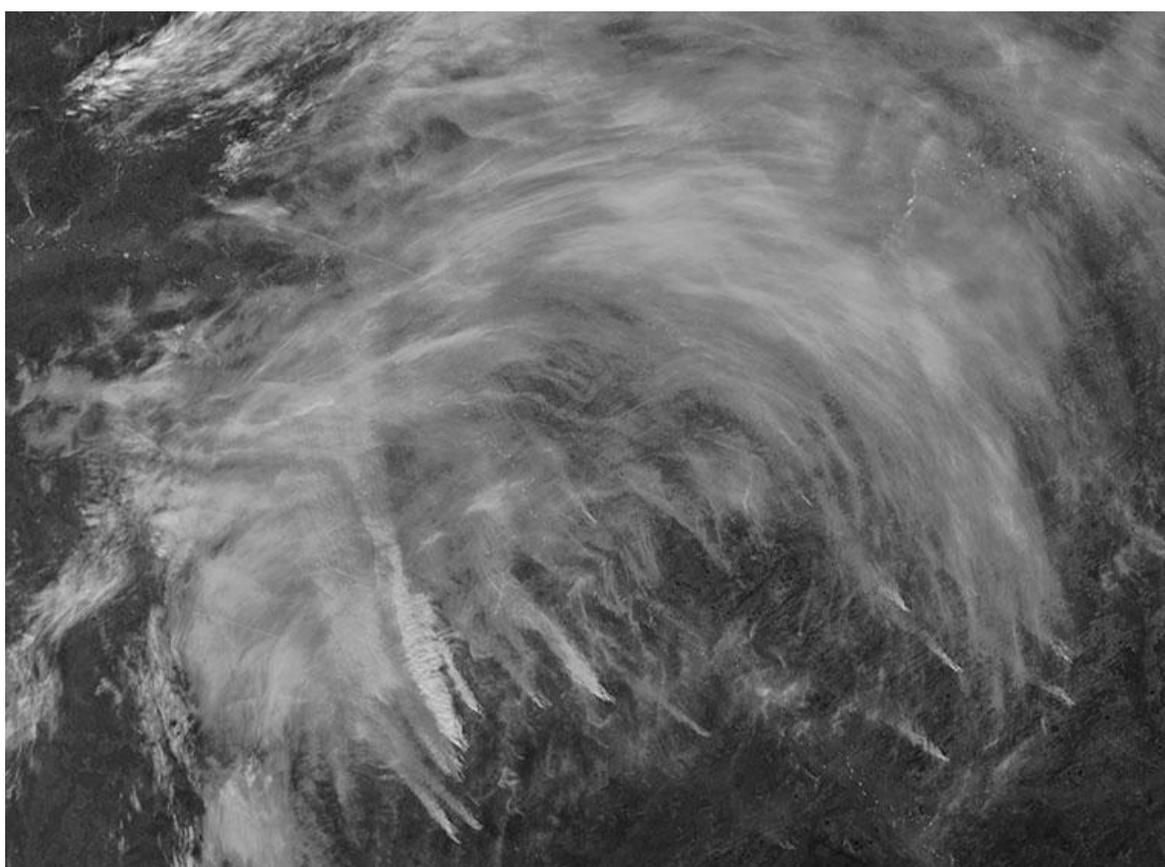


Рис. 4.25. Лесные пожары в Томской области на снимке, сделанном в сентябре 2012 г. спектрометриком MODIS: видны дымовые шлейфы от многочисленных очагов возгорания

излучении объектов фиксируются на снимке, а информация, поступающая с других спектральных каналов, помогает отделить облака. Анализ данных инфракрасных каналов идентифицирует области как наземного, так и подповерхностного горения и тления. Анализ данных видимого диапазона излучения дает информацию о задымленности, направлении распространения пожара и потенциально опасных участках.

Дистанционное зондирование также дает возможность планировать маршруты доступа к очагам возгорания и/или пути эвакуации, позволяя оптимально использовать ресурсы, необходимые для предотвращения и тушения лесных пожаров.

4.7. Применение данных дистанционного зондирования в задачах городского и регионального планирования

Мониторинг развития инфраструктуры и землепользования в регионе (включая город) необходим для оценки численности населения, планирования направлений развития и расширения города, для выявления существующих и потенциальных зон экологических нарушений. По космическим снимкам высокого разрешения решают многие задачи изучения и картографирования городов. В первую очередь их используют для изучения динамики быстроменяющихся городских границ, прироста площади городов и развития транспортных магистралей, роста урбанизации во многих районах планеты. Делаются попытки определять численность населения в городах на основе эмпирических зависимостей между числом жителей и площадью городов разных типов, изучается использование городских земель. Отображение на снимках густоты застройки, озелененности жилых массивов, промышленных зон позволяет дать объективную экологическую оценку городских территорий. По тепловым ИК-снимкам изучают тепловое воздействие городов на окружающие территории.

Развитие (и, как следствие, расширение) городов, являясь безусловным показателем экономического развития и индустриализации, в целом оказывает негативное влияние на состояние окружающей среды региона. Экономическое развитие города затрагивает как пригородные сельское и лесное хозяйства, так и общую экологическую обстановку в городе и регионе.

В области слежения за развитием инфраструктуры города и региона можно выделить следующие задачи, решаемые при помощи методов дистанционного зондирования:

- оценка изменений территорий, занятых городами, населенными пунктами, промышленными зонами, и их состояния;
- выявление зон экологических нарушений (загрязнение почвы, атмосферы, водоемов);
- слежение за восстановлением нарушенных природных ландшафтов в результате их промышленного использования;
- мониторинг отдельных объектов городской инфраструктуры (дороги, мосты, промышленные объекты);
- выявление объектов размещения отходов производства и потребления;
- определение состояния объектов недропользования;
- городское планирование, строительство, транспорт, жилищно-коммунальное хозяйство;
- кадастровые работы;
- региональная картография.

При использовании данных дистанционного зондирования для муниципального управления и градостроительства обеспечивается мониторинг фактического использования земель муниципальных образований, включающий получение информации о состоянии территории, решение проблем упорядочения существующей застройки и реконструкции многоэтажного и частного жилого фонда, определение точных границ застройки и т. д.

4.8. Применение данных дистанционного зондирования в задачах охраны окружающей среды

Многие виды антропогенного воздействия на природную среду хорошо передаются на снимках. Своеобразное отображение имеет промышленное, селитебное, сельскохозяйственное воздействие на природу, хорошо видны места открытой добычи полезных ископаемых (рис. 4.26): карьеры и горные выработки, отстойники и хвостохранилища обогатительных предприятий. Застроенность пригородных и городских земель можно определить количественно. На снимках хорошо видна распаханность территории, по размерам и форме полей можно судить о производственной направленности хозяйств, возделываемых культурах, применяемых севооборотах и пр.



Рис. 4.26. Карьер Коршуновского железорудного месторождения (Иркутская область) 27 апреля 2002 г. по данным панхроматической съемки IRS (по информации ФГУНПП «Росгеолфонд», 2013)

Снимки отображают как формы хозяйственной деятельности человека, так и различные, часто неблагоприятные изменения природной среды, связанные с этой деятельностью, – эродированность почв, пастбищную дигрессию, в особенности приколледное опустынивание, вырубленность лесов, лесные пожары и гари, зоны повреждения растительности дымом промышленных предприятий, сброса промстоков в водоемы, деградации растительности вблизи нефтескважин и линий нефтегазопроводов, загрязнения снежного покрова вокруг городов. Благодаря четкой фиксации таких особенностей природопользования снимки выполняют ревизионную роль, их применяют для контроля отрица-

тельного антропогенного воздействия и действенности мероприятий по рекультивации земель, лесовосстановлению, борьбе с эрозией и т. п., их используют для создания карт экологической оценки территории и прогноза развития экологической ситуации.

Озабоченность человечества глобальными экологическими проблемами нашла отклик в разработке спутниковых программ глобального наблюдения Земли и мониторинга озонового слоя, загрязняющих примесей в атмосфере, концентрации углекислого газа и других парниковых газов, потенциально вызывающих нарушения теплового баланса Земли, оценки биомассы суши и океана. Такие программы реализует, например, американская долговременная программа EOS: спутники Terra и Aqua ежедневно предоставляют глобальную информацию мировому научному сообществу через Интернет.

Контроль загрязнения атмосферы. Быстрое развитие методов и средств контроля газовых и аэрозольных загрязнений атмосферы в последние десятилетия вызвано заметно возросшим пониманием их влияния на состояние окружающей среды. Существенные изменения в состав и содержание атмосферных газовых примесей, иногда превосходящие их естественные вариации, вносит хозяйственная деятельность человека. Антропогенные выбросы таких газов, как углекислый газ и метан, заметно увеличивают их содержание в атмосфере. Кроме того, в результате хозяйственной деятельности в атмосферу поступает большое количество газов, которых раньше не было в ее составе.

Воздействие атмосферных примесей на окружающую среду можно условно разделить на токсическое и климатическое. Токсическое воздействие на здоровье человека, животных и растений, на биосферу вообще, а также на объекты неживой природы оказывают многие газовые примеси антропогенного происхождения в сильно загрязненной атмосфере больших городов и промышленных районов. Вне этих районов уровень содержания токсичных примесей и их влияние на окружающую среду в целом незначительно. Газовые примеси естественного и антропогенного происхождения оказывают также влияние на климат, погоду, локальные, региональные и глобальные атмосферные процессы. Такие газовые примеси распространяются на большие расстояния, попадают в верхнюю тропосферу и стратосферу и в итоге накапливаются во всей атмосфере.

При использовании методов дистанционной индикации газов в интересах контроля загрязнения окружающей среды информация дистанционного зондирования Земли из космоса позволяет решать следующие задачи:

1. Определять общее содержание и распределение газов в атмосфере по вертикали, что позволяет установить:

- глобальный уровень загрязнения;
- региональное рассеяние загрязнителей и их циркуляцию;
- пространственное и временное изменение содержания загрязняющих веществ над городами, сельскохозяйственными угодьями и океаническими районами;
- механизм выпадений загрязняющих веществ;
- особенности протекания атмосферных химических процессов;
- особенности формирования транснациональных потоков загрязняющих веществ.

2. Осуществлять картографирование местоположения локальных источников загрязнения (целлюлозно-бумажных комбинатов, сталелитейных заводов, нефтеперерабатывающих предприятий, химических заводов, горнообогатительных комбинатов и т. д.).

3. Осуществлять наблюдение за отдаленными районами захоронения токсичных веществ.

Оптическое зондирование атмосферы, основанное на упругом рассеянии света, фактически появилось еще до создания лазеров. Однако оптические методы дистанционного зондирования природной среды стали интенсивно развиваться лишь с применением лазеров. В лидаре источником зондирующего излучения является лазер. При дистанционном зондировании атмосферы молекулы газов и аэрозоли вызывают ослабление проходящего через нее лазерного излучения. Часть зондирующего лазерного излучения рассеивается в обратном направлении (в сторону приемника лидара) на молекулах газов и аэрозольных частицах либо отражается от топографических объектов (деревья, дома, холмы и т. п.) или от специально установленных экранов и отражателей. Это излучение с помощью приемной оптики собирается и направляется на фотодетектор, который преобразует его в электрический сигнал, пропорциональный интенсивности принятого оптического излучения. Значение принятого сигнала определяется свойством атмосферы рассеивать излучение в обратном направлении, отражающими характеристика-

ми топографических объектов или отражателей, ослаблением излучения на трассе зондирования «лидар – объект зондирования – лидар». Поэтому электрический сигнал, снимаемый с фотодетектора, содержит информацию о присутствии в атмосфере газов и аэрозолей, их концентрации и расстоянии до объектов зондирования. Однако, чтобы извлечь эту информацию, необходимы специальные методы измерения и алгоритмы обработки, так как величина регистрируемого лидаром сигнала зависит от длины волны лазерного излучения, числа, размера, формы и оптических свойств аэрозольных частиц и молекул газов, находящихся на трассе зондирования.

Метод дифференциального поглощения рассеянной энергии заключается в том, что информация о концентрации исследуемого газа или аэрозоля в атмосфере извлекается из сравнения двух регистрируемых лазерных сигналов в достаточно узком спектральном диапазоне длин волн, одна из которых расположена в линии (или полосе) поглощения газа, а вторая лежит в области или слабого, или полного отсутствия поглощения.

Существуют два подхода к проведению измерений содержания газовых компонент в атмосфере лидаром дифференциального поглощения. Оба подхода предполагают использование для зондирования двух (для одного газа) лазерных импульсов с незначительно отличающимися длинами волн (одну выбирают таким образом, чтобы она находилась в сильно поглощающей части интенсивной линии поглощения интересующей газовой компоненты, другую – в дальней части «крыла» этой линии поглощения) и последующее сравнение ослабления этих импульсов. Разница в методах измерений определяется механизмами отражения лазерного излучения к приемной системе. Первый метод основан на упругом рассеянии от газовых молекул в атмосфере, его называют методом дифференциального поглощения и рассеяния. Этот метод позволяет проводить пространственно-разрешенные измерения газовых компонент атмосферы на значительном расстоянии от лидара. Второй метод основан на отражении лазерного излучения от расположенной на фиксированном расстоянии мишени (метод с отражателем). В этом случае можно существенно снизить уровень необходимой мощности лазерного источника. Еще более высокую чувствительность можно достичь, используя специальные уголкового отражатели.

При составлении *прогнозов распространения загрязняющих веществ* в атмосфере широко используется информация, получаемая с использованием спутниковых средств контроля атмосферных ветров. В тропической и субтропической зонах изображения, получаемые геостационарными метеорологическими спутниками, используются для восстановления структуры тропосферных ветров по перемещениям облаков. За пределами тропической климатической зоны геострофическая ветровая компонента восстанавливается на основе данных о температурных полях.

Оценка зон техногенного загрязнения в сфере влияния городов и транспортной сети. Это направление занимает особое место среди современных направлений использования спутниковых съемок. На основе полевых экспериментов и экспедиционных обследований выяснены параметры связей яркости изображения с количеством твердых загрязнителей в снегу, изучен характер изменения этих связей во времени и по территории, теоретически обоснована возможность определения по снимкам нескольких контуров загрязненности снега относительно фоновых значений. По снимкам картографированы хронически загрязняемые площади вокруг городов для всех крупных водосборов рек России, в том числе и расположенных на территориях соседних государств: Украины, Белоруссии, Казахстана, Эстонии, Латвии, Литвы, Китая, Монголии, Финляндии, Польши; определена структура размещения загрязняемых площадей в бассейнах Балтийского, Черного и Каспийского морей. На снимках со спутника Terra (рис. 4.27) прекрасно отображаются ореолы городов и дорог Иртышско-Ишимского междуречья.

Нефтяное загрязнение и органические пленки. Нефтяное загрязнение морской поверхности обнаруживается на космических снимках благодаря тому, что нефтяная пленка сдерживает волнение и вызывает появление *сликов*.

Слики (от англ. *slick* – гладкий, блестящий) – это гладкие зеркальные полосы или пятна на поверхности океанов, морей или внутренних водоемов, которые имеют на радиолокационных изображениях практически черный цвет. При легком бризе они могут иметь вид пятен, а при ветре более 5 м/с разбиваются на узкие полосы. Основная причина их появления – пленки различных органических соединений, в том числе поверхностно-активных веществ (ПАВ). Источниками органического вещества

в океане являются животные и растения, а также естественные источники сырой нефти. Вещества биогенного происхождения образуют на поверхности моря пленки в несколько мономолекулярных слоев толщиной 10^{-7} – 10^{-6} см, скапливаясь в районах высокой биологической активности.

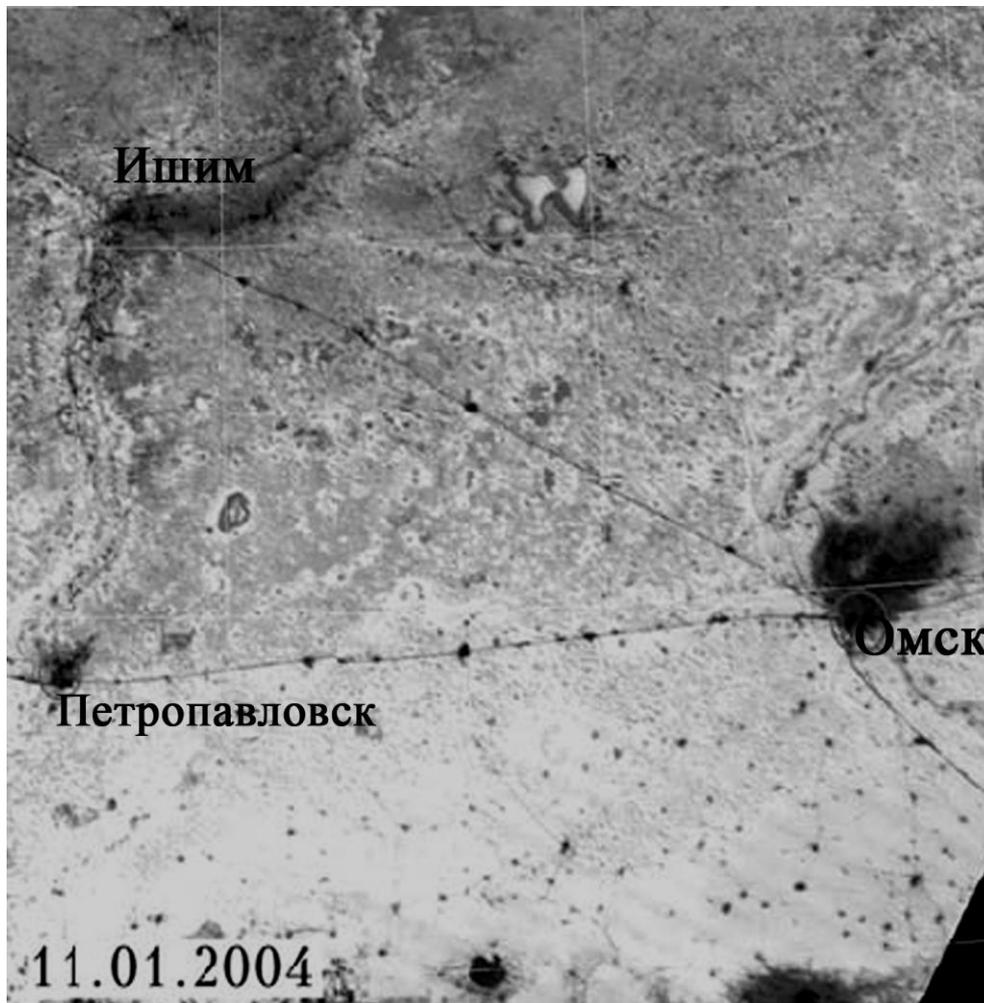


Рис. 4.27. Изображение на снимках со спутника Тегга городских ореолов и дорог Иртышско-Ишимского междуречья [Лаборатория дистанционных ..., 2013]

Биогенные пленки – результат жизнедеятельности морских организмов и растений, главным образом фито- и зоопланктона, а также бактерий; они образуются в море при сложных биохимических реакциях в процессе жизнедеятельности и разложения морских организмов и не могут считаться загрязнением в прямом смысле слова. Органические пленки сохраняются в море при слабых ветрах в течение продолжительного времени и начинают разрушаться, когда скорость ветра превышает 6–7 м/с.

После прекращения действия сильного ветра органические вещества снова выносятся на поверхность и образуют слики.

Пленки антропогенного происхождения на поверхности моря образуют не только нефть и продукты ее переработки, но и различные технические и бытовые масла, жирные кислоты и спирты, синтетические поверхностно-активные вещества (СПАВ), содержащиеся в бытовых, промышленных и канализационных стоках.

Разлившаяся в море нефть создает пленки различной толщины, так как нефть и продукты ее переработки представляют собой сложные смеси. Благодаря своим физико-химическим свойствам нефть может существовать в океане довольно долгое время в виде пленок, в эмульгированном виде или в виде агрегатов. На распространение пленок по поверхности моря влияют два процесса: перенос (дрейф) под действием ветра, волн и течений и самопроизвольное растекание по поверхности. При сильном ветре пятно разрушается, и в слое ветрового перемешивания возникает нефтяная эмульсия (причем водная эмульсия со временем оседает на дно). В отличие от ПАВ/СПАВ, нефть никогда не растекается до мономолекулярных слоев, а ее пленки имеют большую толщину.

Отрицательное воздействие нефтяных загрязнений на морские экосистемы связано как с нарушением процессов взаимодействия океана с атмосферой, так и с накоплением в них вторичных загрязнений. Пленки нефти и СПАВ оказывают существенное влияние на ряд гидрохимических и гидробиологических процессов в океане. Бактериальное разложение и естественное окисление нефти и нефтепродуктов затруднено.

Все возрастающее антропогенное загрязнение океана нефтью становится проблемой высокой общественной значимости. Поверхностные загрязнения антропогенного происхождения в основном связаны с разливами нефти и нефтепродуктов, а также с выбросом в море спектра весьма разнообразных веществ бытового и промышленного происхождения. Для обнаружения и исследования пленочных загрязнений моря применяются пассивные и активные датчики в ультрафиолетовом, видимом, инфракрасном и радиодиапазонах.

В настоящее время большинство датчиков выполнено в самолетных вариантах. В видимом и инфракрасном диапазонах

пятна загрязнений имеют более светлый тон по сравнению с незагрязненной поверхностью; при малой высоте солнца над горизонтом в видимой области возможен темный тон пятен. Тепловые инфракрасные датчики могут работать как в дневное время, так и ночью, однако их показания значительно искажаются при наличии облачности или осадков. Радиолокационная съемка всепогодна и независима от освещения, однако ее возможности ограничены состоянием поверхности моря. Контрасты шероховатости на морской поверхности могут вызывать и другие процессы в океане и атмосфере, создавая сходные радиолокационные образы. Однако способность радиолокаторов к всепогодному мониторингу делает их незаменимым средством дистанционного зондирования.

Возможность радиолокаторов с синтезированной апертурой обнаруживать загрязнения на морской поверхности в целом зависит от геометрии съемки, скорости ветра (состояния поверхности моря), типа загрязняющего вещества и других факторов. Тонкие пленки СПАВ обычно наблюдались при скоростях ветра 3–6 м/с, пятна нефти – при ветре до 12 м/с. На радиолокационных снимках можно достаточно точно определить положение, форму и размер пятен; при повторных съемках – направление и скорость дрейфа.

С помощью радиолокаторов с синтезированной апертурой высокого разрешения возможно осуществлять локальный мониторинг районов морской нефтедобычи на шельфе, морских путей перевозки нефти, оперативно контролировать места аварий танкеров, экологическую обстановку во внутренних морях, в портах и в местах сброса сточных вод. Уже созданы и успешно работают геоинформационные системы для мониторинга нефтяного загрязнения Средиземного моря, районов нефтедобычи на шельфе Северного и Баренцева морей. Для решения задачи обнаружения и локализации нефтяных загрязнений на морской поверхности, а также для определения типа загрязнения необходимо привлекать дополнительную информацию, поскольку визуальный анализ радиолокационных снимков не позволяет достаточно надежно классифицировать наблюдаемые пятна, а также отличить нефтяные слики от сликов органических СПАВ биогенного происхождения.

Ниже приведен радиолокационный снимок акватории Северной Атлантики у банки Галисия в районе катастрофы танкера «Престиж» в ноябре 2002 г. (рис. 4.28). Снимок получен со

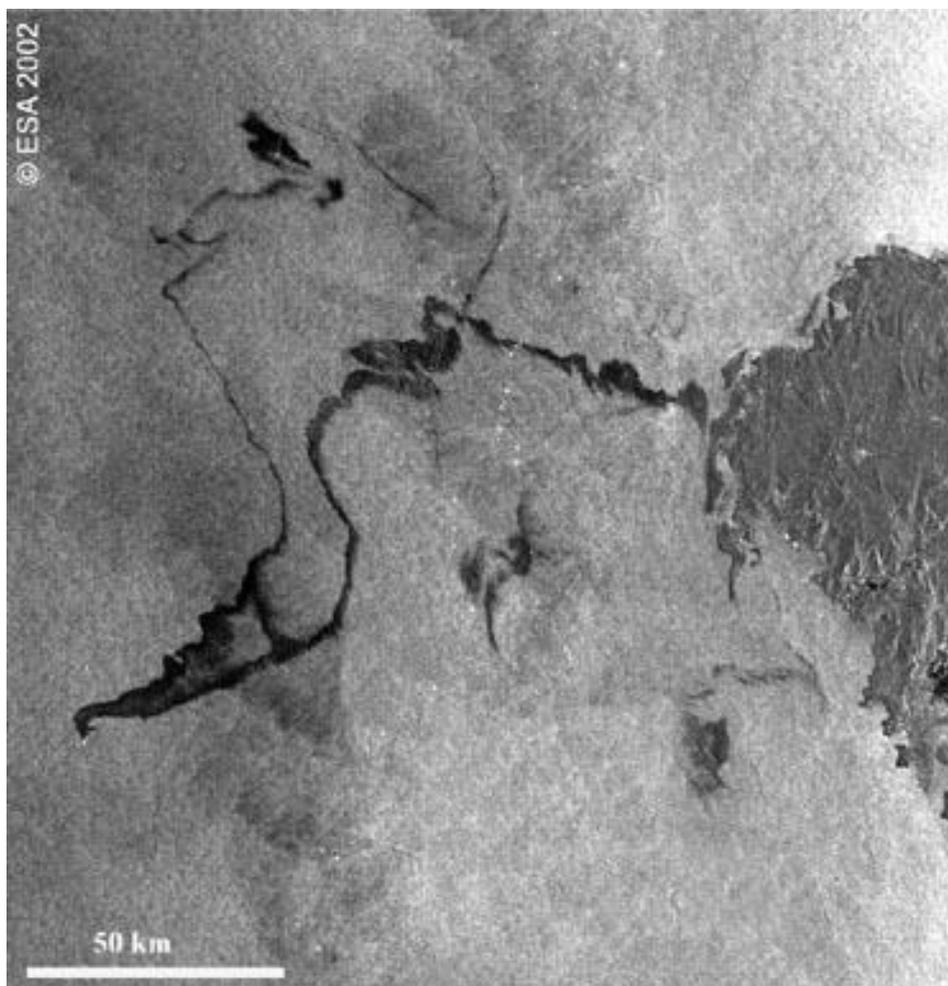


Рис. 4.28. Радиолокационный снимок со спутника ERS-2 акватории Северной Атлантики у банки Галисия в районе катастрофы танкера «Престиж» в ноябре 2002 г. [Интернет-семинары ..., 2013]

спутника ERS-2. Для чистой морской воды характерен слабоконтрастный серый фон. Темные пятна на этом фоне – поверхностные пленки нефтяных загрязнений, белые точки – морские суда. От танкера «Престиж» – белой точки в юго-западной части снимка – в северо-восточном направлении тянется темный шлейф, который разделяется на два рукава – северный и восточный. Хорошо видны отдельные темные пятна эмульсии топлива, образовавшиеся в результате утечки из танков «Престижа» в первые дни аварии.

4.9. Применение данных дистанционного зондирования в задачах выявления чрезвычайных ситуаций

Многие из перечисленных выше задач (мониторинг лесных пожаров, оценка зон затопления и т. д.) можно отнести также к задачам обнаружения и контроля чрезвычайных ситуаций (ЧС). Ме-

тоды дистанционного зондирования Земли из космоса позволяют на принципиально новом уровне подойти к решению задач выявления ЧС; явлений, приводящих к ЧС; а также оценки их последствий. Интенсивно развивается оперативное картографирование ЧС.

Оперативное картографирование наводнений, зон землетрясений, вулканизма помогает оптимизировать стратегии борьбы с последствиями стихийных бедствий. Ведется оперативный контроль за загрязнением природной среды – например, за нефтяными разливами в морях и океанах по данным радиолокационной съемки.

Данные дистанционного зондирования, благодаря охвату и периодичности спутниковой съемки, позволяют оперативно оценивать обстановку и служат основой для своевременного прогноза многих чрезвычайных ситуаций. При разработке превентивных мер эти данные используются для решения следующих задач:

- 1) определения и картографирования наиболее опасных мест;
- 2) прогноза вероятности возникновения природных и техногенных катастроф;
- 3) мониторинга явлений для определения начала и возможных вариантов развития катастрофических процессов.

Космические снимки используют для получения информации о размерах пострадавшей территории, уровне нанесенного ущерба и нуждах местного населения. Поскольку в период таких событий время становится жизненно важным фактором, данные должны передаваться практически без задержки. Во время наводнений и засух можно использовать снимки, которые обладают невысоким пространственным, но высоким временным разрешением. Данные с геостационарных спутников, которые передаются на Землю каждые полчаса, используют для мониторинга таких непродолжительных природных катастроф, как циклоны и торнадо. В общем случае для борьбы с ЧС полезно использовать комбинацию различных наборов данных, каждый из которых характеризуется высокой пространственной, временной или спектральной разрешающей способностью. Обработка, анализ и сопоставление данных дистанционного зондирования Земли повышает оперативность реагирования на техногенные и природные ЧС, позволяет эффективнее бороться с последствиями аварий и катастроф (загрязнений при добыче и транспортировке полезных ископаемых, лесных пожаров, паводков, наводнений и т. п.).

Высокогорные стихийно-разрушительные явления. Высокая активность опасных природных процессов в горных районах делает космическую съемку важным инструментом мониторинга и предотвращения чрезвычайных ситуаций. В горах широко распространены гравитационные процессы, к которым относятся снежные лавины и селевые потоки, нередко имеющие катастрофический характер и сопровождающиеся гибелью людей, повреждением или разрушением дорог, построек и т. д., а также изменением природной среды. Результаты схода селей и лавин проявляются в гибели лесов («лавиновые прочесы»), изменении рельефа – появлении нагромождений обломков или грязекаменной массы, образовании аккумулятивных форм своеобразных очертаний в горных долинах, по которым участки схода лавин и селей опознаются на местности и могут быть определены на снимках.

20 сентября 2002 г. в долине р. Геналдон в Северной Осетии произошла крупнейшая в истории России гляциальная катастрофа. Гигантский вал воды, льда и камней пронесся вниз по долине, сметая все на своем пути. Грандиозная по объему ледовая масса была остановлена тесниной Скалистого хребта, а селевые потоки, порожденные ею, не дошли до селения Гизель, насчитывающего 10 тыс. жителей, всего 2 км. В результате стихийного бедствия были уничтожены базы отдыха, жилые дома, инфраструктура, завод минеральных вод. По официальным данным, на конец декабря 2002 г. обнаружены останки 19 погибших, пропавшими без вести считаются 106 человек. Ледовая масса в Кармадонской котловине преградила путь боковым притокам р. Геналдон, образовались многочисленные подпрудные озера, самое крупное из них затопило три улицы селения Старая Саниба. В октябре 2002 г. ученые оценивали объем Санибанского озера в 3 млн м³: был риск внезапного прорыва озера через ледовую массу, что могло привести к катастрофическим селям и затоплению села Гизель.

Основным источником ледовых масс был ледник Колка, расположенный на северном склоне Казбекско-Джимарайского горного массива, являющегося частью Бокового хребта Большого Кавказа. Ледник относится к категории пульсирующих и в прошлом на нем наблюдались подвижки – периоды, когда скорость тока ледника резко увеличивалась и он продвигался вниз по долине.

Взгляды гляциологов на причины произошедшей катастрофы различны. Часть специалистов считает, что произошла очередная

подвижка пульсирующего ледника. Другие главной причиной полагают серию обвалов висячих ледников на поверхность Колки, которая вызвала его смещение. Среди факторов, вызвавших катастрофу, называют также землетрясения, накопление воды на ложе ледника, вулканическую активность, метеорологические условия, способствовавшие накоплению снега на висячих ледниках.

По материалам космической съемки (рис. 4.29) можно предположить, как развивались события в момент катастрофы, и оценить размер ущерба. Зона катастрофы выделяется серой полосой, вытянутой через весь снимок с юга на север, вдоль русла р. Геналдон до ее впадения в р. Гизельдон. Видны следы свежих обвалов – черные полосы на заснеженном склоне горы Джимарай-хох над ледником Колка в южной части снимка (рис. 4.29, 1). Высота склона горы Джимарай-хох в месте обвалов превышает 1000 м.

Значительная часть ледника Колка была, возможно, «выбита» обвалами и сброшена вниз по долине. Затем гигантская масса устремилась вниз, вовлекая в движение рыхлые отложения, воду, мертвые льды. След движения по поверхности языка ледника Майли ледово-каменной массы хорошо читается на снимке в виде полосы обломочного материала (рис. 4.29, 2).

Ледово-каменная масса двигалась, переходя с одного борта долины на другой, вследствие этого заплески на бортах расположены несимметрично. След от удара о борт при повороте в долину р. Геналдон виден на снимке (рис. 4.29, 3). В ходе движения, происходившего в полосе шириной 400–500 м, высота волн ледово-водно-каменной массы достигала 100–150 м.

После удара о Скалистый хребет раздробленная масса льда, воды и камней остановилась и заняла все днище Кармадонской котловины (рис. 4.29, 4). Впоследствии выше нее образовалось крупное подпрудное Санибанское озеро, изобразившееся на снимке голубым цветом (рис. 4.29, 5).

Применение космических снимков открывает новые возможности в исследовании потенциально опасных природных объектов во время стабилизации их состояния. Так, изучение космических снимков за более поздние даты позволило констатировать исчезновение многих подпрудных озер в Кармадонской котловине и уменьшение площади Санибанского озера, активное таяние льда и его разрушение речными потоками. На снимках за сентябрь 2010 г. видно, что зона скальных обвалов над ледником Колка значительно разрослась.



Рис. 4.29. Снимок, полученный со спутника EO-1 многозональным сканером ALI (Advanced Land Imager) 6 октября 2002 г., через 16 дней после катастрофы [Интернет-семинары ..., 2013]

Цунами (рис. 4.30) – это особый класс поверхностных гравитационных волн, распространяющихся в океане на большие расстояния от места своего возникновения. В глубоком океане высота волн цунами не превышает десятка сантиметров, на шельфе волны замедляются, укорачиваются, высота их увеличивается, а в прибойной зоне может достигать десятков метров. Прогнозировать с достаточной точностью высоту цунами у берега современная наука пока еще не в состоянии.



Рис. 4.30. Цунами у побережья о. Шри-Ланка 26 декабря 2004 г.
на снимке со спутника QuickBird

Традиционные методы предупреждения цунами основаны на сейсмической информации, получаемой сразу после землетрясения, и на расчетах времени прихода волны и ее высоты. Однако эффективность этих методов снижается из-за отсутствия данных о параметрах цунами в открытом океане, что повышает уровень ложных тревог.

Современные радиоальтиметры, обеспечивая измерения уровня океана, дают информацию для решения широкого круга задач, связанных с уточнением формы геоида, картографированием гравитационных аномалий поля уровня океана, измерением геострофических течений, высоты приливов, штормовых нагонов, высоты морских волн. Что же касается высоты волны в глубоком океане, то именно со спутника Torex/Poseidon впервые были измерены параметры сейсмических волн. Цунами в Индийском океане было обнаружено через 2 часа после индонезийского землетрясения 26 декабря 2004 г. с помощью альтиметра на спутнике Jason-1.

Большой объем информации о величине и степени разрушений, вызванных этим цунами, получают с помощью космических снимков (рис. 4.31). Для оценки ущерба, нанесенного цунами, в основном применяются системы наблюдений в видимом диапазоне высокого разрешения с самолетов и космических аппаратов.



Рис. 4.31. Город Арагама (Япония) до (вверху) и после цунами 11 марта 2011 г. (внизу) на спутниковых снимках сверхвысокого разрешения

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Учебное пособие направлено на освещение основных сведений о дистанционном зондировании Земли, необходимых при подготовке студентов, обучающихся по направлениям 022000.62 «Экология и природопользование» и 021600.62 «Гидрометеорология».

В пособии изложены базовые понятия дистанционного зондирования, физические основы дистанционных методов зондирования Земли, освещено понятие электромагнитного излучения, его взаимодействие с атмосферой и подстилающей поверхностью и т. д.

Кроме этого, в учебном пособии рассмотрены основные технологии получения снимков и наиболее важные характеристики сканеров и спутниковых платформ, описаны этапы предварительной обработки цифровых снимков, изложены вопросы неконтролируемой и контролируемой классификации и визуального дешифрирования снимков.

Особое внимание в настоящем пособии было уделено основным направлениям применения данных дистанционного зондирования Земли. При этом рассмотрены вопросы, посвященные применению спутниковых снимков в океанологии, метеорологии и гидрологии, в сельском и лесном хозяйстве, в задачах охраны окружающей среды и выявления чрезвычайных ситуаций, а также для составления и обновления топографических и тематических карт.

Для лучшего понимания изложенного материала студентами данное учебное пособие было снабжено иллюстрациями и таблицами, которые поясняют, а иногда и дополняют его текстовую часть.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ И РЕКОМЕНДУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

Возможности построения автоматизированных систем обработки спутниковых данных на основе программного комплекса XV_SAT / В. А. Егоров [и др.] // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса: Физические основы, методы и технологии мониторинга окружающей среды, потенциально опасных объектов и явлений. – М. : Полиграфсервис, 2004. – С. 431–436.

Картоведение : учебник для вузов / А. М. Берлянт [и др.] ; под ред. А. М. Берлянта. – М. : Аспект Пресс, 2003. – 477 с.

Интернет-семинары Межуниверситетского аэрокосмического центра [Электронный ресурс]. – URL : <http://www.geogr.msu.ru/science/aero/acenter/cont.htm>.

ИТЦ «СКАНЭКС» [Электронный ресурс]. – URL: <http://scanex.ru/ru/index.html>.

Кашкин В. Б. Дистанционное зондирование Земли из космоса. Цифровая обработка изображений : учеб. пособие / В. Б. Кашкин, А. И. Сухонин. – М. : Логос, 2001. – 264 с.

Книжников Ю. Ф. Аэрокосмические методы географических исследований : учеб. для студентов вузов / Ю. Ф. Книжников, В. И. Кравцова, О. В. Тутубалина. – М. : Академия, 2004. – 336 с.

Спутниковый мониторинг озера Алтын Асыр и водных ресурсов Туркменистана [Электронный ресурс]. – URL: d33.infospace.ru/d33_conf/tarusa11/pdf/Kostyanou_Turkmenistan.pdf

Лаборатория дистанционных методов и геоинформационных систем (ЛДМ ГИС) ГГИ [Электронный ресурс]. – URL : <http://www.hydrology.ru/depart/dep/lgis/>.

Лабутина И. А. Использование данных дистанционного зондирования для мониторинга экосистем ООПТ : метод. пособие / И. А. Лабутина, Е. А. Балдина. – М., 2011. – 88 с.

Оптико-электронные системы экологического мониторинга природной среды : учеб. пособие / В. И. Козинцев [и др.] ; под ред. В. Н. Рождественкина. – М. : Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2002. – 528 с.

Савиных В. П. Геоинформационный анализ данных дистанционного зондирования / В. П. Савиных, В. Я. Цветков. – М. : Картгеоцентр – Геодезиздат, 2001. – 228 с

Самардак А. С. Геоинформационные системы : учеб. пособие / А. С. Самардак. – Владивосток : ТИДОТ ДВГУ, 2005. – 123 с.

Токарева О. С. Обработка и интерпретация данных дистанционного зондирования Земли : учеб. пособие / О. С. Токарева. – Томск : Изд-во Том. политех. ун-та, 2010. – 148 с.

Трифонова Т. А. Геоинформационные системы и дистанционное зондирование в экологических исследованиях / Т. А. Трифонова, Н. В. Мищенко, А. Н. Краснощеков. – М. : Академический проект, 2005. – 350 с.

ФГУНПП «Росгеолфонд». Сибирский филиал [Электронный ресурс]. – URL: <http://geol.irk.ru>.

Царев В. А. Неконтактные методы измерения в океанологии / В. А. Царев, В. П. Коровин. – СПб. : Изд-во РГГМУ, 2005. – 184 с.

Чандра А. М. Дистанционное зондирование и географические информационные системы / А. М. Чандра, С. К. Гош. – М. : Техносфера, 2008. – 312 с.

ASTER GDEM. – URL: <http://gdex.cr.usgs.gov/gdex>.

Campell J. B. Introduction to remote sensing / J. B. Campell. – N. Y. – London: The Guilford press, 1996 – P. 120–549.

CGIAR: SRTM 90m Digital Elevation Data. – URL: <http://srtm.csi.cgiar.org>.

EarthExplorer. – URL: <http://earthexplorer.usgs.gov>.

GloVis. – URL: <http://glovis.usgs.gov>.

Google Earth. – URL: <http://www.google.com/earth/index.html>.

HydroSHEDS. – URL: <http://hydrosheds.cr.usgs.gov/index.php>.

LandsatLook Viewer. – URL: <http://landsatlook.usgs.gov>.

Remote Sensing Systems. – URL: <http://www.remss.com>.

Учебное издание

Сутырина Екатерина Николаевна

ДИСТАНЦИОННОЕ ЗОНДИРОВАНИЕ ЗЕМЛИ

ISBN 978-5-9624-0801-9

Редактор *В. В. Попова*
Дизайн обложки *П. О. Ершов*

Темплан 2013 г. Поз. 68
Подписано в печать 3.10.2013. Формат 60x90 1/16.
Усл. печ. л. 10,4. Уч.-изд. л. 6,9.
Заказ 77. Тираж 70

Издательство ИГУ
664003, Иркутск, бульвар Гагарина, 36