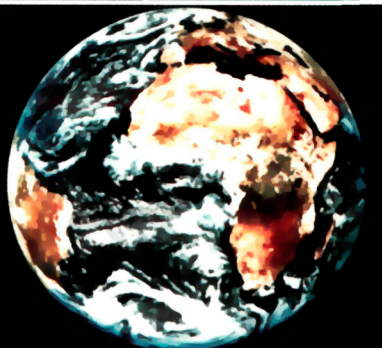


Высшее профессиональное образование

Ю.Ф. Книжников  
В.И. Кравцова  
О.В. Тутубалина

# АЭРОКОСМИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ГЕОГРАФИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Учебник



Естественные  
науки

  
ACADEMA







Ю. Ф. КНИЖНИКОВ, В. И. КРАВЦОВА, О. В. ТУТУБАЛИНА

# АЭРОКОСМИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ГЕОГРАФИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ

*Допущено  
Министерством образования Российской Федерации  
в качестве учебника для студентов высших учебных  
заведений, обучающихся по направлению 510800 «География»  
и специальностям 012500 «География» и 013700 «Картография»*



Москва  
  
2004

УДК 91:528.9(075.8)

ББК 26.8:26.17я73

К53

Рецензенты:

д-р техн. наук, зав. кафедрой картографии Московского государственного университета геодезии и картографии проф. *Т. В. Верещака*;  
д-р геол.-минерал. наук, проф. экологического факультета  
Российского университета дружбы народов *В. Д. Скарятин*

**Книжников Ю.Ф.**

**К53** Аэрокосмические методы географических исследований: Учеб. для студ. высш. учеб. заведений / Ю.Ф. Книжников, В.И. Кравцова, О.В. Тутубалина. — М.: Издательский центр «Академия», 2004. — 336 с., [32] с. цв. ил.: ил.

ISBN 5-7695-1529-5

Учебник подготовлен в соответствии с программой курса по аэрокосмическим методам в рамках дисциплины «Методы географических исследований». В нем рассмотрены физические основы, технические средства и технология получения аэрокосмических снимков. Раскрыты изобразительные свойства и методика дешифрирования снимков, их радиометрические и геометрические свойства, принципы компьютерной и фотограмметрической обработки снимков. Охарактеризованы формирование и современное состояние мирового фонда аэрокосмических снимков в видимом и ближнем инфракрасном диапазоне, в тепловом инфракрасном и радиодиапазоне; выполнена географическая оценка фонда снимков. Дан обзор аэрокосмических исследований Земли, применения снимков для изучения антропогенного воздействия на природную среду и решения экологических задач.

Для студентов высших учебных заведений, обучающихся по специальностям «География» и «Картография».

УДК 91:528.9(075.8)

ББК 26.8:26.17я73

ISBN 5-7695-1529-5



© Книжников Ю.Ф., Кравцова В.И.,  
Тутубалина О.В., 2004

© Издательский центр «Академия», 2004

## ПРЕДИСЛОВИЕ

Географы в своих исследованиях используют помимо методов отраслевых географических наук и общегеографические методы — описательный, математический, картографический, аэрокосмический.

Под аэрокосмическими методами принято понимать совокупность методов исследований атмосферы, земной поверхности, океанов, верхнего слоя земной коры с воздушных и космических носителей путем дистанционной регистрации и последующего анализа идущего от Земли электромагнитного излучения. Аэрокосмические методы обеспечивают определение точного географического положения изучаемых объектов или явлений и получение их качественных и количественных биогеофизических характеристик. В географических исследованиях главную роль играют методы, основанные на регистрации параметров излучения в виде двумерного изображения, снимка. Использование аэрокосмических снимков не только упрощает изучение труднодоступных территорий, но и обеспечивает географа дистанционной геопространственной информацией, которую другими способами получить не удастся.

Снимки с самолетов — одиночные фотографии небольших участков местности — появились перед Первой мировой войной. Сейчас аэрокосмические снимки можно получать днем и ночью, используя для этого не только световое, но и невидимое излучение инфракрасного и радиодиапазона. Работают спутниковые системы разного назначения, выполняя глобальные съемки и поставляя в считанные дни тысячи снимков. В результате обработки первичных аэрокосмических снимков с широким применением компьютерных технологий создаются разнообразные геоинформационные продукты — топографические и тематические карты, фотокарты, цифровые модели местности и др.

Аэрокосмический снимок — это прежде всего информационная модель изучаемого объекта или явления. Аналоговые и цифровые аэрокосмические снимки имеют десятки разновидностей, несут разнообразную информацию о географических объектах и явлениях, о их взаимосвязях и пространственном распределении, состоянии, изменении во времени. Для результативного использования этих снимков исследователь должен знать их информационные свойства и владеть специальными способами и приемами эффективного извлечения из снимков требуемой информации.

Необходимые теоретические знания и практические навыки в данной области будущий географ получает при изучении соответствующего учебного курса.

С момента выхода в свет последнего учебного пособия по аэрокосмическим методам географических исследований, предназначенного для студентов географических факультетов классических университетов, прошло более четверти века<sup>1</sup>. За это время существенно возросли возможности аэрокосмических методов, расширилось их применение в отраслевых географических исследованиях и для изучения нашей планеты как единой системы. Настоящий учебник отражает все происшедшие изменения.

Аэрокосмические методы развиваются стремительно: появляются новые виды съемок, новая аппаратура, новые способы обработки снимков, неудержимо расширяя границы дисциплины. В последние 5—10 лет отмечаются и более глубокие качественные преобразования — происходит прогрессивная замена до недавнего времени лидировавших фотографических технологий на электронно-цифровые. Отбор материала при подготовке учебника был направлен на сбалансированное изложение как традиционных, так и новых вопросов дисциплины, определивших ее состояние на начало XXI века. Однако в университетах вполне допустимо углубленное изучение отдельных разделов дисциплины — дешифрирования, компьютерной обработки, характеристики фонда аэрокосмических снимков и др. — на фоне сжатого общего систематизированного изложения аэрокосмических методов в географических исследованиях, которое дано в учебнике. При этом материал разделов, посвященных физическим основам и техническим средствам получения снимков, а также фонду космических снимков, географы могут использовать как справочный. Еще более выборочный подход возможен при разработке кафедральных курсов, когда преподаватель сосредоточивает внимание на особенностях отраслевых аэрокосмических исследований.

К настоящему времени накоплен обширный материал по применению аэрокосмических методов в науках о Земле. Есть основание говорить о становлении новой дисциплины, которую правильнее назвать «Аэрокосмические исследования Земли». Такой раздел впервые включен в предлагаемый учебник по курсу, который пока называется по-старому.

Учебник подготовлен по линии научно-методического Межуниверситетского аэрокосмического центра, организованного в Московском государственном университете им. М. В. Ломоносова в 1978 г. на базе лаборатории аэрокосмических методов кафедры картографии и геоинформатики географического факультета. Ра-

---

<sup>1</sup> Смирнов Л. Е. Аэрокосмические методы географических исследований. — Л.: Изд-во Ленинградского ун-та, 1975. — 302 с.



бота над учебником велась авторами коллективно, но разделы о физических основах и получении снимков подготовлены в окончательном варианте Ю. Ф. Книжниковым, о свойствах цифровых снимков и их компьютерной обработке — О. В. Тутубалиной, о мировом фонде снимков и их географическом применении — В. И. Кравцовой.

Авторы признательны коллективу научно-исследовательской лаборатории аэрокосмических методов Московского государственного университета им. М. В. Ломоносова, успешно развивающему университетское научное направление — аэрокосмическое зондирование, которое послужило методологической основой учебника, а также преподавателям кафедры картографии и геоинформатики за доброжелательное обсуждение рукописи. Особую благодарность авторы выражают заведующему кафедрой картографии и геоинформатики Московского государственного университета им. М. В. Ломоносова профессору А. М. Берлянту за постоянную поддержку, рецензентам — профессору Московского государственного университета геодезии и картографии Т. В. Верещаке и профессору Российского университета дружбы народов В. Д. Скарятину за конструктивные замечания.

**АЭРОКОСМИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ГЕОГРАФИЧЕСКИХ  
ИССЛЕДОВАНИЙ. ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ**

При изучении географической оболочки или ее компонентов с помощью аэрокосмических методов географ черпает информацию о них из снимков, которые получают с помощью съемочной аппаратуры, удаленной на многие километры от изучаемого объекта. Эта особенность аэрокосмических методов позволяет отнести их к дистанционным.

Дистанционные методы применяются в географических исследованиях очень давно. Правда, вначале использовались *рисованные снимки*, которые фиксировали пространственное расположение изучаемых объектов (цв. вкл. I, 1). С изобретением фотографии возникла наземная фототеодолитная съемка, при которой по *перспективным фотоснимкам* составляли карты горных районов. Развитие авиации обеспечило получение *аэрофотоснимков* с изображением местности сверху, в плане. Это вооружило науки о Земле мощным средством исследований — аэрометодами. *Космические снимки* предоставляют геоинформацию для решения географических проблем регионального и глобального уровней.

История развития аэрокосмических методов свидетельствует о том, что новые достижения науки и техники сразу же используются для совершенствования технологий получения снимков. Так произошло в середине XX в., когда такие новшества, как компьютеры, космические аппараты, оптико- и радиоэлектронные съемочные системы, совершили революционные технологические преобразования в традиционных аэрофотометодах. Это нашло отражение в появлении и широком распространении обобщающего термина *remote sensing*, который не очень точно переводится как *дистанционные методы* или *дистанционное зондирование*.

**Дистанционные и аэрокосмические методы исследований.** Дистанционные методы понимают как любое изучение объекта, осуществляемое на расстоянии, без непосредственного с ним контакта. Например методы исследования морского дна с применением акустического гидролокатора относятся к дистанционным. При аэрокосмических методах исследования информация об удаленном объекте (местности) передается с помощью электромагнитного излучения, которое характеризуется такими параметра-

ми, как *интенсивность, спектральный состав, поляризация и направление распространения*. Зарегистрированные физические параметры излучения, функционально зависящие от биогеофизических характеристик, свойств, состояния и пространственного положения объекта исследования, позволяют изучать его косвенно. В этом заключается сущность аэрокосмических методов.

Электромагнитное излучение разных спектральных диапазонов содержит взаимодополняющую информацию об объектах и явлениях на земной поверхности. Одновременная регистрация излучения в нескольких спектральных зонах (*многозональный принцип*) позволяет получить наиболее разностороннюю характеристику местности.

В зависимости от устройства используемой аппаратуры регистрируется излучение в отдельных *точках* земной поверхности, вдоль *трассы* или на определенной *площади*. Во всех случаях фиксируется излучение от элементарных площадок объекта, конечные размеры которых (*пространственное разрешение на местности*) зависят от расстояния до них и совершенства регистрирующей аппаратуры.

Особенность аэрокосмических методов состоит в том, что между изучаемой местностью и регистрирующей аппаратурой всегда находится слой в общем непрозрачной атмосферы, поэтому вести исследования можно только в отдельных зонах спектра электромагнитных волн, получивших название *окна прозрачности*. Серьезной помехой является также облачность.

Ведущее место в аэрокосмических методах занимает изучение объекта по *сняткам*, поэтому главная их задача заключается в целенаправленном получении и обработке снимков. Аэрокосмические съемки выполняются с помощью специальной съемочной аппаратуры, чаще всего — *фотографических камер, сканеров и радиолокаторов*, которые иногда объединяют общим названием *сенсоры* (от англ. *sensor* — чувствительный элемент). Съемочная аппаратура, позволяющая одновременно получать снимки в нескольких спектральных зонах, называется *многозональной*, а в десятках и сотнях очень узких спектральных зон — *гиперспектральной*.

Принцип *множественности*, или *комплексности*, аэрокосмических исследований предусматривает использование не одного снимка, а их серий, различающихся по масштабу, обзорности и разрешению, ракурсу и времени съемки, спектральному диапазону и поляризации регистрируемого излучения.

**Аэрокосмическое зондирование как научная дисциплина.** Зародившись как практический метод исследований, это междисциплинарное направление постепенно становится самостоятельной научной дисциплиной. В современном содержании дисциплины выделяются два взаимосвязанных раздела — естественно-научный (аэрокосмические исследования), акцентирующий внимание на

объекте исследования, его познании, и инженерно-технический (аэрокосмические методы), который охватывает технические средства и технологию исследований. Аэрокосмическое зондирование как естественно-научная дисциплина изучает пространственно-временные свойства и отношения географических объектов, проявляющиеся прямо или косвенно в вариациях собственного или отраженного излучения. Метод этой научной дисциплины основан на использовании снимков — яркостных моделей местности.

Аэрокосмический снимок — наиболее универсальная форма регистрации излучения, несущего геоинформацию об исследуемых объектах, обеспечивает наибольшее число решаемых географических задач. Такому использованию снимков большое значение придают ведущие географы, видя в нем залог комплексности географических исследований.

Аэрокосмическое зондирование базируется на двух группах снимков: получаемых с самолетов — воздушных (аэроснимков) и со спутников — космических (орбитальных). Хотя принципиальных различий у снимков нет, космические снимки наиболее соответствуют размерности географических объектов и распространенным масштабам географических исследований. В настоящее время в мировой практике используются и аэроснимки, и космические снимки, но доля космических снимков имеет устойчивую тенденцию к увеличению.

Во взаимодействии аэрокосмического зондирования с науками о Земле наблюдается определенная двойственность. С одной стороны, аэрокосмические методы можно отнести к какой-либо конкретной науке, использующей их для исследования своего предмета. Поэтому вполне правомерно появление таких разделов наук, как спутниковая метеорология, аэрофототопография, космическая океанология и др. С другой стороны, теоретическое обобщение конкретных приложений способствует становлению аэрокосмического зондирования как самостоятельной дисциплины, которая имеет практическое приложение в сферах других наук.

На рис. 1.1 приведена схема взаимодействия частных географических наук с аэрокосмическим зондированием. Перекрывающиеся области, на которые могут претендовать обе стороны, а также космические исследования географической оболочки Земли в целом соответствуют *космической географии*. На

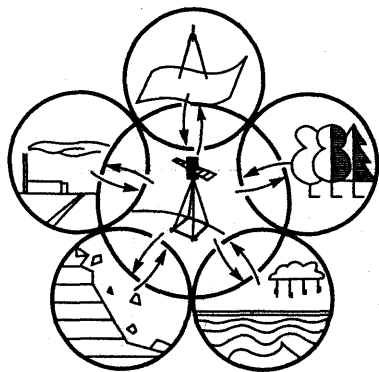


Рис. 1.1. Взаимодействие географических наук с аэрокосмическим зондированием

На рис. 1.1 приведена схема взаимодействия частных географических наук с аэрокосмическим зондированием. Перекрывающиеся области, на которые могут претендовать обе стороны, а также космические исследования географической оболочки Земли в целом соответствуют *космической географии*. На



схеме они имеют одинаковый размер. В действительности использование аэрокосмических снимков в разных разделах географии различно. Это связано с наличием специалистов, работающих на стыке двух наук и прилагающих усилия для расширения и углубления сферы взаимодействия. Здесь наиболее эффективны совместные действия географа, владеющего аэрокосмическими методами, и специалиста по аэрокосмическим методам, имеющего необходимую географическую подготовку. Перспективна интеграция аэрокосмического и картографического методов в единый *картографо-аэрокосмический метод* исследований, действующий как по последовательной схеме, когда путь к знаниям лежит через снимок и далее через карту, так и по параллельной схеме, в которой для познания объекта используются одновременно и снимок, и карта.

**Космические системы изучения природных ресурсов и мониторинга окружающей среды.** Космические методы базируются на длительной работе регулярно пополняемых группировок спутников — спутниковых систем, которые включают сложную инфраструктуру, обеспечивающую функционирование космических аппаратов на орбите (центры управления полетом и съемкой), прием информации (наземные пункты приема, спутники-ретрансляторы), ее хранение и распространение (центры первичной обработки, архивы снимков).

В 60-х годах XX в. в числе первых, наряду с обзорными метеорологическими системами, были созданы космические съемочные системы детальной фоторазведки военных ведомств США (спутники-съемщики с аппаратурой *KeyHole* — «замочная скважина») и СССР (спутники-съемщики *Zenit*). Затем начали функционировать космические съемочные системы, поставляющие пространственную геоинформацию широкому кругу гражданских потребителей, изучающих недра и морские акватории, оценивающих земельные, лесные и водные ресурсы, составляющих карты. Естественно, разные специалисты предъявляли неодинаковые требования к космической геоинформации по обзорности, оперативности, периодичности получения и главное — по пространственному разрешению. Большинству требуются многозональные космические снимки земной поверхности охватом 50—200 км с разрешением 10—30 м. Для одной группы потребителей необходима оперативная доставка информации — в течение нескольких дней и даже часов, для другой приемлем срок в несколько месяцев. Для осуществления мониторинга окружающей среды необходимы регулярные повторные съемки. В летних съемках нуждаются многие исследователи. Эти требования учитывались при создании национальных космических систем природно-ресурсного направления, среди которых наиболее известны системы первого поколения — *Ресурс* (СССР), *Landsat* (США) и французская система

*SPOT* (Satellite Pour l'Observation de la Terre). За четверть века регулярно запускаемые спутники каждой из этих систем многократно покрыли съемками всю нашу планету, дав миллионы снимков, образовавших их *глобальный фонд*.

**Отечественная космическая система Ресурс**, функционирующая с середины 70-х гг. XX в., создавалась как общегосударственная постоянно действующая система для изучения природных ресурсов и контроля окружающей среды, обеспечивающая получение геоинформации двух видов — базовой (фотографической) и оперативной (передаваемой по радиоканалам). В систему входили автоматические космические аппараты фотографической съемки *Ресурс-Ф* и оперативного наблюдения за сушей *Ресурс-О* (рис. 1.2) и океаном *Океан-О*. К работе в системе эпизодически привлекались пилотируемые космические корабли и орбитальные станции, а также специальные самолеты-лаборатории. Многоярусная система *Ресурс* предусматривала и наземный ярус в виде специальных тестовых участков местности — *полигонов* — в различных природных зонах, предназначенных для отработки методов практического использования дистанционной видеоинформации.

Спутники *Ресурс-Ф* рассчитаны на детальную фотосъемку местности с высот 200—300 км в течение нескольких недель с возвращением спускаемого аппарата с отснятой фотопленкой на Зем-

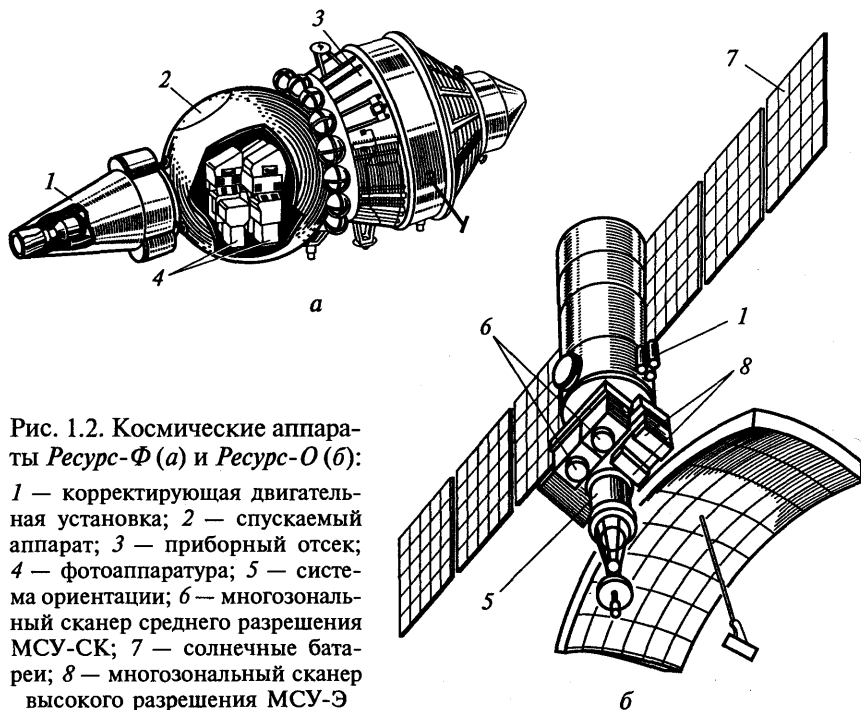


Рис. 1.2. Космические аппараты *Ресурс-Ф* (а) и *Ресурс-О* (б):

- 1 — корректирующая двигательная установка; 2 — спускаемый аппарат; 3 — приборный отсек; 4 — фотоаппаратура; 5 — система ориентации; 6 — многозональный сканер среднего разрешения МСУ-СК; 7 — солнечные батареи; 8 — многозональный сканер высокого разрешения МСУ-Э

лю. Спутники оперативного наблюдения, на которых установлены съемочные сканеры, работая в течение нескольких лет на орбитах высотой 600—900 км, быстро и регулярно передают видеоинформацию по радиоканалам на наземные пункты приема (рис. 1.3). Созданы пункты приема двух классов — стационарные с антеннами большого диаметра, обеспечивающие высокоскоростную регистрацию больших потоков информации и, следовательно, сравнительно высокое качество снимков, и упрощенные с небольшими антеннами, позволяющими оперативно получать снимки, но обычно пониженного качества, на метеостанциях, ледокольных судах, в службах охраны лесов и т. д.



Рис. 1.3. Антенна наземного пункта приема видеоинформации

Вся обработка видеоинформации, полученной со спутников, делится на *предварительную* (межотраслевую) и *тематическую* (отраслевую). Предварительная обработка заключается в приведении материалов космических съемок к виду, наиболее пригодному для последующего тематического анализа и интерпретации отраслевыми потребителями. Она предусматривает устранение неизбежных искажений и помех снимков, обусловленных как техническими причинами, так и природными факторами. Это так называемая *коррекция* снимков, которая бывает *геометрической* и *радиометрической*.

Геоинформация, поставляемая системой *Ресурс*, используется в народнохозяйственных, научных, учебных целях. Наиболее целесообразно применение космических снимков для комплексного изучения и картографирования природных ресурсов, экологического мониторинга и создания ГИС (географических информационных систем) крупных регионов.

*Космическая американская система Landsat* начала функционировать в 1972 г., ее эксплуатация предусматривала поочередный вывод на орбиту по одному спутнику с расчетным сроком функционирования несколько лет (рис. 1.4). За 16 дней спутник может покрыть сканерной многозональной съемкой всю поверхность Земли. Цифровая информация со спутников по радиоканалам передается на наземные пункты приема, которые оборудованы во многих странах (рис. 1.5). Результаты съемок, прошедшие

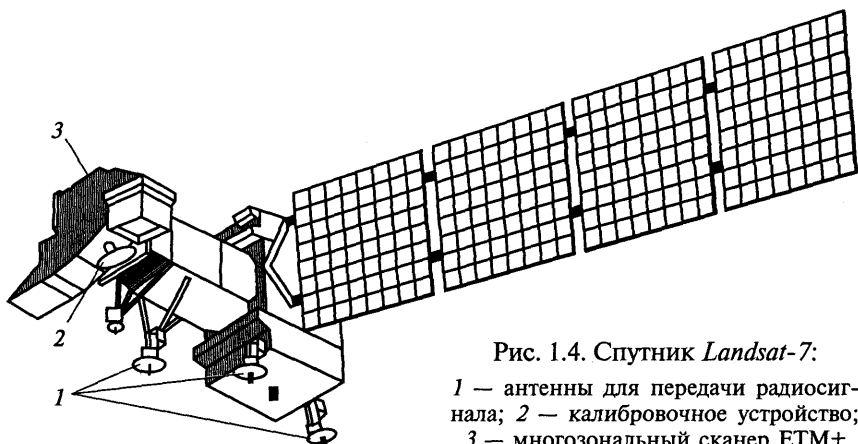


Рис. 1.4. Спутник *Landsat-7*:

1 — антенны для передачи радиосигнала; 2 — калибровочное устройство; 3 — многозональный сканер ETM+

предварительную компьютерную обработку, представляют в цифровом виде. Служба распространения архивированных снимков через сеть Интернет делает их доступными потребителям разных стран. Снимки со спутников *Landsat*, на которых отчетливо изображаются природно-территориальные комплексы — сельскохозяйственные поля, городские населенные пункты, применяются во многих странах мира для геологических, географических, экологических исследований и тематического картографирования.

**Космическая французская система SPOT** начала функционировать в 1986 г. Съемка выполняется с высоты 800 км двумя сканерами в нади́р или в сторону от трассы полета спутника, что позволяет более часто производить повторную съемку (рис. 1.6). Информация, передаваемая по радиоканалам, принимается двумя

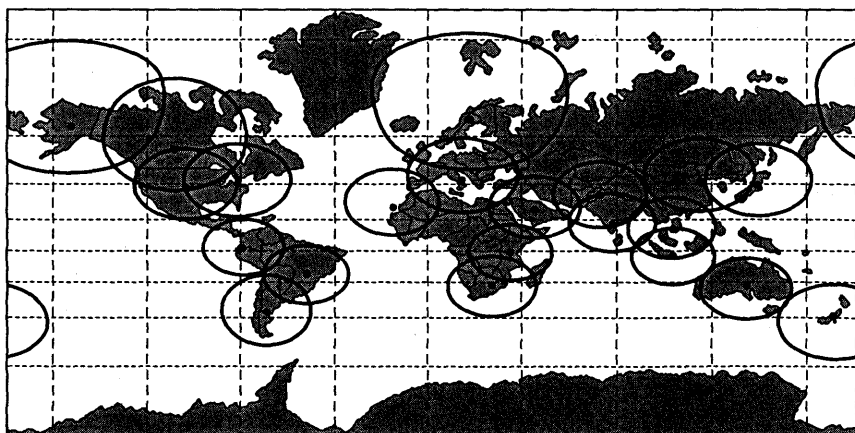


Рис. 1.5. Зоны приема наземными станциями снимков со спутника *Landsat*



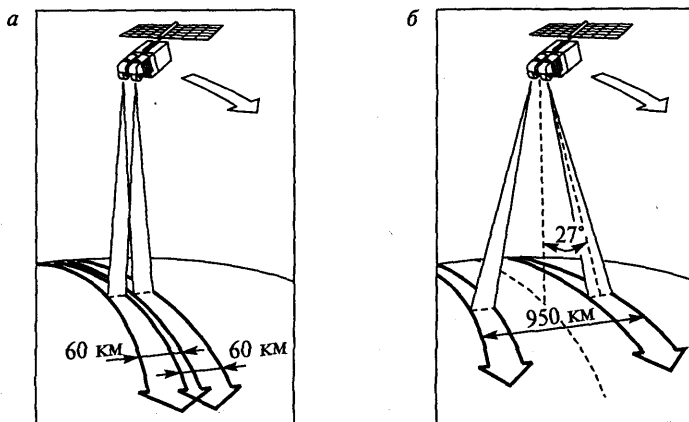


Рис. 1.6. Космическая съемка земной поверхности со спутника *SPOT*:  
 а — в надир; б — с отклонением направления съемки

основными (во Франции и в Швеции) и более чем двадцатью региональными станциями приема. Снимки имеют сравнительно высокое разрешение — на них можно распознать отдельные городские здания. Космическая система *SPOT* обеспечивает значительную часть мировой потребности в снимках такой детальности, которые используются для обновления топографических карт средних масштабов, для инвентаризации земельных, водных и лесных ресурсов.

Опыт эксплуатации космических систем первого поколения подтверждает, что съемки с орбитальных высот оказались весьма эффективными как для изучения Земли, так и для решения народнохозяйственных задач. Космическую съемку отличает большая обзорность, возможность охвата труднодоступных территорий, оперативность получения информации. В то же время стало ясно, что рассчитывать на всемогущество космических методов было бы ошибкой; необходимо рациональное сочетание их с другими методами исследований.

**Ресурсные космические системы нового поколения.** Космические технологии развиваются быстро: совершенствуются спутники, съемочная аппаратура, технологии съемки и обработки снимков. Каждый новый спутник поставляет снимки более совершенные, чем предыдущий. Но наступает время качественного скачка, переоценки используемых методов, определения наиболее перспективных.

В результате функционирования в течение четверти века космических систем первого поколения оказалось, что фотографические снимки не выдерживают конкуренции с новыми типами космической видеоинформации. Большие перспективы имеют снимки, оперативно получаемые цифровыми многозональными

сканерами и всепогодными радиолокаторами. Предполагают, что они обеспечат не только создание базовых картографических основ ГИС различного уровня, но и регулярное обновление данных.

Космические системы нового поколения можно разделить на системы, выполняющие глобальные съемки для исследования и мониторинга Земли в целом и локальные — для удовлетворения практических запросов.

Примером системы первого типа может служить разрабатываемая по инициативе NASA (National Aeronautics and Space Administration — Управление США по авиации и исследованию космического пространства) в международной кооперации космическая система глобального мониторинга EOS (Earth Observing System — система наблюдения Земли), которая будет функционировать в первые десятилетия XXI в. Она предназначена для комплексного планетарного дистанционного изучения Земли как единой системы. Космическая система EOS должна обеспечить науки о Земле глобальной многосенсорной информацией о всех сторонах жизни планеты — от химического состава атмосферы до движения волн цунами в океане. Предусматривается функционирование созвездий спутников, поставляющих информацию непрерывно (вплоть до 10-минутного интервала) в реальном масштабе времени. Это позволит мировому сообществу перейти от регистрации опасных природных явлений к их предсказанию на основе прогностического моделирования.

Локальные космические съемки будут оперативно выполняться спутниками с помощью цифровых сканеров, которые дают снимки, по детальности сопоставимые с аэроснимками, имеющие вы-

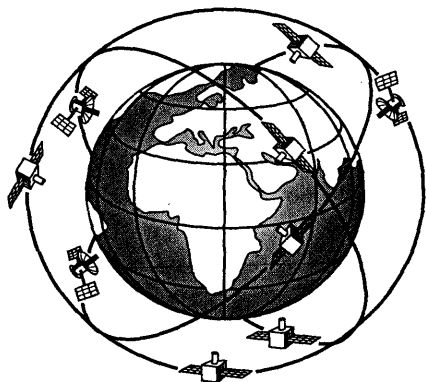


Рис. 1.7. Вариант будущей космической системы, включающей созвездие из девяти малых спутников, функционирующих на трех орбитах с разным наклоном

сокие изобразительные и измерительные свойства и обеспечивающие получение трехмерных характеристик местности. Эти снимки пригодны для кадастра и инвентаризации, для изготовления среднемасштабных и даже крупномасштабных карт, а также других точных геоинформационных продуктов.

Пока затраты на создание спутников и их эксплуатацию велики; они не компенсируются средствами, получаемыми от продажи снимков. Поэтому в период коммерциализации этой сферы удешевление будущих космических систем — важнейшая проблема, во многом оп-

ределяющая направление их развития. Ее решению будет способствовать переход к малым спутникам массой в сотни килограммов (рис. 1.7), а также создание спутников двойного назначения — военного и гражданского, обеспечивающих потребности как национальной безопасности, так и социально-экономического развития страны. Космические системы нового поколения предполагают существенное расширение в нашей стране сети федеральных, региональных и отраслевых центров приема видеoinформации со спутников.

**Космическая разведка** выполнялась и выполняется военными ведомствами многих космических держав. Для дешифрирования в этой области требуются снимки различного пространственного разрешения (табл. 1.1). С помощью видовой разведывательной аппаратуры (фотографической, электронной, радиолокационной) получают космические снимки небольшого охвата, но высокого (метрового и даже дециметрового) пространственного разрешения, в узких (несколько нанометров) спектральных съемочных зонах — способные точно зарегистрировать температуру и другие свойства не только природных, но и техногенных объектов. Во всех странах такая видеoinформация, получаемая в целях военной, а также коммерческой разведки, обычно недоступна широкому потребителю. Однако по прошествии определенного времени (иногда достаточно продолжительного) результаты разведывательных космических съемок поступают гражданским потребителям как конверсионные. Для географических исследований это ценный фактический материал для ретроспективного анализа — необходимого элемента прогнозирования.

**Принципиальная технологическая схема географических исследований по аэрокосмическим снимкам.** Несмотря на различие в снимках, способах и приемах их обработки, аэрокосмические методы

Таблица 1.1

**Возможности дешифрирования некоторых объектов при различном пространственном разрешении снимков, м**

Объекты	Обнаружение	Детальное опознавание	Выявление характеристик
Населенные пункты	50	15	3
Аэродромы	6	2	0,3
Железнодорожные пути	30	6	1,5
Мосты	6	2	1,0
Самолеты	5	1,0	0,2
Автомшины	1,5	0,3	0,1
Корабли	8	0,6	0,3





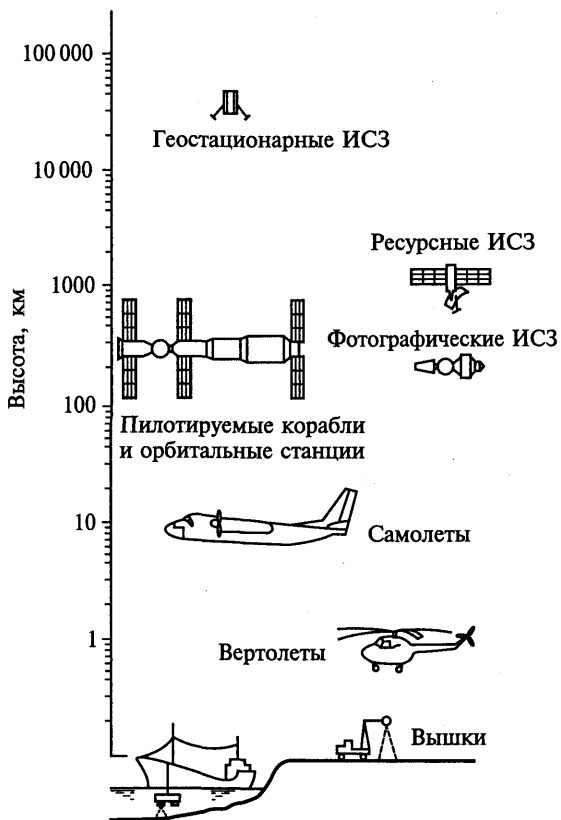


Рис. 1.9. Носители съемочной аппаратуры.

Рисунок иллюстрирует также многоярусный принцип исследования Земли, предусматривающий космические, авиационные и наземные (надводные) наблюдения

Аэрокосмический снимок — это двумерное изображение реальных объектов, которое получено по определенным геометрическим и радиометрическим (фотометрическим) законам путем дистанционной регистрации яркости объектов и предназначено для исследования видимых и скрытых объектов, явлений и процессов окружающего мира, а также для определения их пространственного положения. Однако здесь надо отметить, что пока еще не создана теория формирования аэрокосмического изображения, которая позволила бы достоверно ответить на вопросы *что* и *как* должно изобразиться на аэрокосмическом снимке. Диапазон масштабов современных аэрокосмических снимков огромен: он может меняться от 1 : 1000 до 1 : 100 000 000, т. е. в сто тысяч раз. При этом наиболее распространенные масштабы аэрофотоснимков

лежат в пределах 1 : 10 000 — 1 : 50 000, а космических — 1 : 200 000 — 1 : 10 000 000. Все аэрокосмические снимки принято делить на *аналоговые* (обычно фотографические) и *цифровые* (электронные). Изображение цифровых снимков образовано из отдельных одинаковых элементов — *пикселей* (от англ. *picture element — pixel*); яркость каждого пикселя характеризуется одним числом. Аэрокосмический снимок состоит из миллионов пикселей. При выполнении практических работ приходится отличать *исходные* (*первичные*) снимки, которые получены непосредственно в результате съемки, от их копий и *преобразованных* снимков, поступающих к потребителям после предварительной обработки. При фотографической съемке исходным снимком считается оригинальный фотонегатив, при сканерной — «сырой» файл с записью изображения цифрового снимка без какой-либо его коррекции.

Аэрокосмические снимки как информационные модели местности характеризуются рядом свойств, среди которых выделяют изобразительные, радиометрические и геометрические. *Изобразительные* свойства характеризуют способность снимков воспроизводить мелкие детали, цвета и тоновые градации объектов, *радиометрические* свидетельствуют о точности количественной регистрации снимком яркостей объектов, *геометрические* характеризуют возможность определения по снимкам размеров, длин и площадей объектов и их взаимного положения. Свойства снимков, получаемых в разных диапазонах и различной съемочной аппаратурой, существенно различаются. Кадровые, прежде всего фотографические снимки, отличающиеся наивысшей геометрической точностью, наиболее пригодны для точных измерений. Сканерные снимки, получаемые во всех спектральных зонах оптического диапазона, включая инфракрасную тепловую, могут регистрировать больше энергетических уровней излучения и обладают наиболее высокой радиометрической точностью. Радиолокационные снимки по своим геометрическим и радиометрическим свойствам уступают фотографическим и сканерным, но их можно получать в любую погоду, даже когда земная поверхность закрыта сплошным облачным покровом. Важными показателями снимка служат охват и разрешение. Обычно для географических исследований требуются снимки большого охвата и высокого разрешения. Однако удовлетворить эти противоречивые требования в одном снимке не удастся. Обычно чем больше охват получаемых снимков, тем ниже их разрешение. Поэтому при разработке съемочной аппаратуры приходится идти на компромиссные решения либо выполнять одновременно съемку несколькими системами с различными параметрами.

**Методы получения геоинформации по снимкам.** Необходимая для географических исследований информация (предметно-содержательная и геометрическая) извлекается из снимков двумя основ-

ными методами: дешифрированием и фотограмметрической обработкой<sup>1</sup>. Оба метода используют как традиционные технологии, основанные на визуальной обработке аналоговых снимков, так и компьютерные, которые автоматизируют эти процессы при работе с цифровыми снимками.

*Дешифрирование*, которое должно дать ответ на основной вопрос, *что* изображено на снимке, позволяет получать предметную, тематическую (в основном качественную) информацию об изучаемом объекте или процессе, его связях с окружающими объектами. В визуальном дешифрировании обычно выделяют *чтение* снимков и их *интерпретацию* (толкование). Умение читать снимки базируется на знании *дешифровочных признаков* объектов и изобразительных свойств снимков. Глубина же интерпретационного дешифрирования существенно зависит от уровня географической подготовки исполнителя. Чем лучше знает дешифровщик предмет своего исследования, тем полнее и достовернее информация, извлекаемая из снимка.

*Фотограмметрическая обработка* призвана дать ответ на вопрос, *где* находится изучаемый объект и каковы его геометрические характеристики — *размер, форма*. Она позволяет определять по снимкам плановое и пространственное положение объектов и их изменение во времени. Для фотограмметрических измерений снимков применяют специальные прецизионные оптико-механические приборы, а также компьютерные комплексы со специализированным программным обеспечением.

*Компьютерные технологии*. Сейчас разработаны многие сотни алгоритмов и программ компьютерной обработки изображений. Для обработки аэрокосмических снимков на персональных компьютерах можно использовать коммерческое программное обеспечение общего назначения, такое, как Adobe Photoshop, Corel PHOTO-PAINT. Однако значительно большие возможности предоставляют профессиональные программные продукты, среди которых в нашей стране наиболее известны ERDAS Imagine, Er Mapper, ENVI. Кроме того, на отечественном рынке геоинформационных услуг представлены пакеты специализированных программ, предназначенных для решения узких задач, например, топографического картографирования на цифровых фотограмметрических системах PHOTOMOD, Талка, ЦНИИГАиК (Центральный научно-исследовательский институт геодезии, аэросъемки и картографии). Географ должен уметь выбрать оптимальный вариант обработки из многих возможных, предоставляемых коммерческим программным обеспечением.

---

<sup>1</sup> Фотограмметрия (от греч. *photos* — свет, *gramma* — запись, *metreo* — измерять) — дисциплина, изучающая способы определения пространственного положения, размеров и формы объектов путем измерения их фотографических изображений, а также снимков, полученных другими методами.

Современные компьютерные технологии позволяют решать следующие группы задач:

- визуализация цифровых снимков;
- геометрические и яркостные преобразования снимков, включая их коррекцию;
- конструирование новых производных изображений по первичным снимкам;
- определение количественных характеристик объектов;
- компьютерное дешифрирование снимков (классификация).

Наиболее сложной является задача компьютерного (автоматизированного) дешифрирования, которая составляет фундаментальную проблему аэрокосмического зондирования как научной дисциплины и для решения которой прилагалось и прилагается много усилий.

При визуальном дешифрировании снимков исполнителю приходится на основе дешифровочных признаков определять, узнавать объекты, а также выделять одинаковые, однородные объекты. Для выполнения этих эвристических процедур с помощью компьютера применяют наиболее распространенный подход, основанный на спектральных признаках, в качестве которых служит набор спектральных яркостей, зарегистрированных многозональным снимком. Формальная задача компьютерного дешифрирования снимков сводится к классификации — последовательной «сортировке» всех пикселей цифрового снимка на несколько групп. Для этого предложены алгоритмы классификации двух видов — с обучением и без обучения, или *кластеризации* (от англ. *cluster* — скопление, группа). При классификации с обучением пиксели многозонального снимка группируются на основе сравнения их яркостей в каждой спектральной зоне с эталонными значениями. При кластеризации же все пиксели разделяют на группы-кластеры по какому-либо формальному признаку, не прибегая к обучающим данным. Затем кластеры, полученные в результате автоматической группировки пикселей, дешифровщик относит к тем или иным объектам. Достоверность компьютерного дешифрирования формально характеризуется отношением числа правильно классифицируемых пикселей к их общему числу и составляет в среднем 70—85 %, заметно падая с увеличением набора дешифрируемых объектов.

Достижения в области полной автоматизации дешифрирования, при которой можно было бы исключить или существенно ограничить участие человека в получении географической информации по аэрокосмическим снимкам, пока скромны. Вычислительные алгоритмы, основанные на спектральных признаках отдельных пикселей, обеспечивают решение самых простых классификационных задач; они рационально включаются в качестве элементов в сложный процесс визуального дешифрирования, кото-

рое пока остается основным методом извлечения природной и социально-экономической географической информации из аэрокосмических снимков. Для существенного прогресса в развитии компьютерного дешифрирования необходим переход к программному обеспечению более высокого уровня, основанному на знаниях экспертов. Специалисты в области искусственного интеллекта видят решение проблемы автоматизации дешифрирования аэрокосмических снимков в объединении формализованных знаний высококвалифицированных дешифровщиков (экспертов) с возможностями современных компьютеров, т. е. в создании компьютерных *экспертных систем*.

**Эталонирование.** Получить посредством дешифрирования (визуального или компьютерного) или фотограмметрической обработки необходимые характеристики изучаемого объекта только по снимкам без каких-либо натуральных определений, без обращения к «земной правде» в большинстве случаев невозможно. Например, для спектрометрических определений по многозональному снимку, на которых основано компьютерное дешифрирование, требуется выполнить радиометрическую калибровку снимков (их эталонирование), а для получения размера объекта по снимку фотограмметрическим способом необходима его геометрическая калибровка. Процедура получения и учета калибровочной информации составляет необходимый элемент технологической схемы аэрокосмических исследований. Эта информация обязательна для любой обработки снимков, хотя объем ее бывает различным; чем выше требуемая точность определений по снимкам, тем он значительнее. Принято различать *абсолютную* и *относительную* калибровку. При обработке одиночных снимков ограничиваются относительной калибровкой, а нескольких, например многозональных, желательна их абсолютная калибровка.

**Дополнительная информация.** Снимки как особая форма информации об изучаемом географическом объекте используются в комплексе с информацией других видов. Стало традицией работать одновременно с космическими снимками и картами. При тематических исследованиях по снимку обычно определяют ареал распространения явления или процесса, его контур, а для получения содержательных характеристик привлекают материалы тематических географических исследований, включая статистические. Применение снимков особенно эффективно для пространственной экстраполяции результатов локальных полевых наблюдений.

**Аэрокосмическое картографирование.** Итоговым звеном технологической схемы аэрокосмических географических исследований является изготовление по снимкам карт, от качества которых зависит не только их эстетическое восприятие, но и степень доверия к выполненным исследованиям. Многолетний опыт работ свидетельствует о том, что создание карт и ГИС (геоинформаци-

онных систем) — главнейшее направление практического и научного использования аэрокосмической информации. Результаты комплексных географических исследований, выполненных с использованием аэрокосмических снимков, представляют в виде серий взаимосогласованных тематических карт, отражающих пространственные закономерности, качественные и количественные характеристики изученной территории. Они составляют базовую основу *интегрированных ГИС*.

**Моделирование и прогнозирование.** Дальнейшие этапы включают определение количественных характеристик исследуемого явления, необходимых для математического моделирования с целью прогнозирования развития явления или процесса. Элементы этой схемы сейчас реализуются при прогнозировании талого стока рек, будущего урожая, а иногда и для экологического прогноза-предупреждения. Роль аэрокосмической информации при географическом прогнозировании будет возрастать. Так, например, в космических программах NASA (EOS и др.) ставится задача к 2025 г. выполнять 10-летние прогнозы полей метеорологических характеристик, полутороговых предупреждения об Эль-Ниньо, годовые прогнозы осадков на региональном уровне, пятидневные прогнозы путей движения ураганов с 30-километровой точностью, часовые предупреждения об извержениях вулканов и землетрясениях, получасовые предупреждения о торнадо.

**Исследование планет.** В учебнике рассматриваются лишь аэрокосмические методы исследований Земли. Естественно, что космические съемки представляют также метод изучения и картографирования планет Солнечной системы и других небесных тел. Самым первым космическим снимком был снимок обратной стороны Луны с отечественной межпланетной станции *Луна-3*, сделанный в 1958 г., вскоре после запуска первого искусственного спутника Земли.

Для изучения планет используются все методы съемки Земли — от фотографической съемки с возвращаемых пилотируемых и автоматических аппаратов, применявшейся для картографирования лунной поверхности, до радиолокационной съемки поверхности Венеры сквозь ее постоянный плотный облачный покров. С космических аппаратов *Mars Global Surveyor* сканерная съемка обеспечивает, например, получение детальных снимков всей марсианской поверхности с разрешением до 20 м.

Съемкой с дальних расстояний с космических аппаратов *Voyager* в едином пролете с 1977 по 1989 г. охвачены дальние планеты Солнечной системы — Юпитер, Сатурн, Уран, Нептун и их спутники Ио, Каллисто, Ганимеда, Европа, Тритон. Составлены многолистные топографические и тематические карты Луны, Марса, Меркурия, атласы планет, например Атлас Венеры, по результатам съемки с отечественных межпланетных станций *Венера-15, 16*

(1983—1984 гг.). Таким образом, изучение и картографирование планет составляет важнейшую научную сферу применения космических методов.

**Разновидности дистанционных методов.** Методы, основанные на регистрации съемочными системами оптического и радиоизлучения в виде двумерного изображения — снимка, универсальны. Наряду с этим существует ряд частных дистанционных методов, с помощью которых регистрируются излучение или характеристики других физических полей Земли не по площади, а в точке или по трассе полета. Эти методы базируются на применении специальных измерительных приборов.

Спутниковый *скаттерометр* (от англ. *scatter* — рассеивать) предназначен для измерения мощности отраженного радиосигнала, которая зависит от геометрии отражающей поверхности. При изучении акваторий скаттерометр позволяет дистанционно оценить направление и силу волнения морской поверхности, а по ним направление и скорость приповерхностных ветров.

При аэрокосмических съемках наряду со съемочной аппаратурой используется *радиовысотомер* (альтиметр), регистрирующий время от посылки до прихода отраженного сигнала, по которому точно определяют высоту полета носителя, необходимую для фотограмметрической обработки аэрокосмических снимков. Если же параметры орбиты и пространственное положение космического аппарата точно известны, то с помощью радиовысотомера удастся количественно характеризовать топографию отражающей поверхности, в частности покровных ледников или морской поверхности.

Такие же задачи (но более точно) решает и *лазерный альтиметр*. Его уникальной особенностью является регистрация не одного, а нескольких отраженных сигналов, например от кроны деревьев разных ярусов и от земной поверхности, что важно при дистанционном изучении структуры растительного покрова.

Точное положение, форму и размер объекта можно определить с помощью *сканирующих лазерных дальномеров* или *лазерных локаторов*, которые называют также *лидарами* (от англ. *lidar, light detection and ranging* — световая локация). В самолетном варианте сканирующие лазерные локаторы с успехом применяются для быстрого и высокоточного измерения пространственных координат очень большого количества точек на местности. При лазерной (световой) локации местность и расположенные на ней объекты отображаются большой совокупностью («облаком») точек, для каждой из которых получены все три координаты и которые при визуализации на мониторе образуют изображение местности — лазеролокационный, или светолокационный, снимок. Этот новый дистанционный метод позволяет быстро создать точную цифровую модель местности. При географических исследованиях

особенно перспективно его комбинирование с многозональной съемкой.

С помощью самолетных и спутниковых *магнитометров*, регистрирующих напряженность магнитного поля Земли, удается выявить магнитные аномалии, связанные с геологическим строением территории.

Значительное место в геофизических исследованиях отводится аэрометрической съемке, при которой регистрируется коротковолновое гамма-излучение над месторождениями радиоактивных руд или на участках радиационного заражения местности. В результате вертолетных обследований европейской части нашей страны с помощью *гамма-спектрометра* были закартографированы ареалы выпадения радиоактивных осадков после Чернобыльской катастрофы в 1985 г. и ведется мониторинг этих районов.



## ГЛАВА 2

# ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ, ТЕХНИЧЕСКИЕ СРЕДСТВА И ТЕХНОЛОГИИ ПОЛУЧЕНИЯ АЭРОКОСМИЧЕСКИХ СНИМКОВ

Аэрокосмическое зондирование включает в себя два взаимосвязанных раздела: инженерно-технический — аэрокосмические методы и естественно-научный — аэрокосмические исследования. Первый связан с получением снимков, а второй с их использованием.

Для географа, конечно, самое важное — уметь работать со снимками, извлекать из них нужную информацию. На практике ему приходится использовать разные снимки, свойства которых неодинаковы.

Основные типы современных снимков, с которыми работают географы, характеризуются в конце этой главы. Для того чтобы понимать, как получают снимки разных типов, необходимо иметь представление о физических свойствах излучения, регистрирующей аппаратуре и способах съемки.

Физические основы аэрокосмического зондирования и принципы регистрации электромагнитного излучения представляют собой фундаментальные знания, которые мало меняются во времени, а конкретные съемочные системы и виды съемок непрерывно совершенствуются, часто сменяясь на новые. Поэтому, изучая технологии получения снимков, важно обращать особое внимание на основные принципы устройства съемочных систем и принципиальные особенности аэрокосмических съемок, влияющие на изобразительные и измерительные свойства снимков.

### 2.1. Физические основы аэрокосмических методов

При аэрокосмическом зондировании информация об объекте исследования извлекается из результатов регистрации излучения, представляющего собой электромагнитные волны — ультрафиолетовые, световые, инфракрасные, радиоволны, которые имеют разную длину, но распространяются прямолинейно с одинаковой скоростью — скоростью света — и при взаимодействии с веществом подчиняются одинаковым физическим законам.

## 2.1.1. Электромагнитный спектр

Последовательность электромагнитных волн, классифицированная по их длинам (или частотам), называется *спектром электромагнитных волн* (рис. 2.1). Большинство современных аэрокосмических методов основано на использовании оптических и ультракоротких радиоволн с длиной от 0,3 мкм до 3 м.

Участок оптических волн (0,001—1000 мкм) включает ультрафиолетовый (0,001—0,4 мкм), видимый (0,4—0,8 мкм) и инфракрасный (0,8—1000 мкм) диапазоны. Видимый диапазон, в котором глаз способен выделять цветовые различия, делят на семь цветовых зон со следующими названиями цветов и границами, нм: фиолетовый (380—450), синий (450—480), голубой (480—500), зеленый (500—560), желтый (560—590), оранжевый (590—620) и красный (620—750). Диапазон инфракрасного (ИК) излучения разделяют на поддиапазоны, мкм: ближний (0,8—1,3), средний (1,3—3) и дальний (3—1000). В ближнем и среднем поддиапазонах преобладает отраженное (солнечное) излучение, а в дальнем, называемом тепловым, собственное излучение Земли. Волны длиной 0,1—1 мм часто называют *субмиллиметровыми*.

Часть спектра, охватывающую ультракороткие радиоволны (1—10 000 мм), разбивают на диапазоны миллиметровых, сантиметровых, дециметровых и метровых радиоволн. Сантиметровые и дециметровые волны часто объединяют в диапазон радиоволн *сверхвысоких частот* (СВЧ), в котором выделяют участки, обозначаемые латинскими буквами *K, X, C, S, L, P*. Именно в этих участках работает различная радиоэлектронная аппаратура спутников, но каждая на строго фиксированных международных соглашениями длинах волн (или частот). Например, передачу видеoinформации со спутников на наземные пункты приема наиболее часто

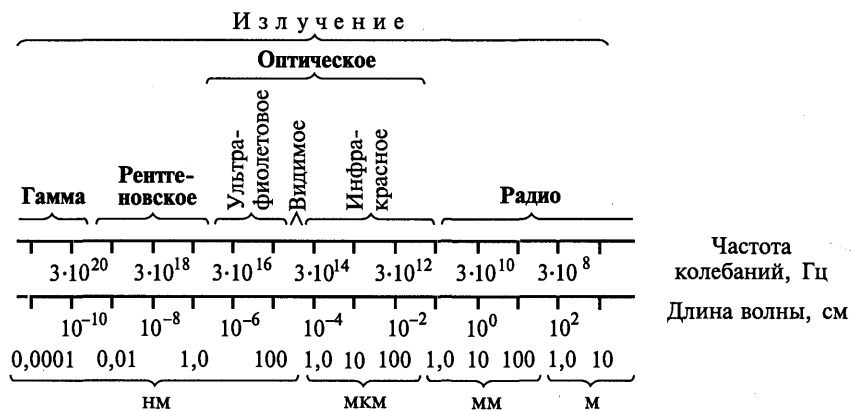


Рис. 2.1. Участок спектра электромагнитных волн, используемый в современных аэрокосмических методах

производят по радиоканалам в так называемых  $X$ - и  $S$ -диапазонах на длинах волн соответственно 3 и 11 см, а  $L$ -диапазон (длина волны 22 см) отведен для глобальных систем спутникового позиционирования — отечественной ГЛОНАСС (Глобальная навигационная спутниковая система) и американской GPS (Global Positioning System). Нередко миллиметровые, сантиметровые и дециметровые радиоволны собственного излучения Земли относят к одному диапазону, называемому *микроволновым*. Надо учитывать, что приведенная классификация и названия отдельных участков электромагнитного спектра носят условный характер и неодинаковы у различных авторов.

### 2.1.2. Солнечное излучение и его отражение объектами земной поверхности

Основным естественным источником освещения земной поверхности является Солнце, которое излучает различные электромагнитные волны — от ультрафиолетовых до радиоволн. Основная энергия приходится на излучение с длинами волн 0,3—3 мкм, причем максимум энергии — на волны длиной около 0,5 мкм.

Для количественных характеристик взаимодействия излучения с объектами используют как абсолютные, так и относительные величины. Для абсолютных измерений применяют две системы — световую, или фотометрическую (в люменах), — только в видимом диапазоне, и энергетическую, или радиометрическую (в ваттах), — во всех диапазонах электромагнитного спектра. При относительных измерениях оперируют коэффициентами отражения, поглощения, рассеивания и пропускания, значения которых в сумме всегда составляют единицу (закон сохранения энергии). Для аэрокосмического изучения объектов суши наибольший интерес представляет отраженное излучение, определяющее их оптические характеристики.

**Оптические характеристики объектов.** Первостепенной оптической отражательной характеристикой объектов является их яркость. На нее влияет освещенность, которая складывается из освещенности прямым солнечным светом, рассеянным светом небосвода и светом, отраженным от соседних объектов<sup>1</sup>. Для объектов земной поверхности наиболее важны коэффициенты интегральной и спектральной яркости, яркостный контраст и индикатриса отражения.

**Коэффициент интегральной (ахроматической) яркости  $r^*$**  характеризует относительную величину отраженного потока излу-

---

<sup>1</sup> В соответствии с двумя системами измерений абсолютную энергетическую яркость выражают в ваттах на стерадиан-квадратный метр ( $\text{Вт/ср}^{-1} \cdot \text{м}^{-2}$ ), а фотометрическую — в канделах на квадратный метр ( $\text{кд/м}^{-2}$ ).

**Коэффициенты интегральной яркости некоторых объектов**  
(видимый диапазон)

Объект	$r^*$	Объект	$r^*$
Снег свежеснежавший	1,00	Лес лиственный	0,07
Лед речной	0,30	Лес хвойный	0,05
Вода	0,03	Луг суходольный	0,07
Песок кварцевый	0,20	Дороги грунтовые на суглинке и песке	0,20
Почва серая лесная	0,15	Дороги грунтовые на черноземе	0,08
Почва чернозем	0,03	Шоссе	0,30

чения в заданном направлении по сравнению с освещающим потоком; он определяется как отношение яркости объекта  $B^*$  к яркости абсолютно белой матовой поверхности (эталоны)  $B_0^*$ :

$$r^* = \frac{B^*}{B_0^*}.$$

В табл. 2.1 приведены значения некоторых коэффициентов интегральной яркости  $r^*$ , определенных в отвесном направлении, которые свидетельствуют об их значительном колебании у различных объектов. Но и для одного и того же объекта коэффициент  $r^*$  не строго постоянен, а может меняться в определенных пределах. Если участок местности рассматривать как совокупность  $n$  отдельных объектов площадью  $\bar{S}_i$ , в пределах которой  $r_i^*$  постоянен, то среднее значение коэффициента интегральной яркости  $r_{\text{ср}}^*$  для участка в целом можно представить как

$$r_{\text{ср}}^* = \frac{\sum_1^n r_i \bar{S}_i}{\sum_1^n \bar{S}_i}.$$

Среднее значение коэффициента интегральной яркости для всей территории нашей страны принимают равным: зимой — 0,50, летом — 0,14, весной — 0,12.

Необходимо учитывать, что абсолютная величина яркости, определяемая отражательными свойствами объекта, функционально зависит еще и от относительного положения Солнца, съемочной системы и объекта, а также от наклона отражающей поверхности, т.е. от рельефа местности (рис. 2.2). Поэтому склоны на местности с одинаковыми отражательными свойствами, но разными углами наклона будут иметь разную яркость и изобразятся на снимке разным тоном. Таким образом, на яркостное поле местности существенно влияют рельеф и условия освещения.

**Яркостный контраст** применяется для характеристики яркостных различий двух объектов (или смежных деталей одного объекта) с яркостью  $B_1^*$  и  $B_2^*$  ( $B_1^* < B_2^*$ ). Применяют несколько взаимосвязанных выражений для контраста. Среди них наиболее употребительны *относительный* контраст  $K_o$ :

$$K_o = \frac{B_2^*}{B_1^*}$$

и так называемый *визуальный*  $K_b$ :

$$K_b = \frac{B_2^* - B_1^*}{B_2^*} = 1 - \frac{1}{K_o}.$$

Контраст между наиболее светлыми  $B_{\max}^*$  и темными  $B_{\min}^*$  объектами определяет интервал яркостей местности  $U$ , под которым принято понимать отношение

$$U = \frac{B_{\max}^*}{B_{\min}^*}.$$

Летом для лесных горных районов  $U$  составляет 100, а для степных — 2. В целом же земная поверхность малоконтрастна — около половины всех объектов имеют относительный контраст менее 1,5.

Для вычисления величин контраста и интервала яркостей при одинаковых условиях освещения объектов можно вместо яркостей использовать коэффициенты яркости.

**Индикатриса отражения.** Совокупность коэффициентов яркости объекта по разным направлениям изображают графически в виде полярной диаграммы — индикатрисы отражения.

Различают четыре основных вида индикатрис отражения. Свойством зеркального отражения обладают спокойная водная поверхность, ледяной покров, накатанные грунтовые дороги (рис. 2.3, а). Слабо шероховатые поверхности отражают свет равномерно (диффузно) во все стороны (рис. 2.3, б). Такую индикатрису, называемую *ортотропной*, должен иметь рассеиватель, принимаемый в качестве эталона. В природе к нему приближаются

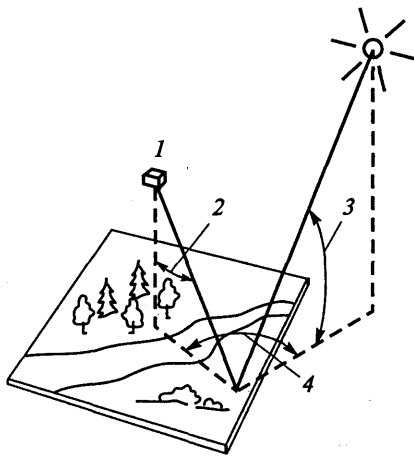


Рис. 2.2. Геометрия освещения и наблюдения при определении яркости объектов земной поверхности:

1 — регистрирующий прибор; 2 — угол визирования; 3 — высота Солнца; 4 — азимут визирования

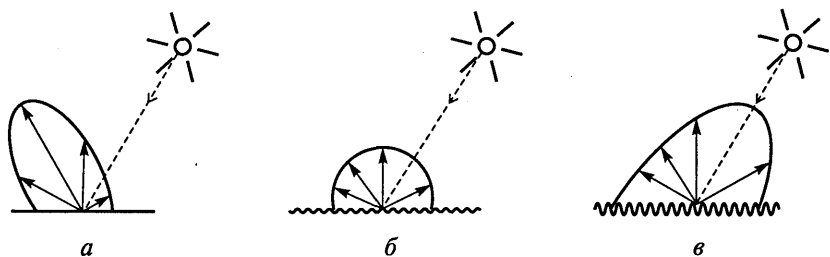


Рис. 2.3. Индикатриса отражения гладкой (а), шероховатой (матовой) (б) и расчлененной (в) поверхности

плоские песчаные поверхности. Объекты с расчлененной поверхностью имеют индикатрису отражения, вытянутую к источнику света, т. е. противоположную индикатрисе зеркальной поверхности (рис. 2.3, в). Максимальная яркость таких объектов (вспаханная почва, заросли тростника) наблюдается со стороны падающих лучей. Асимметрия индикатрис возрастает с увеличением расчлененности отражающей поверхности. Строго говоря, любое отраженное излучение состоит из двух частей — зеркальной и диффузной. Поэтому для многих природных объектов характерна смешанная индикатриса отражения с двумя максимумами: один направлен в сторону зеркального отражения, другой — к источнику света (Солнцу). Индикатрисы отражения оказывают влияние на особенности изображения одной и той же местности на снимках, полученных при разных направлениях съемки (цв. вкл. I, 2).

**Коэффициент спектральной яркости.** На земной поверхности наиболее распространены окрашенные (хроматические) объекты. Считается, что природная палитра местности включает около 60 000 цветовых оттенков. Яркость таких объектов в разных спектральных зонах неодинакова и характеризуется коэффициентами спектральной яркости  $r_{\lambda}^*$ . Значения коэффициентов спектральной яркости для различных длин волн представляют в форме графика — *кривой спектральной яркости*. В аэрокосмическом зондировании различают кривые спектральной яркости объектов, которые получают по результатам прямых спектрометрических измерений, и так называемые кривые *спектрального образа*, определяемые обычно по некалиброванным многозональным снимкам. Хотя нередко понятие «спектральный образ» трактуется более широко и объединяет то и другое.

На знании спектральной яркости объектов основаны различные способы и приемы получения и обработки аэрокосмических снимков, в том числе и автоматическое распознавание объектов. Поэтому изучение спектральной отражательной способности различных объектов и геосистем различных таксономических рангов представляет собой одну из задач аэрокосмических методов.

**Спектрометрирование.** Основной путь изучения спектральной отражательной способности — экспериментальный. Спектральные яркости или коэффициенты спектральной яркости и индикатрисы отражения получают на основе абсолютных или относительных измерений, выполняемых с помощью фотоэлектрических спектрометров.

Методика относительного спектрометрирования, которое наиболее распространено, базируется на формуле

$$r_{\lambda}^* = \frac{B_{\lambda}^*}{B_{0\lambda}^*},$$

где  $B_{\lambda}^*$  и  $B_{0\lambda}^*$  — спектральные яркости объекта и эталона. Поэтому помимо измерения излучения от исследуемого объекта необходимо также зарегистрировать излучение от эталона; при этом объект и эталон должны находиться при одинаковых условиях освещения. В качестве эталона применяют материалы с хорошо известными и стабильными во времени оптическими характеристиками (гипсовые пластинки, молочные стекла).

Спектрометрические измерения, которые выполняют с точностью 5—10 %, могут быть лабораторными, полевыми, самолетными и космическими.

**Лабораторные спектрометрические измерения** небольших по размеру образцов выполняют для выявления зависимости отражательной способности, например, почвы от содержания гумуса, механического состава, влажности и т. д.

**Полевое спектрометрирование** проводится в целях определения спектральных коэффициентов яркости и индикатрис отражения отдельных объектов и геосистем низших рангов (рис. 2.4). В полевых условиях изучают суточную и сезонную динамику отражательной способности природных объектов, влияние погодных условий (дождь, ветер и т. д.) и условий наблюдения (положение Солнца, угол визирования).

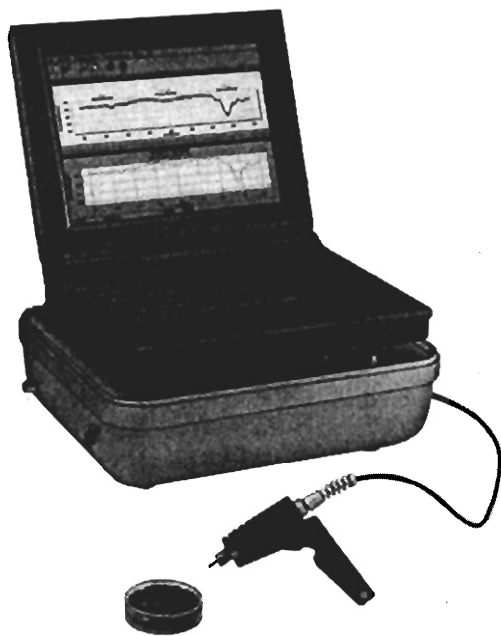
**Аэроспектрометрирование** выполняется с самолета или вертолета для изучения более крупных и менее однородных объектов — сельскохозяйственных полей (угодий), водоемов и т. д.

Принципиальная особенность **космического спектрометрирования** заключается в том, что спектрометр, установленный на космическом аппарате, регистрирует суммарное излучение земной поверхности и атмосферы. Поэтому одной из задач космического спектрометрирования является изучение влияния атмосферы на оптические характеристики земных объектов.

При практическом использовании результатов спектрометрирования необходимо учитывать, что отражательная способность, например отдельного древесного листа (лабораторные измерения), отличается от отражательной способности дерева (наземные из-



а



б

Рис. 2.4. Определение спектральной отражательной способности в поле (а) с помощью фотоэлектрического спектрометра (б)

мерения), а она, в свою очередь, — от отражательной способности участка леса (самолетные измерения) или лесного массива (космические измерения).

**Спектральная отражательная способность природных объектов.** Фундаментальные исследования по спектрометрированию выполнил Е.Л. Кринов<sup>1</sup> еще в 40-х годах прошлого века. Положив начало работам по оптике ландшафтов, он разработал первую спектрометрическую классификацию, которая со временем стала классической. По спектральной яркости в видимом диапазоне, где получен наибольший объем экспериментальных данных, все многообразие объектов земной поверхности отчетливо делится на несколько классов, каждый из которых отличается по характеру спектральной отражательной способности (рис. 2.5).

I. **Горные породы и почвы** характеризуются увеличением коэффициентов спектральной яркости по мере приближения к крас-

<sup>1</sup> Кринов Е.Л. Спектральная отражательная способность природных образований. — Л.; М.: Изд-во АН СССР, 1947.



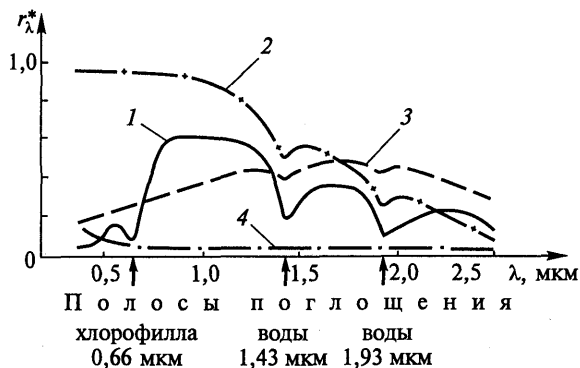


Рис. 2.5. Схематизированные кривые спектральной яркости природных объектов:

1 — растительный покров; 2 — снежные поверхности; 3 — горные породы и почвы; 4 — водные поверхности

ной зоне спектра. Спектральная яркость горных пород зависит от входящих в их состав минералов и элементов, а почв — от содержания соединений железа и гумуса.

II. **Растительный покров** отличается характерным максимумом отражательной способности в зеленой (0,55 мкм), минимумом — в красной (0,66 мкм) и резким увеличением отражения в ближней инфракрасной зоне. Низкая отражательная способность вегетирующих растений в красной зоне связана с поглощением, а ее увеличение в зеленой зоне — с отражением этих лучей хлорофиллом. Большие коэффициенты яркости в ближней инфракрасной зоне объясняются пропусканием этих лучей хлорофиллом и отражением их от внутренних тканей листа.

III. **Водные поверхности** характеризуются самыми низкими значениями и монотонным уменьшением отражательной способности от сине-фиолетовой к красной зоне спектра, поскольку длинноволновое излучение сильнее поглощается водой.

IV. **Снежный покров** обладает наиболее высокими значениями коэффициентов спектральной яркости с небольшим их понижением в ближней инфракрасной зоне спектра. Близки к этому классу по характеру отражения облачные образования, которые имеют несколько узких полос поглощения в длинноволновой части спектра.

Общим для всех объектов является понижение коэффициента спектральной яркости в зоне 2—3 мкм. Обращают на себя внимание два минимума у кривых при длинах волн 1,43 и 1,93 мкм, обусловленные полосами поглощения воды. Особенно они заметны у кривой отражения зеленой растительности, где они добавляются к уже отмеченному минимуму в зоне 0,66 мкм.

Спектральная отражательная способность, по которой разделены классы, различается и у объектов внутри класса (рис. 2.6, 2.7).

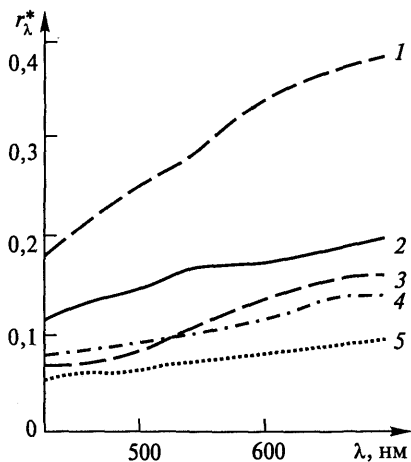


Рис. 2.6. Кривые спектральной яркости основных типов почв: 1 — серозем; 2 — дерново-подзолистая; 3 — темно-каштановая; 4 — темно-серая лесная; 5 — чернозем

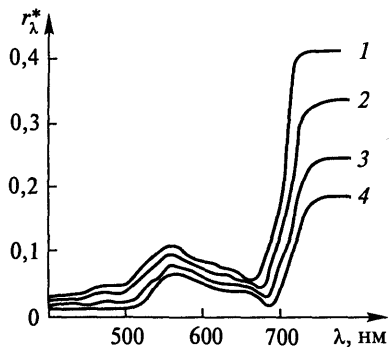


Рис. 2.7. Кривые спектральной яркости деревьев разных пород: 1 — береза; 2 — дуб; 3 — сосна; 4 — ель

Более того, коэффициенты спектральной яркости варьируют в определенных пределах и для объектов одного вида. Так, на отражательную способность горных пород влияют запыленность, различные поверхностные выцветы и корки, спектральное отражение которых по сравнению с исходной породой может существенно отличаться. При повышении влажности почв их яркость уменьшается (при полном насыщении водой — в два раза), но характер кривой спектральной отражательной способности не меняется.

Спектральная яркость растений меняется с их возрастом: она выше у молодых растений и ниже у находящихся в стадии полной зрелости. Отражательная способность растительности зависит от фитопатологических изменений. При заболевании растения его листья начинают слабее поглощать красные и отражать инфракрасные лучи. Из всех объектов суши растительный покров имеет наиболее информативные спектральные характеристики, которые чутко реагируют на его изменчивость.

Отражательная способность водных объектов сильно зависит от содержания в воде фитопланктона и ее загрязнения — наличия взвешенных частиц, нефтяной пленки и т. д.

Загрязнение снега и содержание в нем воды также приводят к изменениям отражательной способности. При насыщении снега водой отражение ближнего и среднего инфракрасного излучения резко падает.

Таким образом, спектральная отражательная способность зависит от свойств объектов, их состояния, а также от сезона. Дис-

танционно опознавать объекты и оценивать их состояние возможно не только по величине коэффициента спектральной яркости, но и по *спектральной индикатрисе отражения*. Существует много объектов на земной поверхности, которые по разным направлениям отражают излучение разного спектрального состава. Например, в составе отраженного излучения поля цветущего подсолнуха в восточном направлении всегда преобладают оранжево-красные лучи, а в западном — зеленые. Поэтому коэффициенты спектральной яркости природного объекта, измеренные при визировании под разными углами к земной поверхности, могут служить его количественными спектральными признаками.

**Понятие о пространстве спектральных признаков.** Помимо представления коэффициентов  $r_{\lambda}^*$  в виде кривых спектральной яркости их применяют для характеристики объекта в так называемом *пространстве спектральных признаков*, представляя графически соотношения спектральных яркостей в наиболее информативных зонах. Для этого значения яркости (или коэффициентов спектральной яркости) в выбранных зонах, например красной и ближней инфракрасной, откладывают вдоль разных осей прямоугольной системы координат на плоскости, которая в этом случае представляет двумерное пространство спектральных признаков (рис. 2.8). Положение полученной точки, которое определяется двумя плоскими координатами или, как чаще говорят, вектором, характеризует конкретный объект или его состояние. Поскольку, как уже отмечалось, спектральные яркости одного и того же объекта обычно варьируют в некоторых пределах, то в пространстве спектральных признаков такому объекту будет соответствовать не одна

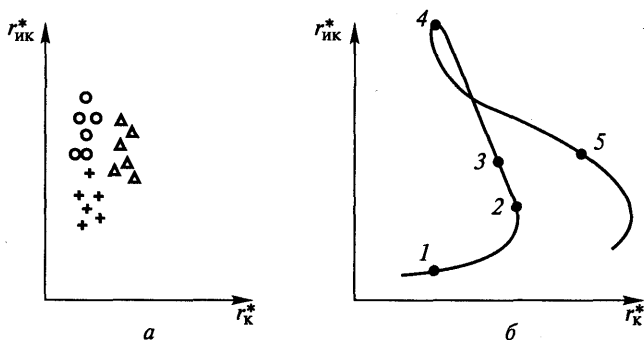


Рис. 2.8. Пространство спектральных признаков:

*a* — представление трех разных сельскохозяйственных культур в двумерном пространстве спектральных признаков по данным многократных измерений; *b* — кривая развития зерновой культуры в двумерном пространстве спектральных признаков: 1 — почва; 2 — всходы; 3 — колошение, выход в трубку; 4 — молочная спелость; 5 — восковая спелость;  $r_{ик}^*$ ,  $r_{к}^*$  — коэффициенты спектральной яркости соответственно в ближней инфракрасной и красной зонах спектра

точка, а целая область (рис. 2.8, а). Если же при наблюдении изменяющегося объекта в течение определенного времени получена серия значений спектральной яркости, то их набор позволяет построить кривую, форма которой в пространстве спектральных признаков еще более надежно идентифицирует объект. При дешифрировании снимков даже выделяют особый дешифровочный признак, который называется *временным образом* объекта. Например, изменение спектральной яркости сельскохозяйственной культуры в течение года иллюстрирует так называемая кривая ее развития, т. е. временной образ культуры (рис. 2.8, б).

Общее представление о пространстве признаков, которое может быть многомерным, является принципиально важным и широко применяется при компьютерной обработке снимков.

Распространено также использование величин коэффициентов спектральной яркости для получения информативных количественных спектральных показателей — так называемых *индексов* — путем простых арифметических вычислений. При этом используется разность или отношение двух коэффициентов, отношение их разности к сумме и т. д. Предложено достаточно много таких показателей. Среди них — вегетационные индексы, например нормализованный разностный вегетационный индекс *NDVI*, коррелирующий с запасами растительной биомассы:

$$NDVI = \frac{r_{ИК}^* - r_{К}^*}{r_{ИК}^* + r_{К}^*},$$

где  $r_{ИК}^*$  и  $r_{К}^*$  — коэффициенты спектральной яркости соответственно в ближней инфракрасной и красной зонах спектра.

### 2.1.3. Характеристики собственного излучения Земли

Известно, что Земля как планета в целом не только поглощает лучистую энергию, но и излучает ее. В соответствии с температурой Земли, которая в среднем составляет 17 °С, максимум энергии земного излучения приходится на инфракрасные лучи с длинами волн около 10—12 мкм. Земное тепловое излучение, простираясь в сторону более коротких инфракрасных волн, становится слабее и при длине волны 3 мкм имеет интенсивность примерно одинаковую с инфракрасным солнечным излучением. В сторону длинных волн оно распространяется на радиодиапазон и его удается регистрировать даже на метровых радиоволнах. Уходящее излучение Земли, как и регистрируемое излучение техногенного происхождения, можно условно разделить на инфратепловое и радиотепловое.

**Инфратепловое излучение.** В соответствии с физическим законом Стефана — Больцмана интенсивность теплового излучения  $P$

**Коэффициенты излучения некоторых объектов**  
(инфракрасный диапазон 8—14 мкм)

Объект	$\epsilon$	Объект	$\epsilon$
Вода чистая	0,99	Кварц (агат)	0,93
Лед	0,98	Гранит	0,90
Растительность	0,97	Базальт	0,81
Асфальт	0,96	Песок кварцевый	0,71

земных объектов резко возрастает с повышением их абсолютной температуры  $T$ :

$$P = \epsilon \sigma T^4,$$

где  $\sigma$  — фундаментальная постоянная Стефана, значение которой точно известно;  $\epsilon$  — коэффициент излучения конкретного объекта, величина которого, различная для разных длин волн, определяется экспериментально.

При рассмотрении теплового излучения важны представления об идеальном излучателе (эталоне), за который принимается абсолютно черное тело. Среди объектов с одинаковой температурой собственное излучение идеального излучателя будет наиболее интенсивным. Поэтому если принять коэффициент излучения абсолютно черного тела при определенной длине волны равным единице, то у остальных объектов он будет меньше (табл. 2.2). Своеобразный характер спектральной излучательной способности у некоторых объектов открывает возможность их идентификации (рис. 2.9).

Зависимость интенсивности инфракрасного излучения от температуры объектов лежит в основе дистанционных методов ее определения (тепловая съемка). Однако по зарегистрированному тепловому излучению определяется так называемая *радиационная температура*, которая обычно ниже физической, поскольку она зависит еще и от излучательной способности объекта, и от ослабления излучения в атмосфере. Но даже в случае регистрации не абсолютных температур, а только температурных (радиационных) контрастов, возможно эффективное

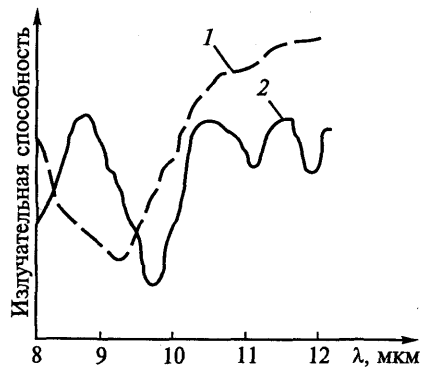


Рис. 2.9. Спектральная излучательная способность некоторых горных пород:

1 — песчаник; 2 — базальт

выделение объектов и определение их характеристик. По температурным контрастам удается выделять вулканы, течения в океане, обнаруживать зоны подземных пожаров, контролировать состояние энергетических и ирригационных систем и т. д. У многих объектов утром и вечером наблюдается явление *инверсии* температурных контрастов. Например, поверхностные воды ночью теплее, а днем холоднее окружающей суши; в дневные часы хвойная растительность холоднее лиственной, а в ночные — наоборот. Большое влияние на температурные контрасты оказывает влажность поверхности в связи с ее охлаждением при испарении. Так, в утренние часы хорошо выделяются холодные увлажненные участки местности. Одной из причин температурных контрастов является конвективный тепловой поток из недр Земли, который нередко связан с тектоническими нарушениями.

**Радиотепловое излучение.** Как уже отмечалось, нагретые объекты излучают энергию и в радиодиапазоне, хотя радиотепловое излучение по интенсивности значительно уступает тепловому излучению в инфракрасном диапазоне. Радиотепловое излучение, как и инфратепловое, формируется поверхностным излучательным слоем, так называемым *скин-слоем*, толщина которого тем больше, чем длиннее волна излучения. Интенсивность радиотеплового излучения характеризуется так называемой *радиояркостной температурой*  $T_{\text{я}}$  — произведением абсолютной температуры и коэффициента излучения. Величина коэффициента излучения в радиодиапазоне значительно варьирует в зависимости от электрических свойств (а значит, от влажности и солености), кристаллической структуры и характера поверхности объекта. Наибольшее его значение имеет растительность (0,9), затем следуют почвы (0,8), водные поверхности (0,3) и, наконец, металлические предметы. Таким образом, различия в радиояркостной температуре земных объектов определяются в основном их излучательной способностью, а не физической температурой. Так, наибольшую радиояркостную температуру летом имеет растительный покров (300 °К) и значительно меньшую — водные поверхности (100 °К). Однако самые «холодные» в радиодиапазоне — металлические предметы.

На радиояркостную температуру акваторий оказывает существенное влияние волнение, так как пенистые гребни имеют более высокий коэффициент излучения, чем вода. Радиояркостная температура льда обычно на несколько десятков градусов выше, чем воды. Излучательная способность различна у однолетнего и многолетнего льда.

На радиационные характеристики почвенного покрова в микроволновом диапазоне наибольшее влияние оказывает влажность почв. Изменение интенсивности радиоизлучения сухой почвы и почвы в состоянии полной влагоемкости достигает 100 °К (рис. 2.10).

Поэтому по радиотепловому излучению удается определять влагосодержание почвы.

Растительный покров в радиодиапазоне обладает наиболее высокими излучательными свойствами, которые приближаются к свойствам идеального излучателя — абсолютно черного тела. Его радиояркостная температура увеличивается пропорционально высоте и густоте растений. Радиотепловое излучение почвенно-растительного покрова различных природных зон (тайга, тундра, степь, пустыня) заметно различается. Оно имеет также выраженный годовой ход с максимумом в летний период.

Опыт показывает, что радиотепловое излучение, регистрируемое при разных длинах волн, целесообразно использовать для характеристики вполне определенных объектов и явлений. Так, миллиметровые волны наиболее пригодны для изучения атмосферы, сантиметровые — льдов, дециметровые — солености водоемов и т. д.

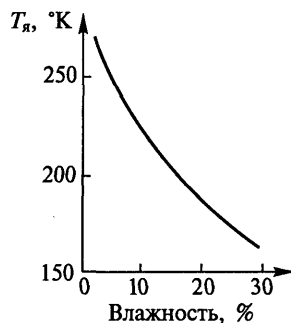


Рис. 2.10. Зависимость радиояркостной температуры почвы от влажности

#### 2.1.4. Искусственное освещение местности

В аэрокосмических методах помимо естественного излучения используется и искусственное. Для искусственного облучения (освещения) исследуемых объектов можно использовать электромагнитные волны всех диапазонов. Так, в ясные безоблачные ночи, которых значительно больше, чем ясных дней, выполняют разведывательную аэрофотосъемку, когда местность освещается фотобомбой, спускаемой на парашюте. Применяется при аэросъемке и лазерная подсветка местности. Однако в настоящее время наибольшее значение имеет радиоизлучение СВЧ-диапазона, которым освещается местность при активной радиолокационной съемке. На вариации интенсивности регистрируемого отраженного радиоизлучения существенно влияют неровности отражающей поверхности и ее влажность, от которой зависит диэлектрическая постоянная. Если плоскость поляризации зондирующих радиоволн параллельна водной или земной поверхности, то отражение будет более интенсивным, нежели при перпендикулярной поляризации сигнала. Это свойство наиболее ярко проявляется при отражении от взволнованной водной поверхности: чем больше волнение, тем больше различие в интенсивности отраженных сигналов разной поляризации.

Весьма ценное свойство зондирующего радиоизлучения — проникающая способность. Глубина проникновения излучения уве-

личивается пропорционально длине волны и зависит от физико-химических свойств облучаемого объекта. Например, миллиметровые радиоволны рассеиваются травянистой растительностью, а сантиметровые достигают почвенного покрова. Однако они, как и дециметровые радиоволны, рассеиваются пологом лесного покрова, сквозь который проникают лишь метровые волны. Проникновение радиоволн в воду, особенно морскую, значительно слабее, чем в грунт. Для глинистой влажной почвы глубина проникновения дециметровых волн составляет миллиметры, а метровые волны проникают в сухую песчаную почву на десятки метров. Отражение радиоволн меняется при наличии неоднородностей в строении зондируемого слоя, например глубинных разломов под чехлом рыхлых отложений или водоносных слоев, интенсивно отражающих радиоволны, что используется для поиска линз грунтовых вод. Радиозондирование с самолета помогло открыть громадное подледное озеро Восток в Антарктиде.

### 2.1.5. Влияние атмосферы на регистрируемое излучение

Земная атмосфера для аэрокосмических методов, с одной стороны, представляет собой важнейший объект самостоятельных исследований, с другой — является основным источником помех и искажений при изучении земной поверхности. Излучение, прежде чем попасть в регистрирующий прибор, расположенный на некоторой высоте над земной поверхностью, должно пройти сквозь атмосферу — смесь газов, в которой взвешены твердые и жидкие частицы — от тонкого аэрозоля до плотных облаков со всеми промежуточными стадиями. Основная масса атмосферы сосредоточена в нижних приземных слоях (до 10 км).

**Влияние облачности.** Статистика показывает, что в каждый момент времени облачность закрывает более половины площади земной поверхности, хотя над каждой ее точкой облака сохраняются обычно не более 5 дней. Даже маломощные облака блокируют все оптическое излучение. Только радиоволны длиной свыше 2 см беспрепятственно проходят сквозь облачный покров. При планировании аэрокосмических съемок приходится учитывать пространственно-временные закономерности распространения облачности в течение суток и года. Географ должен отчетливо представлять, что на практике получить для исследований нужный снимок на заданную территорию для определенного времени года — задача непростая, прежде всего из-за облачности, которую недаром называют ахиллесовой пятой космического зондирования в оптическом диапазоне.

Но даже проходя сквозь безоблачную атмосферу, электромагнитное излучение испытывает рефракцию и ослабление.



**Атмосферная рефракция** (искривление лучей) связана с изменением коэффициента преломления в разных слоях атмосферы, что обусловлено их различной плотностью, температурой, влажностью. Влияние рефракции — искажения направления лучей — составляет несколько угловых секунд и должно учитываться при точных фотограмметрических измерениях снимков.

**Ослабление излучения в атмосфере**, которое происходит вследствие рассеяния и поглощения излучения, подчиняется экспоненциальному закону Бугера — Ламберта:

$$J = J_0 10^{-ki} = J_0 T^*,$$

где  $J$  — интенсивность излучения, прошедшего слой атмосферы толщиной  $i$ ;  $J_0$  — интенсивность вступившего в атмосферу излучения;  $k$  — суммарный коэффициент ослабления;  $T^*$  — коэффициент прозрачности атмосферы, который не одинаков для различных спектральных лучей. Для территории нашей страны коэффициент  $T^*$  в видимом диапазоне имеет среднее значение 0,74.

Ослабление излучения с увеличением длины пути быстро усиливается и тем значительнее, чем больше суммарный коэффициент ослабления, который определяется спектральным поглощением и рассеянием.

При прохождении излучения сквозь атмосферу происходит его избирательное *поглощение* атмосферными компонентами, главным образом водяным паром, озоном, углекислым газом, метаном. Экспериментально выявлены четко очерченные, но разные по ширине и глубине полосы поглощения (рис. 2.11). Спектры поглощения атмосферных газов имеют также тонкую структуру, т. е. много узких полос поглощения. Так, например, на участке 7—14 мкм их обнаружено около 400.

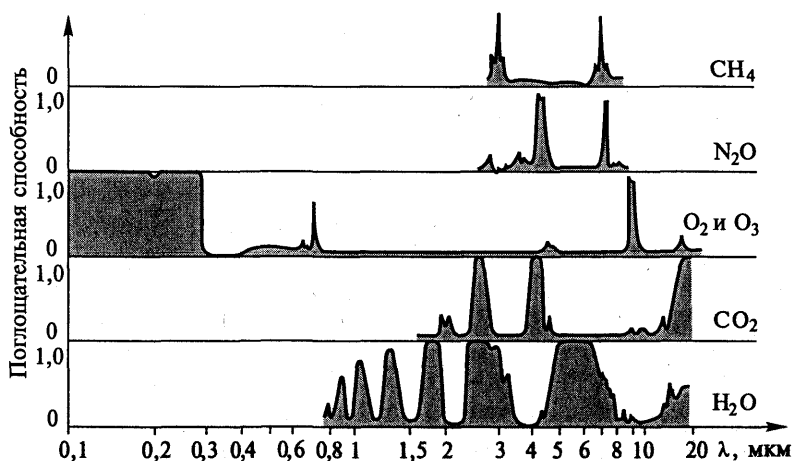


Рис. 2.11. Поглощательная способность отдельных компонентов атмосферы

Характер *рассеяния* в значительной степени зависит от длины волны падающего излучения и замутненности атмосферы. Интенсивность избирательного рассеяния молекулами атмосферных газов (так называемое рассеяние Релея) очень быстро возрастает с уменьшением длины волны излучения. Наиболее сильно молекулами рассеивается коротковолновое оптическое излучение (этим объясняется голубизна неба). Аэрозольное рассеяние (рассеяние Ми) при размерах частиц больше длины волны неизбирательно рассеивает все падающее излучение. Оно оказывает значительно большее влияние на результаты аэрокосмических съемок, чем молекулярное.

Аэрозольное рассеяние излучения частицами влаги и пыли, прежде всего коротковолнового, при прохождении через слой атмосферы приводит к свечению слоя — *воздушной дымке*, яркость которой зависит от состояния атмосферы, высоты Солнца и направления визирования. Необходимо учитывать различия в локальной задымленности атмосферы. Значительная дымка отмечается над промышленными и лесными районами. Она возрастает к вечеру. Задымленность атмосферы летом больше, чем зимой. Для ослабления отрицательного влияния воздушной дымки при аэрокосмических съемках применяют светофильтры, отсекающие фиолетовые и синие лучи.

**Спектральная прозрачность атмосферы.** Атмосфера подобно фильтру пропускает лучи различных длин волн избирательно, селективно. Для ультрафиолетового излучения атмосфера непрозрачна. По мере перехода в длинноволновую часть располагаются участки спектра — *окна прозрачности*, где коэффициент прозрачности атмосферы достаточно велик, хотя и не всегда равен единице (рис. 2.12). Наибольшее практическое значение имеет окно прозрачности в видимом диапазоне с прилегающей частью ультрафиолетовой зоны и ближней инфракрасной зоной (0,3 — 1,3 мкм), а также два окна в тепловом инфракрасном диапазоне (3 — 5 и 8 —

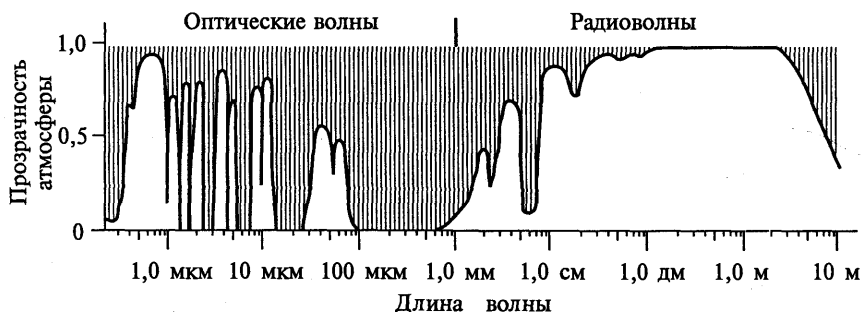


Рис. 2.12. Прозрачность атмосферы для оптических и радиоволн

14 мкм). Большое окно прозрачности в зоне 50 мкм в аэрокосмическом зондировании пока не используется из-за отсутствия приемников излучения. В микроволновом диапазоне при длинах волн свыше 1—2 мм атмосфера опять становится прозрачной<sup>1</sup>. Метровые радиоволны беспрепятственно проходят всю толщу атмосферы. С дальнейшим увеличением длины радиоволн усиливается их отражение от ионизирующих слоев атмосферы и декаметровые волны с длиной волны свыше 10 м уже не могут проникнуть сквозь ионосферу. Для радиоволн этих длин атмосфера полностью непрозрачна.

***Влияние атмосферы на оптические характеристики объектов.***

Регистрирующий прибор, находящийся над земной поверхностью, фиксирует восходящее суммарное излучение, которое складывается из излучения исследуемого объекта, преобразованного нижележащим атмосферным слоем, и излучения этого слоя. Таким образом, оптические характеристики объектов, определенных сквозь толщу атмосферы, отличаются от характеристик, полученных в непосредственной близости от объектов. По мере отклонения направления визирования от отвесного искажающее влияние атмосферы растет. Наблюдаемая сквозь толщу атмосферы яркость объекта  $B_a^*$  складывается из двух частей:

$$B_a^* = B_3^* T^* + B_d^*,$$

где  $B_3^*$  — яркость объекта на земной поверхности;  $T^*$  — коэффициент прозрачности атмосферы;  $B_d^*$  — яркость воздушной дымки.

При определенном соотношении этих величин дистанционно регистрируемые яркости объектов оказываются усиленными (для темных объектов) или ослабленными (для светлых), а относительные контрасты сглаженными. Расчеты показывают, что под влиянием атмосферы контрасты могут снизиться в 3—5 раз. Это прежде всего ухудшает передачу деталей темных объектов, снижая качество снимков. Опыт показывает, что из-за отрицательного влияния атмосферы разрешение космических снимков может снизиться в 2 раза по сравнению с расчетным.

Эксперименты по космическому спектрометрированию, которые сопровождалась синхронными самолетными и наземными измерениями, показали, что атмосфера, увеличивая общую яркость объектов, искажает их спектральную отражательную способность. В сине-зеленой части спектра отмечено существенное увеличение коэффициентов спектральной яркости, определенных из космоса. Это увеличение постепенно уменьшается к длинноволновой части видимого спектра, где оно становится относи-

<sup>1</sup> Следует заметить, что на принимаемые радиосигналы в этом диапазоне оказывают влияние различного рода радиопомехи, прежде всего искусственного происхождения.

тельно небольшим. Кривая спектральной яркости объектов класса «горные породы и почвы» более полого; повышение в красной зоне спектра уменьшено. Отражательная способность вегетирующей растительности не имеет такого характерного «зеленого» максимума в зоне 0,55 мкм, как при наземных измерениях, из-за относительного увеличения яркости в голубой части спектра. У водных объектов при общем увеличении яркости атмосфера не искажает характера спектральной отражательной способности. Яркость снежного покрова и облачности в целом понижается.

Для количественного учета влияния атмосферы на регистрируемое излучение применяют ее теоретические модели. Однако надо иметь в виду, что атмосфера пространственно неоднородна и изменчива, поэтому весьма трудно точно учесть ее влияние, особенно если определяются количественные характеристики регистрируемого излучения.

**Проникновение солнечного излучения в воду.** Закономерности поглощения и рассеяния света для воды подчиняются тому же закону, что и для атмосферы. Водная толща ослабляет яркость, контраст и четкость наблюдаемых подводных объектов. Интенсивность проникающего в воду солнечного излучения падает, а спектральный состав изменяется. Инфракрасное излучение полностью поглощается поверхностными слоями воды. Для прозрачных вод, когда практически отсутствуют взвеси и фитопланктон, красные лучи проникают на глубину до 10 м, желтые — до 20 м и только сине-голубые лучи достигают глубины 50 м. Интенсивность света здесь уменьшается в 100 раз. На больших глубинах дно солнечным светом практически не освещается. Однако этим фактам противоречат многочисленные утверждения космонавтов о том, что с орбитальных высот удастся рассмотреть крупные океанические хребты даже на километровых глубинах. Одно из объяснений этого феноменального явления состоит в том, что из космоса наблюдается не рельеф дна океана, а коррелирующие с ним постоянные зоны перемешивания теплых поверхностных и холодных глубинных вод, в которых меняются физические и биологические характеристики верхних слоев океана, шероховатость его поверхности. Такие крупномасштабные явления в океане и воспринимает глаз человека с космической орбиты.

## 2.2. Методы регистрации излучения

В аэрокосмических съемочных системах излучение регистрируется несколькими способами, основанными на его химическом, тепловом и электрическом действии. При этом используются различные приемники (детекторы) излучения — фотографические материалы, фотоэлектрические и термоэлектрические элементы,

а также антенны. Важнейшей характеристикой приемников является чувствительность — общая и спектральная.

Наряду с техническими детекторами в аэрокосмических методах используется и очень совершенный биологический приемник — человеческий глаз. Фоторецепторы сетчатки глаза воспринимают видимый свет в диапазоне  $0,38 — 0,72$  мкм, что вызывает у нас субъективные световые и цветовые ощущения. Глаз, чувствительность которого может меняться почти в миллион раз, лучше всего воспринимает излучение с длиной волны  $0,556$  мкм. Поэтому зеленовато-желтый цвет виден как наиболее яркий. В современных аэрокосмических методах зрение играет исключительно важную роль для получения информации как во время аэровизуальных и космических наблюдений земной поверхности, так и в процессе камеральной обработки аэрокосмических снимков — при их дешифрировании и фотограмметрических измерениях. Поэтому особенности зрительного восприятия учитываются при конструировании приборов; они определяют оптимальные условия обработки человеком снимков и т.д. Зрительные пороги, а также закономерности цветного и стереоскопического зрения будут рассмотрены в гл. 3.

### 2.2.1. Фотохимическая регистрация излучения

До недавнего времени широко распространенным химическим приемником излучения служили фотографические материалы, которые применялись на многих этапах обработки аэрокосмической информации начиная с ее регистрации и кончая представлением окончательной продукции в виде фотоснимков.

**Черно-белые фотографические материалы.** Основу их составляет светочувствительный фотографический (эмульсионный) слой, в котором взвешены микроскопические (около  $1$  мкм) кристаллы бромистого серебра. От их размера зависит чувствительность слоя: чем крупнее кристаллы, тем выше светочувствительность. Кроме того, различные фотографические слои не одинаково чувствительны (сенситивизированы) к спектральному излучению разной длины волны (рис. 2.13). С помощью современных фотоматериалов можно зарегистрировать спектральное излучение с длинами волн  $0,45 — 0,95$  мкм. Фотоплен-

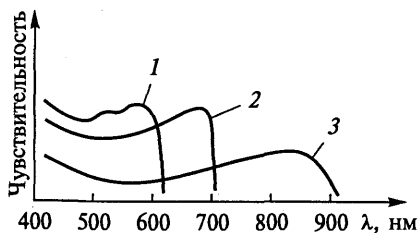


Рис. 2.13. Спектральная чувствительность некоторых фотопленок, применяемых при аэрокосмической съемке:

1 — изоортохром («изо» — равный, «орто» — правильный, «хром» — цвет); 2 — панхром («пан» — все); 3 — инфраортохром («инфра» — ниже)

ки должны иметь светочувствительность, достаточную для съемок с короткими экспонирующими выдержками с быстро летящих самолетов и спутников. Однако высокочувствительные панхроматические, а также инфрахроматические пленки — крупнозернистые, что отрицательно сказывается на качестве получаемых фотоснимков.

**Оптическая плотность.** При фотографическом проявлении кристаллы бромистого серебра, на которые подействовал свет, превращаются в металлические, образуя серебряное изображение. Поскольку металлическое серебро выделяется в виде мелких кристаллов, оно имеет черный цвет. Количество восстановленного металлического серебра, определяя степень почернения слоя, соответствует количеству освещения, сообщенному данному участку светочувствительного слоя. Степень почернения в фотографии принято оценивать специальной единицей — *оптической плотностью*. По определению, оптическая плотность  $D$  является десятичным логарифмом непрозрачности  $O$ , которая показывает, во сколько раз уменьшается сила света после прохождения через данное почернение, т. е.

$$D = \lg O \text{ или } O = 10^D.$$

За единицу оптической плотности принята плотность такого почернения, которое ослабляет световой поток в 10 раз. На фотонегативах аэрокосмических снимков изображение объектов местности имеет различную оптическую плотность, которая колеблется от нескольких сотых до 2—2,5 единиц при среднем значении 0,7—1,1.

**Характеристическая кривая.** Величина фотографического почернения зависит не только от количества световой энергии, подействовавшей на фотоматериал, но и от условий его проявления (состава проявителя, времени проявления). Эту зависимость, ко-

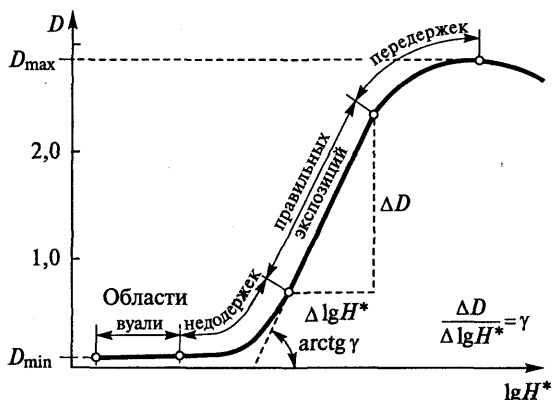


Рис. 2.14. Характеристическая кривая

торая является нелинейной, обычно представляют в виде экспериментального графика, называемого *характеристической кривой* фотографического материала (рис. 2.14). По оси ординат графика отложены величины оптических плотностей  $D$ , а по оси абсцисс — соответствующее количество освещения, называемое экспозицией  $H^*$ , в логарифмическом выражении. Экспозиция  $H^*$  равна произведению освещенности фотоматериала  $E^*$  на время его действия.

На характеристической кривой выделяют несколько участков (областей):

область *вуали* — участок кривой, где оптическая плотность остается постоянной, несмотря на увеличение экспозиции;

область *недодержек* — начальный участок, где равным приращениям логарифма экспозиции соответствуют постепенно возрастающим приращениям оптической плотности;

область *правильных (нормальных) экспозиций* — прямолинейный участок, на котором равные увеличения логарифма экспозиции вызывают равные приращения оптической плотности;

область *передержек* — конечный участок, где равным увеличениям логарифма экспозиции соответствуют постепенно уменьшающиеся приращения оптической плотности.

Наибольшее практическое значение имеет прямолинейный участок, который наклонен к оси абсцисс под некоторым углом. *Коэффициент контрастности* фотоматериала, обозначаемый  $\gamma$ , равен величине тангенса угла наклона прямолинейного участка. Чем больше время проявления, тем выше коэффициент контрастности  $\gamma$ , круче наклонен прямолинейный участок характеристической кривой и тем большая плотность соответствует данной экспозиции. Разность  $\Delta D_{\max} = D_{\max} - D_{\min}$  характеризует общий тоновый контраст негатива (снимка). На величину плотности  $D$  изображения на фотографическом снимке помимо яркости  $B^*$  объекта на местности (или коэффициента яркости  $r^*$ ) и условий проявления (коэффициент контрастности  $\gamma$ ) влияет еще много различных съемочных факторов: характер освещения, воздушная дымка, относительное отверстие съемочного объектива, свойства используемого фотоматериала и др. Однако для приближенной оценки ожидаемой плотности  $D$  и тонового контраста  $\Delta D$  изображения на аэрокосмическом снимке можно воспользоваться формулами

$$D = K + \gamma \lg r^*;$$

$$\Delta D = \gamma \lg \frac{r_2^*}{r_1^*},$$

где  $K$  — экспериментально определяемый коэффициент, зависящий от съемочных факторов;  $r^*$ ,  $r_1^*$ ,  $r_2^*$  — коэффициенты яркости объектов.

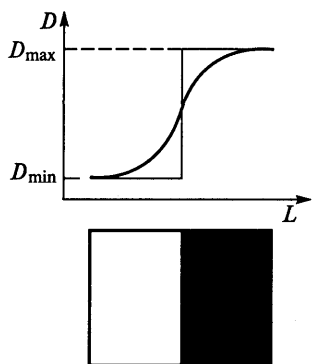


Рис. 2.15. Пограничная кривая фотографического воспроизведения резкой черно-белой границы

**Резкость.** Рассеяние света на кристаллах фотослоя приводит к нерезкости изображения. Кривая изменения плотности в зоне перехода от темного участка фотоизображения к светлому называется *пограничной кривой* (рис. 2.15). Чем меньше ширина пограничной зоны, тем выше резкость изображения. Резкость изображения зависит от толщины фотослоя — она выше у тонкослойных фотоматериалов. Наименьшую резкость имеет изображение на многослойных цветных фотоматериалах.

**Разрешающая способность.** В зависимости от зернистости и крутизны пограничной кривой фотографические материалы по-разному передают очень мелкие детали изображения. Возможность

раздельного воспроизведения слоев мелких близко расположенных деталей изображения характеризуется *разрешающей способностью*. Ее определяют по фотоизображению специального стандартного тест-объекта — *миры* (рис. 2.16). Штриховая мира состоит из элементов с различным числом штрихов, приходящихся на один погонный миллиметр. Штрихи миры делают абсолютно белыми и абсолютно черными, т. е. их визуальный контраст  $K_v = 1$ . Раньше разрешающую способность измеряли в линиях на миллиметр (л/мм), в настоящее время в качестве единицы измерения приняты миллиметры в минус первой степени ( $\text{мм}^{-1}$ ). Когда говорят, что фотоматериал имеет разрешающую способность 50 линий на миллиметр ( $50 \text{ мм}^{-1}$ ), то это значит, что он может раздельно воспроизвести на одном погонном миллиметре 50 черных штрихов миры шириной в 0,01 мм и 50 белых штрихов такой же ширины, иначе говоря, 50 пар черно-белых штрихов.

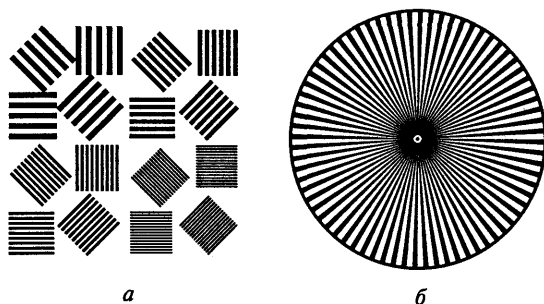


Рис. 2.16. Штриховая (а) и радиальная (б) миры для определения разрешающей способности



**Цветные фотоматериалы.** Для получения цветного изображения в светочувствительный фотографический слой дополнительно вводят специальную цветообразующую компоненту. Наиболее распространены компоненты, дающие желтый (Ж), пурпурный (П) и голубой (Г) цвета. Для получения цветных снимков используют многослойные (двух- и трехслойные) фотоматериалы (рис. 2.17). Так, строение трехслойного фотоматериала можно записать в виде символа, где левые буквы обозначают спектральные лучи (С — синие, З — зеленые, К — красные), действующие на фотоматериал, а правые — цвет воспроизведенного изображения:

$$\begin{pmatrix} \text{С} & \text{Ж} \\ \text{З} & \text{П} \\ \text{К} & \text{Г} \end{pmatrix}.$$

Трехслойное строение фотоматериала позволяет получить три точно совмещенных цветоделенных изображения, окрашенных в желтый, пурпурный и голубой цвета. Изготовление позитива на трехслойном фотоматериале аналогичного строения позволяет воспроизвести объект в цветах, близких к натуральным.

В аэрокосмической съемке, когда приходится снимать через толщу атмосферы, сильно рассеивающей коротковолновое излучение, применяют двух- и трехслойные цветные фотоматериалы, в которых обычно отсутствует синечувствительный слой, но име-

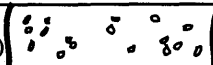
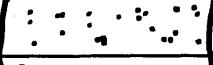
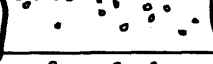
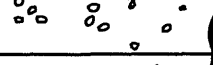

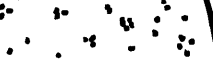
До проявления		После проявления
Синечувствительный слой (несенсибилизированная эмульсия)		Желтое изображение
Желтый фильтровый слой		Прозрачный слой
Зеленочувствительный слой (ортохроматическая эмульсия)		Пурпурное изображение
Красночувствительный слой (панхроматическая эмульсия)		Голубое изображение
	 Прозрачная подложка	
Окрашенный противоореольный слой		Прозрачный слой

Рис. 2.17. Строение цветной многослойной фотопленки

ется слой, чувствительный к невидимым инфракрасным лучам (ИК). Такие пленки, названные *спектрозональными*, дают изображение в преднамеренно искаженных (ложных) цветах, но обеспечивающих значительные цветовые контрасты изучаемых объектов. Комбинации слоев могут быть различны. В качестве примера приведем строение двух распространенных спектрозональных пленок (СН-6 и СН-23):

$$\begin{pmatrix} \text{ИК} & 3 \\ \text{К} & \text{П} \end{pmatrix} \text{ и } \begin{pmatrix} \text{ИК} & \text{Г} \\ \text{К} & \text{П} \\ 3 & \text{Ж} \end{pmatrix}.$$

### 2.2.2. Электрическая регистрация излучения

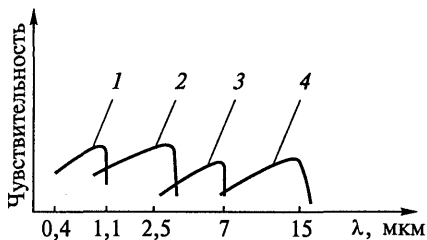
С помощью электрических приемников излучения удается регистрировать весь спектр электромагнитных волн, используемых при аэрокосмических исследованиях. При регистрации оптического излучения ответный электрический сигнал возникает или вследствие непосредственного воздействия излучения на чувствительный элемент приемника (фотоэлектрический эффект) или вследствие его нагревания (термоэлектрический эффект). В соответствии с этим приемники излучения в оптическом диапазоне делят на фото- и термоэлектрические. Регистрация излучения в радиодиапазоне основана на возникновении переменного электрического тока в проводнике (антенне) при воздействии на него радиоизлучения (электромагнитная индукция).

**Фотоэлектрические приемники, или фотоэлементы**, основаны на внешнем (электровакуумные фотоэлементы, фотоэлектронные умножители) и внутреннем фотоэлектрическом эффекте (полупроводниковые фотосопротивления, фотодиоды и др.).

У **электровакуумного фотоэлектронного умножителя** (ФЭУ) чувствительный элемент делают из металла, который под действием поглощенного излучения испускает электроны. Вырванные светом электроны многократно попадают на промежуточные чувствительные элементы, что значительно усиливает вырабатываемый ФЭУ фототок. Электровакуумные фотоэлементы наиболее чувствительны к видимому излучению. Их достоинство — высокие фотометрические свойства.

В **полупроводниковых фотоэлементах** — фотосопротивлениях (фоторезисторах) — чувствительный элемент делается из полупроводника, который под действием излучения резко изменяет электрическое сопротивление. Различные полупроводники (селен, кремний, теллур, германий и др.) позволяют изготавливать фотоэлементы, чувствительные к видимому и инфракрасному излучению (рис. 2.18). Однако их измерительные свойства (непостоян-

Рис. 2.18. Спектральная чувствительность различных полупроводниковых приемников излучения: 1 — кремний; 2 — сульфид свинца; 3 — антимонид индия; 4 — ртутно-кадмиевый теллурид



ство чувствительности, нелинейная зависимость электрического сигнала от освещения) хуже, чем у электровакуумных фотоэлементов.

В неоднородных полупроводниках (например, у кремния) под действием излучения наряду с изменением сопротивления наблюдается также образование собственной электродвижущей силы (фотогальванический эффект). Это явление лежит в основе действия фотодиодов — небольших по размеру фотоэлементов, отличающихся высокой чувствительностью во всех спектральных диапазонах и большим сроком службы.

В настоящее время для регистрации излучения широкое распространение получили *приборы с зарядовой связью*, так называемые *ПЗС-приемники*. Это многоэлементные фотоэлектрические приемники излучения, которые состоят из миниатюрных фотодиодов, соединенных в одномерные линейки или двумерные матрицы. Размер отдельного чувствительного элемента приемника очень мал — меньше 0,01 мм. Лучшие образцы современных приемников-линеек включают более десяти тысяч, а матрицы — несколько миллионов чувствительных элементов. Цикл работы этих детекторов достаточно сложный: он включает выработку ответного электрического сигнала, интенсивность которого пропорциональна яркости подействовавшего на приемник света, запоминание сигнала каждого элемента и их последовательное считывание. Управляя считыванием, возможно выбирать отдельные элементы или их группы для получения результирующего сигнала. Применение многоэлементных фотоэлектрических приемников ПЗС для регистрации излучения открыло широкие перспективы в создании геометрически и радиометрически точных многозональных съемочных систем высокого пространственного разрешения, которые можно быстро адаптировать к изменяющимся внешним условиям съемки.

Общая чувствительность фотоэлектрических приемников в несколько раз выше, чем фотопленок, что позволяет вести съемку при сравнительно коротких выдержках или более низкой освещенности. Ценными их свойствами являются также чувствительность к инфракрасному излучению, возможность регистрировать более широкий диапазон интенсивности излучения, а также ли-

нейная зависимость между ответным электрическим сигналом и действовавшим излучением.

**Термоэлектрические приемники.** Для регистрации теплового инфракрасного излучения применяются приемники, которые реагируют на поглощенное излучение нагреванием чувствительного элемента. Работа термоэлектрического приемника болометра основана на изменении электрического сопротивления нагреваемой зачерненной металлической фольги; в терморезисторах используют полупроводники, которые чувствительны не только к свету, но и к нагреванию (германий с включением ртути). Для надежной работы термоэлектрического приемника необходимо его глубокое ( $-200\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) охлаждение. Термоприемники менее чувствительны и медленнее реагируют на воздействующее излучение, чем фотоприемники.

Важным показателем электрических приемников излучения служит внутренний шумовой ток. Чем лучше соотношение сигнал/шум, тем более высокое разрешение могут иметь съемочные системы с электрическими приемниками излучения.

**Антенны.** Простейшей антенной, которая является приемником и излучателем электромагнитных волн радиодиапазона, может служить металлический стержень. Если стержень соединить с генератором электрических колебаний, он станет излучать в окружающее пространство электромагнитные волны, и наоборот, приходящие электромагнитные волны будут индуцировать в нем электрический ток. Направленность действия антенны зависит от ее конструкции. Помещая антенну-стержень в параболический металлический рефлектор, получают остронаправленное излучение существенно большей мощности. Рефлектор у приемной антенны в сотни и тысячи раз повышает и ее чувствительность. Чем больше размер рефлектора, тем уже направленность действия антенны.

## 2.3. Съемочная аппаратура и ее носители

### 2.3.1. Съемочная аппаратура

Аэрокосмические снимки получают с помощью специальной аппаратуры — съемочных систем многократного действия. Существуют десятки различных съемочных систем, отличающихся по принципу действия, конструкции, назначению; среди них выделяют основные — фотографические, оптико-электронные и радиоэлектронные. В свою очередь, каждая из этих систем состоит из целого ряда взаимосвязанных приборов и устройств, но главными из них соответственно являются *фотокамеры*, *сканеры* и *радиолокаторы*, которые также имеют по несколько разновиднос-

тей. Неотъемлемой частью съемочных систем служит бортовой компьютер, управляющий их автоматической работой. Съемочная аппаратура дополняется комплексом приборов для точного определения во время полета пространственных координат и углов наклона носителя — радиовысотомерами, ГЛОНАСС/GPS-приемниками, инерциальными системами. Работа электронных съемочных систем тесно связана с бортовыми средствами передачи видеоинформации на Землю и наземными пунктами приема этой информации. Применяются два режима передачи: синхронно с выполнением съемки (в зоне прямой видимости) с предварительной записью снятой видеоинформации на запоминающие устройства на борту носителя и быстрым ее сбросом во время пролета над пунктом приема. Все съемочные системы, предназначенные для получения аэрокосмических снимков, не только регистрируют необходимую видеоинформацию, но, к сожалению, вносят в нее неизбежные аппаратные искажения.

Каждый аэрокосмический снимок, помимо изображения земной поверхности, содержит служебную информацию: регистрационный номер, дату и точное время съемки, параметры съемочной аппаратуры, координатные метки, калибровочные данные и другие характеристики, необходимые для его последующей обработки и практического использования.

**Фотографические аппараты** (кадровые и панорамные) — это распространенная и универсальная съемочная аппаратура, которая используется прежде всего для съемок с самолета. В отличие от любительских масса фотоаппаратов, предназначенных для аэрокосмических съемок, составляет десятки килограммов.

**Аэрофотоаппараты.** Внешний вид кадрового аэрофотоаппарата и принципиальная схема его основной части — аэрофотокамеры — приведены на рис. 2.19 и 2.20. Наиболее распространенный у нас в стране размер кадра  $18 \times 18$  см, хотя используются аэрофотоаппараты и с большим размером кадра, например  $30 \times 30$  см. В аэрофотоаппаратах устанавливаются отфокусированные на бесконечность линзовые объективы с фокусным расстоянием от 35 до 1000 мм (наиболее часто 70, 100, 200 мм). Формат кадра и фокусное рас-

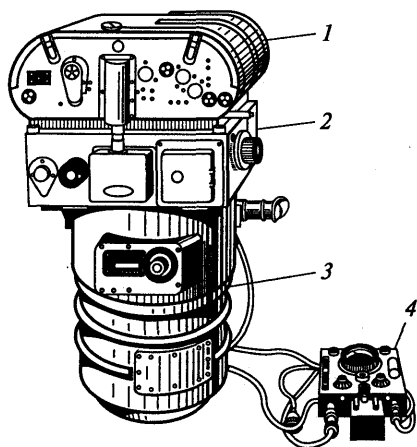


Рис. 2.19. Аэрофотоаппарат:

1 — кассета; 2 — камерная часть; 3 — объективная часть; 4 — командный прибор для управления работой аэрофотоаппарата

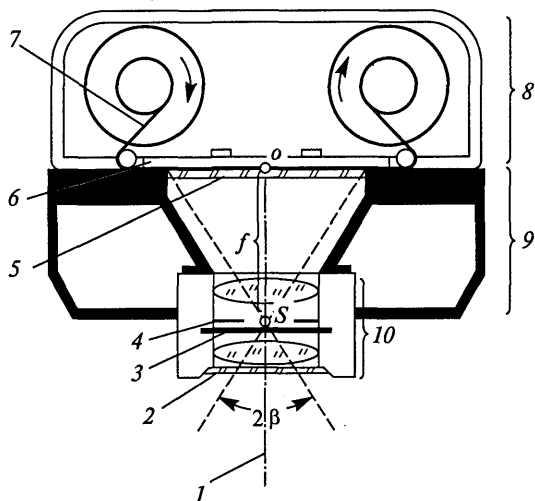


Рис. 2.20. Принципиальная схема аэрофотокамеры:

1 — оптическая ось фотокамеры; 2 — светофильтр; 3 — фотозатвор; 4 — диафрагма; 5 — выравнивающее стекло с координатными метками; 6 — прижимной стол для выравнивания фотопленки во время съемки; 7 — фотопленка; 8 — кассета; 9 — камерная часть; 10 — объектив

стояние определяют угол поля зрения аэрофотоаппарата ( $2\beta$ ). У узкоугольных аэрофотоаппаратов  $2\beta < 40^\circ$ , у широкоугольных может достигать  $140^\circ$ . Фотографирование производится на черно-белую, цветную или спектральнозональную пленку, которая перед экспозицией тщательно выравнивается специальным устройством в плоскость. Высококачественный объектив, съемка на выровненную в плоскость фотопленку, учет ее деформации при фотолaborаторной обработке способствуют тому, что снимок, получаемый кадровым аэрофотоаппаратом, представляет собою строгую центральную проекцию местности.

Такие снимки наиболее пригодны для точных фотограмметрических измерений.

На рис. 2.21 приведена геометрическая схема получения кадрового снимка аэрофотоаппаратом. Здесь  $S$  — центр проектирования снимка, совпадающий с центром объектива;  $f$  — фокусное расстояние камеры;  $o$  — так называемая *главная точка* снимка;  $H$  — высота фотографирования (съемки). Прямая, проходящая через главную точку снимка и центр проектирования, определяет направление съемки, и ее называют *оптической осью* камеры. На аэрофото-снимке изображаются *коорди-*

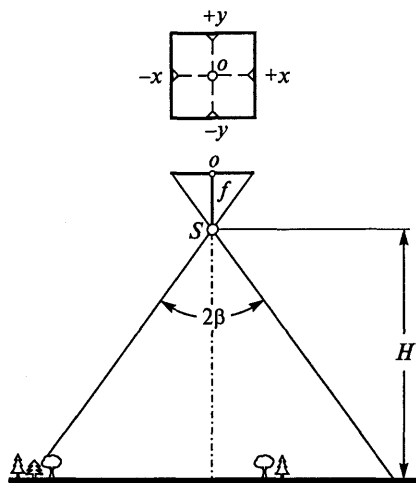


Рис. 2.21. Геометрическая схема кадровой съемки

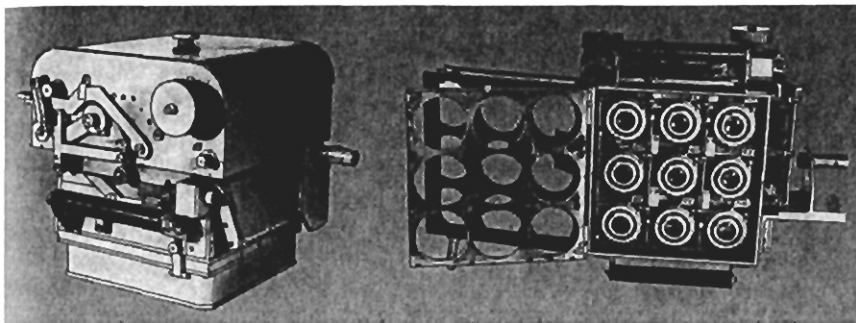


Рис. 2.22. Первая многозональная аэрофотокамера. Создана в Московском государственном университете им. М. В. Ломоносова в 60-х годах XX в. Предназначена для выполнения аэрофотосъемки на три типа фотопленки с тремя различными светофильтрами

*натные метки*, которые фиксируют на снимке плоскую систему координат с началом в главной точке  $o$ . Точное знание величин фокусного расстояния и плоских координат главной точки снимка (так называемых *элементов внутреннего ориентирования снимка*) необходимо для фотограмметрических определений.

С помощью многозональных аэрофотокамер получают снимки в нескольких узких спектральных зонах (рис. 2.22). Многозональные фотоснимки предназначены прежде всего для дешифрирования; для фотограмметрических измерений они применяются реже.

**Космические фотоаппараты** являются модификациями аэрофотоаппаратов. У нас в стране большой объем первых обзорных съемок из космоса в масштабах  $1 : 2\,000\,000$  —  $1 : 3\,000\,000$  выполнен космическим фотоаппаратом КАТЭ-140 с размером кадра  $18 \times 18$  см. Разрешение на местности космических снимков, полученных этим аппаратом, составляет несколько десятков метров. На рис. 2.23 показана многозональная *фотометрическая* космическая фотокамера МКФ-6, имеющая шесть идентичных объективов с  $f = 125$  мм и небольшой формат кадра —  $5,5 \times 8,0$  мм. В фотометрических камерах предусмотрено при

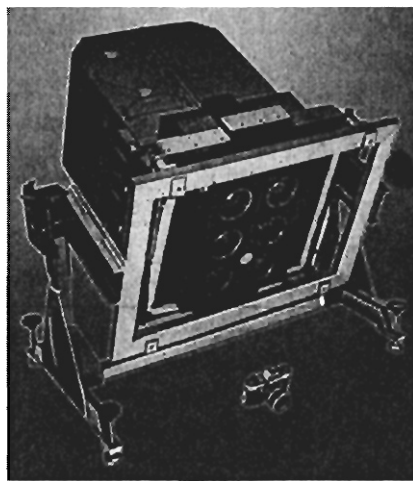


Рис. 2.23. Многозональная космическая фотокамера МКФ-6

съемке каждого кадра впечатывание в его служебное поле ступенчатого фотометрического клина, оптическая плотность каждой ступени которого точно известна. Это обеспечивает после выполнения фотометрической коррекции определение по фотоснимкам абсолютных значений спектральной яркости объектов земной поверхности с точностью около 15 %, а относительных — 5 %.

При съемке с быстродвижущегося носителя изображение местности смещается во время экспонирования. Сдвиг изображения  $\delta_w$  рассчитывается по формуле

$$\delta_w = \frac{W}{H} ft,$$

где  $W$  — скорость движения носителя;  $H$  — высота съемки;  $f$  — фокусное расстояние съемочной камеры;  $t$  — экспонирующая выдержка.

Сдвиг изображения приводит к его нерезкости, существенно ухудшая качество снимка. Чем детальнее снимки, тем жестче требования к допустимому сдвигу, который не должен превышать половины величины разрешения (на снимке). Поэтому съемочные фотокамеры, предназначенные для детальных съемок, приходится снабжать специальными механизмами компенсации сдвига изображения. Так, камера МКФ-6 во время экспозиции автоматически наклоняется на небольшой угол в направлении, противоположном движению носителя.

В *оптико-электронных кадровых камерах* изображение регистрируется не фотографическим, а электронным способом. Устройство электронной камеры аналогично фотографической — изображение строится объективом в центральной проекции на плоскости, но вместо кассеты с фотопленкой используется электронная система, преобразующая оптическое изображение в электрические сигналы.

Основу *телевизионных* электронных съемочных камер, которые применялись в начальный период космических исследований, составляет передающая электронно-лучевая трубка. В распространенной трубке видеоконе (от лат. *Video* — смотрю и греч. *eikon* — изображение) светочувствительный экран изготовлен из полупроводника (фотосопротивления), который превращает оптическое изображение в электрическое, состоящее из положительных зарядов. Изображение последовательно считывается электронным лучом, быстро обегаящим заряженный экран. Сформированный видеосигнал передается на наземные станции по радиоканалу.

В *цифровой электронной камере*, которую все чаще называют цифровой фотокамерой, изображение местности строится на плоской поверхности многоэлементной матрицы приборов с зарядовой связью (ПЗС-матрицы). Геометрические размеры ПЗС-матриц, а следовательно, кадра цифрового снимка, пока невелики — составляют несколько сантиметров.



Достоинства кадровых съемочных камер заключаются в практически мгновенном получении всего снимка в центральной проекции на плоскости, что обеспечивает его высокую геометрическую точность. Стремясь увеличить охват территории, приходится использовать либо широкоформатные камеры, либо широкоугольные объективы. Однако с увеличением угла поля зрения линзового объектива ухудшается равномерность освещения по кадру (которая падает к краям снимка пропорционально  $\cos^4\beta$ ), а также снижается разрешающая способность, что отрицательно сказывается на качестве снимка.

**Панорамные фотоаппараты** позволяют снимать поперек направления полета широкую полосу местности — иногда от горизонта до горизонта — при высоком фотографическом качестве снимков. Для этого в панорамном аппарате фотопленка расположена не на плоской, а на цилиндрической поверхности и изображение последовательно формируется узкой полосой (щелью) при повороте объектива камеры (рис. 2.24). Однако цилиндрический панорамный снимок по своим геометрическим свойствам существенно уступает плоскому кадровому, поэтому он обычно используется не для измерений, а для визуального дешифрирования. Например, с помощью космического панорамного фотоаппарата КВР-1000 с  $f = 1000$  мм и большим размером снимка  $18 \times 72$  см получают панорамное изображение с разрешением на местности 2 м, предназначенное для детального дешифрирования.

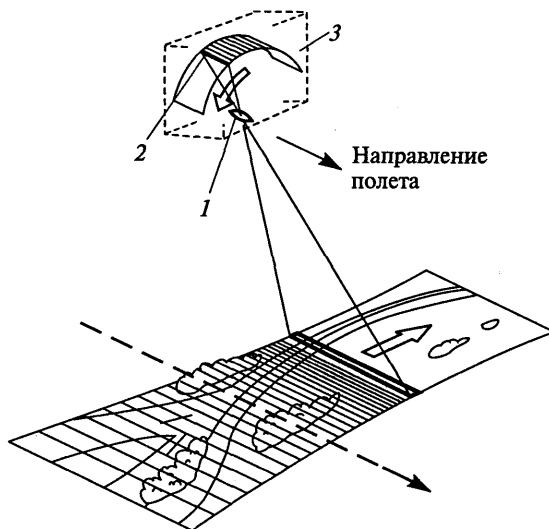


Рис. 2.24. Схема получения фотоснимка при панорамной съемке:

1 — объектив; 2 — экспонирующая щель; 3 — фотопленка

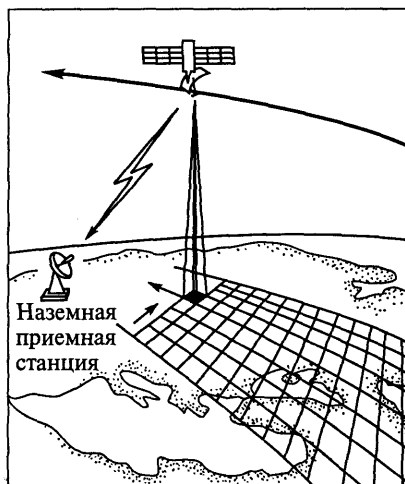


Рис. 2.25. Принцип сканерной съемки

разует его в электрический сигнал (рис. 2.25, 2.26). При сканерной съемке изображение местности получают в виде непрерывной полосы, состоящей из строк (сканов), которые, в свою очередь, состоят из отдельных элементов (пикселей). В пределах элемента изображения происходит осреднение яркости объектов и детали не различаются. Рассматривая сканерный снимок под увеличением, можно обнаружить регулярную пиксельную структуру его изображения, которая отсутствует на фотографических снимках.

Важные характеристики сканера — *угол сканирования* (обзора) и *мгновенный* (соответствующий одному элементу) *угол зрения*, которые определяют соответственно ширину полосы съемки и пространственное разрешение на местности. У *детальных скане-*

**Сканеры.** В процессе сканирования формируются снимки, состоящие из множества отдельных, получаемых последовательно элементов изображения. Сканирование как принцип получения изображения применяется не только при съемке местности, но в камеральных условиях, например при цифровании фотографических снимков.

**Оптико-механический сканер.**

Сканирующее устройство — быстро качающееся зеркало, просматривая местность поперек движения носителя, посылает лучистый поток в объектив (обычно зеркальный) и далее на точечный фотоприемник, который преоб-

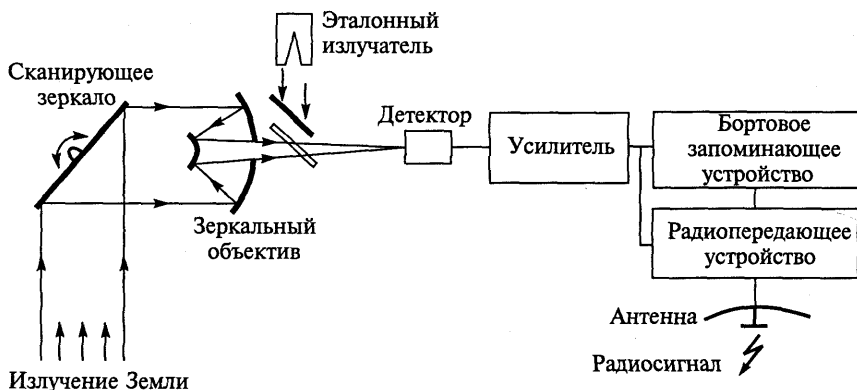


Рис. 2.26. Функциональная схема оптико-механического сканера

ров угол сканирования уменьшают до  $\pm 5^\circ$ , а у обзорных увеличивают до  $\pm 50^\circ$ . Мгновенный угол зрения устанавливают от секунд до нескольких минут. Чем лучше разрешение сканера и значительнее охват съемкой, тем больший объем информации необходимо передать в единицу времени по радиоканалам, которые должны быть высокоскоростными. При разрешении 100 м и охвате 200 км необходимая скорость передачи информации составляет около 1 Мбит/с ( $10^6$  бит). Она быстро растет с увеличением разрешения и, например, при повышении разрешения вдвое составляет уже 5 Мбит/с. Спутниковые радиоканалы, которые должны обеспечить передачу этого информационного потока, нередко определяют качество получаемых снимков. Пропускная способность радиоканала зависит, в частности, от диаметра приемной антенны наземного комплекса. Так, например, если при использовании определенных технологий удастся достичь скорости потока информации до 10 Мбит/с с помощью приемной антенны с диаметром около 2 м, то при 100 Мбит/с ее диаметр необходимо увеличить до 10 м.

Нередко для передачи больших объемов видеoinформации ее приходится предварительно сжимать в 2—3 раза.

**Разновидности сканеров.** С помощью сканирующих систем не только получают снимки, но и измеряют интенсивность излучения, зарегистрированного в пределах каждого пиксела. Поэтому их также называют *сканирующими радиометрами* (фотометрами, видеоспектрометрами). В зависимости от движения сканирующего луча — по плоскости или образующей конуса — сканеры делят на линейные и конические. У *конического* сканера угол визирования и, следовательно, разрешение вдоль строки остаются неизменными, но сама строка сканирования на местности представляет собой дугу окружности. Снимки, полученные коническим сканером, имеют более высокую радиометрическую точность.

В *оптико-электронном* сканере для регистрации излучения используются приборы с зарядовой связью в виде ПЗС-линейки, которая устанавливается поперек направления движения спутника; изображение местности по строке ПЗС-снимка формируется путем одномоментного проектирования, а вдоль полета — последовательным присоединением строк при прямолинейном движении носителя. У оптико-электронного сканера в отличие от оптико-механического отсутствуют подвижные элементы, которые связаны колеблющимся зеркалом. Он более прост в устройстве и надежен в работе.

Конструкция *многозональных* сканеров, предназначенных для одновременного получения снимков в нескольких спектральных зонах, дополняется светофильтрами или диспергирующей системой (призмы, дифракционные решетки и т.д.), расщепляющей регистрируемый лучистый поток на спектральные составляющие,

которые подаются на различные приемники излучения. Число приемников, их тип (спектральная чувствительность) устанавливаются в соответствии с количеством и шириной спектральных зон, в которых работает многозональный сканер.

В *гиперспектральном оптико-электронном* сканере, например, видимое, среднее инфракрасное и тепловое излучения регистрируются детекторами трех прямоугольных ПЗС-матриц; широкие стороны матриц реализуют строки снимка, а узкие, расположенные вдоль направления полета, позволяют вести регистрацию излучения в десятках узких (шириною в несколько нанометров) так называемых гиперспектральных зон. Таким образом в гиперспектральном сканере по одному направлению приемной ПЗС-матрицы регистрируются спектральные характеристики местности, по другому — пространственные. Общее число зональных снимков, получаемых гиперспектральным сканером, может достигать нескольких сотен. В совокупности их представляют в виде так называемого *гиперспектрального куба* (цв. вкл. I, 3).

При тепловой инфракрасной съемке снимки получают с помощью специального сканера (*тепловизора*) с порогом температурной чувствительности  $0,1 - 0,5^\circ\text{C}$ , который обязательно должен иметь систему охлаждения приемника.

Для пассивной съемки в микроволновом диапазоне используются микроволновые *радиометры*, у которых сканирующая поперек движения носителя колеблющаяся антенна размещена в параболическом рефлекторе. Космические микроволновые радиометры позволяют получать радиотепловые снимки пока с невысоким (в несколько километров) пространственным разрешением, которое тем лучше, чем длиннее антенна.

Принцип сканирования может применяться и при активной *лазерной съемке* с самолета, которую можно выполнять днем и ночью. Монохроматический узкий луч лазера подсветки освещает сканируемую местность и после отражения регистрируется приемником. В результате возможно получить монохроматический снимок в видимом или ближнем инфракрасном диапазоне, на котором выделяются объекты с различным отражением в зоне длины волны лазерного излучения.

Все сканеры поставляют строчные снимки, которые по своим геометрическим свойствам уступают кадровым фотографическим снимкам. Однако по сравнению с фотометрическими многозональными фотокамерами сканирующие спектрорадиометры обеспечивают в 2—3 раза более высокую радиометрическую точность. Для получения детальных космических снимков в сканерах устанавливают длиннофокусные (до 10 м) зеркальные объективы, которые по сравнению с линзовыми имеют меньшие габариты, более высокую разрешающую способность, хотя и небольшой ( $10 - 15^\circ$ ) угол поля зрения.

Съемка в узких спектральных зонах, возможность быстрой передачи на Землю радиометрической видеoinформации в цифровой форме, что необходимо для компьютерного дешифрирования — несомненные достоинства съемочных сканерных систем. В настоящее время оптико-электронные сканеры на основе ПЗС-приемников становятся основным видом космической съемочной аппаратуры, вытесняя фотографические камеры.

**Радиолокатор бокового обзора.** Получение радиолокационных снимков основано на двух общих принципах позиционирования — активной локации и боковом обзоре.

При локации, зная скорость распространения зондирующего сигнала (светового, радиоволнового, акустического), определяют расстояние (дальность) до объекта по времени между посылкой и возвращением эхо-сигнала после отражения. Принцип бокового обзора предусматривает наклонное ( $20-60^\circ$ ) направление зондирующих сигналов перпендикулярно прямолинейной траектории движения. Вследствие поступательного перемещения носителя радиолокатор выполняет съемку местности в полосе обзора, параллельной линии полета (рис. 2.27).

На рис. 2.28 приведена упрощенная схема радиолокатора или радиолокационной станции бокового обзора. Установленный на носителе генератор вырабатывает радиолокационные сигналы (импульсы), которые излучаются в виде плоского радиолокационного луча с относительно узкой диаграммой направленности. По-



Рис. 2.27. Двусторонняя съемка местности радиолокатором бокового обзора

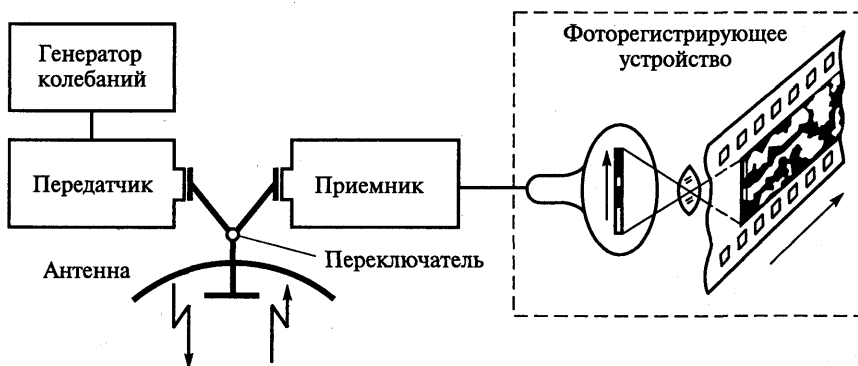


Рис. 2.28. Функциональная схема радиолокатора бокового обзора



ретически разрешение снимков, получаемых таким радиолокатором, не зависит от высоты полета и расстояния до снимаемых объектов. Особенно ценно, что путем управления режимом работы радиолокатора можно изменять его пространственное разрешение в десятки раз.

Радиолокаторы обычно работают на разных волнах: сравнительно длинных — 75 и 22 см (в *P*- и *L*-диапазонах) и коротких — 5,6 и 3 см (в *C*- и *X*-диапазонах). Чем короче длина волны, тем выше пространственное разрешение радиолокационного снимка, но меньше проникающая способность излучения. Кроме того, у некоторых радиолокаторов используются разные типы поляризаций как посылаемого, так и отраженного радиолокационного сигнала. Помимо основных сочетаний горизонтальной (*H*) и вертикальной (*V*) поляризации посылаемого и принимаемого сигнала — *HH*, *HV*, *VV*, *VH*, возможны варианты с промежуточными плоскостями поляризации.

Принципы локации и бокового обзора применяются не только при радиолокационной съемке земной поверхности, но и, например, при съемке морского дна с помощью гидролокаторов бокового обзора, использующих не радиоволны, а звуковые волны.

### 2.3.2. Носители съемочной аппаратуры

Для выполнения съемки съемочная аппаратура устанавливается на носитель, который поднимает ее на нужную высоту, перемещает относительно земной поверхности и обеспечивает определенное ориентирование в пространстве. Носители съемочной аппаратуры можно разделить на две основные группы: авиационные и космические.

**Авиационные носители.** Для аэросъемки используют серийные самолеты, которые специально приспособливают для установки съемочной аппаратуры. Помимо летного экипажа (пилоты, радисты и др.) на борту аэросъемочного самолета находятся штурман-аэросъемщик и бортоператор, непосредственно работающий с аппаратурой. Для аэросъемок в географических экспедициях используют легкие самолеты и вертолеты. Большими возможностями обладают комплексные летающие лаборатории, создаваемые на базе самолетов с различными летно-техническими характеристиками — *TU-134*, *ИЛ-18*, *АН-12* и др., которые обычно оснащаются всеми видами съемочной аппаратуры: аэрофотоаппаратами, сканерами, радиолокаторами.

Первый отечественный специально сконструированный самолет-лаборатория *АН-30* имеет в носовой части кабину с хорошим обзором для работы штурмана-аэросъемщика. В ней установлены оптические визиры для прокладки съемочных маршрутов и другие вспомогательные приборы.

**Космические носители.** В начале XXI в. на околоземных орбитах одновременно работали несколько десятков космических аппаратов, выполнявших съемку Земли.

**Искусственные спутники Земли** — метеорологические, океанологические, природно-ресурсные, картографические, разведывательные и др. — наиболее распространенные носители электронной, а до недавнего времени и фотографической съемочной аппаратуры. В конструктивном развитии беспилотных космических съемщиков отмечается тенденция к их миниатюризации. Если масса первых таких спутников характеризовалась тоннами, то сейчас ее стремятся уменьшить до первых сотен и даже десятков килограммов.

Спутник, свободно летящий в космическом пространстве, хотя и медленно, но произвольно вращается. Для съемки необходимо определенным образом ориентировать и стабилизировать спутник. Для этого используется так называемая *орбитальная ориентация*, при которой одна ось спутника, совпадающая с оптической осью съемочной системы, направлена вниз по местной вертикали, другая — по заданному курсу. Погрешность угловой ориентации спутников-съемщиков обычно не превосходит десятых долей градуса. У некоторых спутников предусмотрена возможность изменения угла крена для стереосъемки участков в стороне от трассы или тангажа — для съемки «вперед — назад» по трассе полета. Информацию о необходимой коррекции положения спутника для его ориентации получают от специальных приборов, например от звездных датчиков, которые выдают команду исполнительным устройствам ориентации. Чем лучше ориентация спутника, тем точнее географическая привязка и другая обработка полученных снимков по орбитальным данным.

**Пилотируемые космические корабли и орбитальные станции.** После первого фотографирования из космоса, которое выполнил в 1961 г. летчик-космонавт СССР Г. С. Титов с борта корабля *Восток-2*, в пилотируемых космических полетах выполнялось фотографирование земной поверхности, что было особенно важно в начальный период освоения космоса. В 1976 г. стартовал первый пилотируемый космический корабль-съемщик, на борту которого работали летчики-космонавты В. В. Аксенов и Б. Ф. Быковский. Космический корабль *Союз-22* имел специальный фотоотсек, в котором размещалась многозональная фотокамера МКФ-6 (рис. 2.30). Полученные в недельном экспериментальном полете высококачественные снимки масштаба 1 : 2 000 000 послужили основой для разработки методов использования многозональной видеоинформации в геолого-географических исследованиях.

Участие в съемках космонавтов и астронавтов позволяет работать в реальных условиях полета перспективную съемочную аппаратуру, которая затем используется на беспилотных искусст-



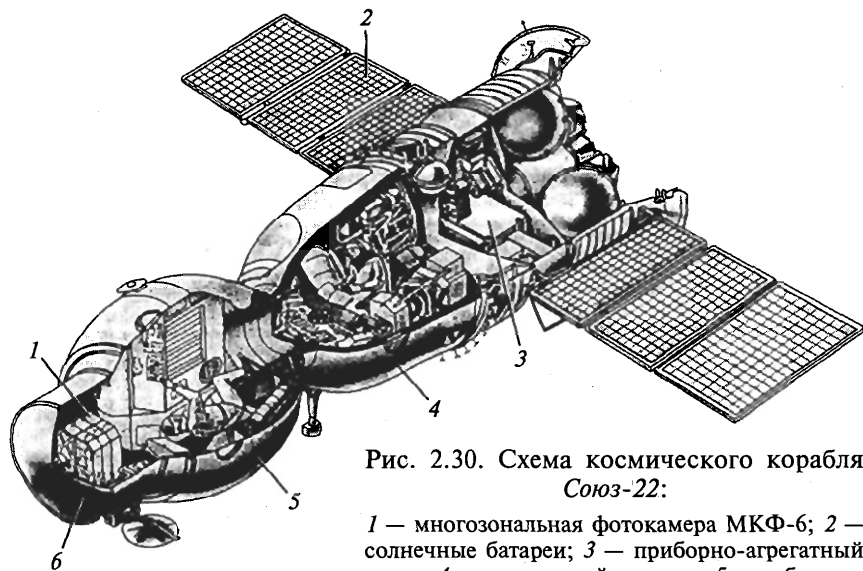


Рис. 2.30. Схема космического корабля *Союз-22*:

1 — многозональная фотокамера МКФ-6; 2 — солнечные батареи; 3 — приборно-агрегатный отсек; 4 — спускаемый аппарат; 5 — орбитальный отсек; 6 — фотоотсек

венных спутниках. Большие возможности для экспериментальных съемок и *инструментально-визуальных наблюдений* земной поверхности предоставляют орбитальные станции, имеющие для этого несколько люков. Наличие экипажа на борту обеспечивает реализацию многоплановых, гибко меняемых программ съемок, предусматривающих, в частности, замену аппаратуры новой, доставляемой грузовыми кораблями. Программы, предусматривающие съемку Земли, выполняются на Международной космической станции с начала ее функционирования (рис. 2.31).

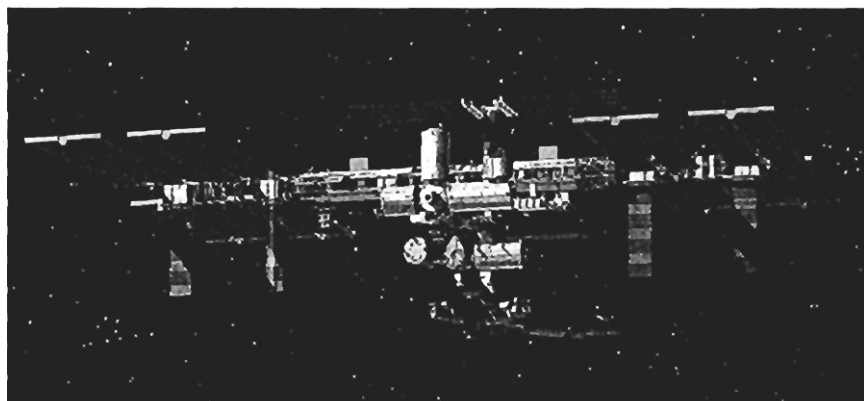


Рис. 2.31. Международная космическая станция

## 2.4. Аэрокосмические съемки

Аэрокосмические съемки принято делить на ряд классов и видов в зависимости от назначения, используемых носителей, съемочной аппаратуры, технологии выполнения съемки, формы представления результатов.

### 2.4.1. Аэросъемка

Существуют несколько разновидностей съемок с самолета: аэрофотографическая, тепловая инфракрасная, радиолокационная и др. Кроме того, традиционные аэрометоды включают ряд так называемых геофизических съемок — аэромагнитную, аэрорадиометрическую, аэроспектрометрическую, в результате выполнения которых получают не снимки, а цифровую информацию об исследуемых объектах.

Из всех съемок наиболее распространенной является аэрофотографическая съемка. В зависимости от направления оптической оси аэрофотоаппарата различают плановую и перспективную аэрофотосъемку.

При **плановой (вертикальной) аэрофотосъемке** оптическую ось аэрофотоаппарата приводят в отвесное положение, при котором снимок горизонтален. Однако в процессе полета по прямолинейному маршруту аэросъемочный самолет периодически испытывает отклонения, которые характеризуют углами тангажа, крена и сноса (рыскания). Из-за колебаний самолета аэрофотоаппарат также наклоняется и разворачивается. Принято к плановым относить снимки, имеющие угол наклона не более  $3^\circ$ .

При **перспективной аэрофотосъемке** оптическую ось аэрофотоаппарата устанавливают под определенным углом к вертикали. По сравнению с плановым перспективный снимок захватывает большую площадь, а изображение получается в более привычном для человека ракурсе.

По характеру покрытия местности снимками аэрофотосъемку делят на одномаршрутную и многомаршрутную.

**Одномаршрутная аэрофотосъемка** применяется при исследованиях речных долин, прибрежной полосы, при дорожных изысканиях и т. д. Выборочную маршрутную аэрофотосъемку характерных объектов географ может выполнять самостоятельно, сочетая ее с аэровизуальными наблюдениями. Для этих целей удобно использовать ручной аэрофотоаппарат или цифровую фотокамеру.

Наибольшее производственное применение, прежде всего для топографических съемок, получила **многомаршрутная (площадная) аэрофотосъемка**, при которой снимаемый участок сплошь покрывается серией параллельных прямолинейных аэросъемочных маршрутов, прокладываемых обычно с запада на восток. В маршруте

на каждом следующем снимке получается часть местности, изображенной на предыдущем снимке. Аэрофотоснимки, получаемые с *продольным* перекрытием, образуют *стереоскопические пары*. Продольное перекрытие, выражаемое в процентах, устанавливается в зависимости от назначения аэрофотосъемки различным — от 10 до 80 % при среднем значении 60 %. Аэрофотосъемочные маршруты прокладывают так, чтобы снимки соседних маршрутов имели *поперечное* перекрытие. Обычно поперечное перекрытие составляет 30 %. Перекрытие снимков позволяет объединить разрозненные аэроснимки в единый массив, целостно отображающий заснятую территорию.

Время для съемки выбирают так, чтобы снимки содержали максимум информации о местности. Учитывают наличие снежного покрова, смену фаз развития растительности, состояние сельскохозяйственных угодий, режим водных объектов, влажность грунтов и т.д. Обычно аэрофотосъемку выполняют в летние безоблачные дни, в околополуденное время, но в некоторых случаях, например для изучения почв, лесов, предпочтение отдают поздневесенним или раннеосенним съемкам. Съемка плоско-равнинной местности при низком положении Солнца в утренние или вечерние часы позволяет получить наиболее выразительные аэроснимки, на которых микрорельеф подчеркивается прозрачными тенями. Однако освещенность земной поверхности должна быть достаточной для аэрофотографических съемок с короткими экспонирующими выдержками. Поэтому съемку при высоте Солнца менее 20° обычно не производят. По завершении летно-съёмочных работ оценивается качество полученных материалов: определяется фотографическое качество аэронегативов (величина коэффициента контрастности, максимальная плотность, плотность вуали), проверяется прямолинейность съёмочных маршрутов, контролируется продольное и поперечное перекрытие и др.

#### 2.4.2. Космическая съемка

Космическая съемка, т.е. съемка с высоты более 150 км, выполняется со спутника, который в соответствии с законами небесной механики перемещается по строго установленной орбите. Поэтому возможности его маневрирования по сравнению с самолетом весьма ограничены. Любой спутник-съёмщик всегда должен рассматриваться с учетом параметров его орбиты.

**Орбиты спутников.** С точки зрения космических съемок земной поверхности важны следующие параметры орбит: форма, наклонение, высота, положение ее плоскости по отношению к Солнцу.

**Форма орбиты** определяет постоянство высоты съемки на разных участках орбиты. Предпочтительны круговые орбиты, у кото-

рых высоты перигея и апогея одинаковы и, следовательно, одинакова высота съемки земной поверхности, а для одной и той же аппаратуры — одинаковы охват, масштаб и разрешение снимков.

**Наклонение** определяется углом  $i$  между плоскостью орбиты и плоскостью экватора. По наклонению разделяют орбиты *экваториальные* ( $i \approx 0^\circ$ ), *полярные* ( $i \approx 90^\circ$ ) и *наклонные*. В число наклонных орбит входят *прямые* ( $0 < i < 90^\circ$ ) и *обратные* ( $90^\circ < i < 180^\circ$ ). Наклонение орбиты определяет широтный сферический пояс, охватываемый съемкой (рис. 2.32). Крупногабаритные тяжелые пилотируемые корабли и орбитальные станции функционируют на прямых орбитах (обычно с наклонением  $30$  и  $52^\circ$ ), сравнительно небольшие метеорологические и ресурсные спутники запускают на полярные орбиты.

**Высота орбиты.** Спутники работают на различных высотах. При низких орбитах существенно сказывается сопротивление атмосферы, при высоте менее  $100$  км прогрессивно возрастающее торможение столь велико, что спутник не может совершить даже одного витка и, сгорая, падает вниз. По мере увеличения высоты увеличивается время активного существования спутников, охват съемкой, но при этом обычно уменьшается разрешение снимков. Выделяют три группы наиболее часто используемых для съемки Земли орбит — с высотами  $150—500$ ,  $500—2000$  и  $36\,000$  км. Первая группа включает орбиты пилотируемых кораблей, орбитальных станций, а также спутников фотосъемки с относительно коротким временем функционирования. Во вторую группу входят орбиты ресурсных и метеорологических спутников с электронной аппаратурой. Для первых характерны высоты около  $600$  и  $900$  км, для вторых —  $900—1400$  км. Третья группа — это орбиты геостационарных спутников; угловая скорость движения спутника на высоте  $36\,000$  км равна угловой скорости вращения Земли, и поэтому спутник движется синхронно с подспутниковой точкой земной поверхности. Геостационарный спутник на экваториальной орбите, как бы зависая над определенным районом Земли, обеспечивает его постоянное наблюдение.

От **периода обращения** — времени оборота спутника вокруг Земли — зависит число витков в сутки и соответственно межвитковое расстояние. Для околоземной круговой орбиты период обращения спутника  $T_{об}$  (мин) зависит от ее высоты  $H$  (км) и численно равен

$$T_{об} = 84,4 + \frac{H}{50}.$$

Число витков, опоясывающих Землю, за сутки составит

$$N = \frac{24 \cdot 60}{T_{об}},$$

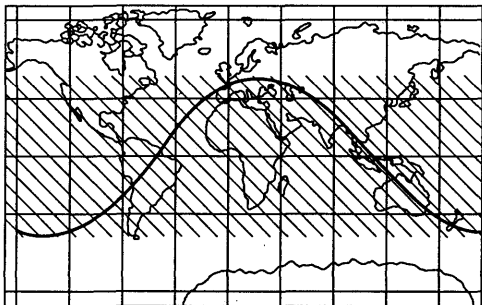
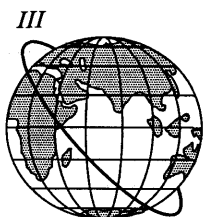
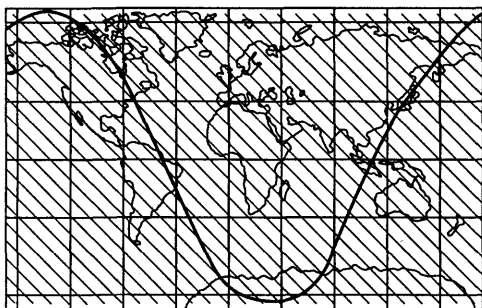
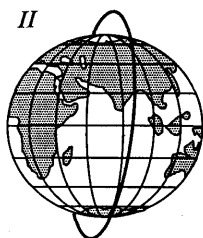
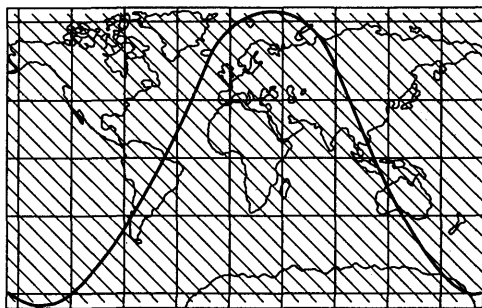
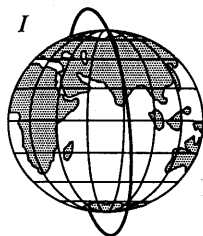


Рис. 2.32. Широтные пояса охвата съемкой при разном наклонении:  
*I* — прямая субполярная орбита (метеорологические спутники); *II* — обратная субполярная орбита (ресурсные спутники); *III* — прямая наклонная орбита (космические пилотируемые корабли, орбитальные станции)

а угловое межвитковое расстояние будет

$$N^\circ = \frac{360^\circ}{N}$$

Например, спутник на высоте 280 км совершает вокруг Земли один оборот за 90 мин и делает 16 витков за сутки при межвитковом расстоянии  $22^\circ 5'$ , что на экваторе соответствует 2500 км.

**Солнечно-синхронные орбиты** — орбиты, при съемке с которых солнечная освещенность земной поверхности (высота Солнца) остается практически неизменной достаточно продолжительное время (почти в течение сезона). Это достигается следующим путем. Поскольку плоскость любой орбиты под влиянием несферичности Земли немного разворачивается (прецессирует), то оказывается возможным, подбирая определенное соотношение наклона и высоты орбиты, добиться, чтобы величина прецессии была равной суточному повороту Земли вокруг Солнца, т. е. около  $1^\circ$  в сутки. Среди околоземных орбит удается создать лишь несколько солнечно-синхронных, наклонение которых всегда обратное. Например, при высоте орбиты 1000 км наклонение должно быть  $99^\circ$ .

**Орбитальные съемки поверхности Земли.** По сравнению с самолетом спутник движется значительно быстрее, что требует коротких выдержек при съемке. Однако летящий спутник не испытывает вибраций и резких колебаний, поэтому космические снимки удается получать с более высокой разрешающей способностью, чем аэроснимки.

При планировании космической съемки в соответствии с ее назначением выбирают оптимальную высоту полета спутника, наклонение орбиты и время старта. Существенное значение имеет и географическое положение космодрома, с которого производится запуск спутника. В настоящее время космодромами располагают многие страны (табл. 2.3).

Таблица 2.3

**Основные космодромы, используемые для запусков спутников-съемщиков**

Космодром	Страна	Географические координаты	
		широта	долгота
Байконур (Тюратам)	Казахстан	$46^\circ$ с. ш.	$63^\circ$ в. д.
Плесецк	Россия	$63^\circ$ с. ш.	$41^\circ$ в. д.
Свободный	Россия	$52^\circ$ с. ш.	$128^\circ$ в. д.
Канаверал	США	$28^\circ$ с. ш.	$81^\circ$ з. д.
Ванденберг	США	$35^\circ$ с. ш.	$121^\circ$ з. д.
Куру	Французская Гвиана	$5^\circ$ с. ш.	$53^\circ$ з. д.
Шрихарикота	Индия	$14^\circ$ с. ш.	$80^\circ$ в. д.
Танегасима	Япония	$30^\circ$ с. ш.	$131^\circ$ в. д.
Цзюцюань (Шуанченцзы)	Китай	$41^\circ$ с. ш.	$101^\circ$ в. д.

По характеру покрытия земной поверхности космическими снимками можно выделить одиночное фотографирование, маршрутную, прицельную и глобальную съемку.

**Одиночное (выборочное) фотографирование** выполняется космонавтами ручными камерами (рис. 2.33). Снимки обычно получаются перспективными со значительными углами наклона.

**Маршрутная съемка** земной поверхности производится вдоль трассы полета спутника. Ширина полосы съемки  $\Theta$  зависит от высоты полета  $H$  и угла обзора  $2\beta$  съемочной системы:

$$\Theta = 2H \operatorname{tg} \beta.$$

Для узкоугольных съемочных систем высокого разрешения ( $2\beta = 10^\circ$ ) ширина полосы съемки составляет  $0,2H$ , а для широкоугольных, обзорных ( $2\beta = 100^\circ$ ) —  $2,5H$ . Для увеличения полосы обзора практикуют «веерную» съемку — поперек направления полета двумя или даже тремя съемочными системами высокого разрешения.

**Прицельная (выборочная) съемка** предназначена для получения снимков специально заданных участков земной поверхности в стороне от трассы. Для этого направление съемки отклоняется от надира на расчетный угол. Программно-прицельная съемка — ос-

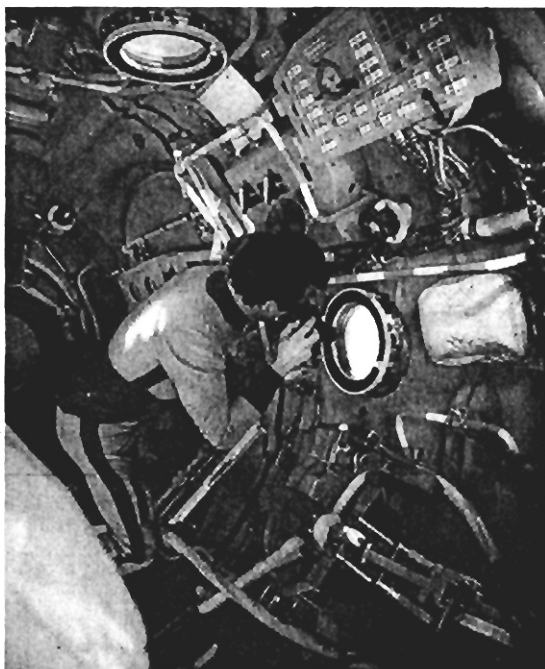


Рис. 2.33. Космонавт фотографирует Землю

новой вид космической съемки для получения снимков сверх-высокого разрешения.

**Глобальную съемку** производят с геостационарных и полярно-орбитальных спутников.

Четыре-пять геостационарных спутников на экваториальной орбите обеспечивают практически непрерывное получение мелкомасштабных обзорных снимков всей Земли (космическое патрулирование) за исключением полярных шапок.

Более детальная глобальная съемка производится с полярно-орбитальных спутников. Если такой спутник запустить на так называемую периодическую (геосинхронную) орбиту, при которой спутник совершает за сутки целое число витков, то каждый день он будет пролетать над одними и теми же точками трассы земной поверхности. Для околоземных орбит межвитковое расстояние на экваторе, как уже отмечалось, составляет 2—3 тыс. км. Следовательно, при съемке с периодических орбит системами высокого разрешения и соответственно малого охвата значительная площадь между витками не будет покрыта снимками, исключая околополярные участки пересечения трасс. Для съемки без поперечного разрыва орбита спутника должна обеспечить так называемое *суточное смещение трассы*, для реализации которого период обращения рассчитывается таким образом, чтобы спутник совершал за сутки не совсем точное целое число оборотов. Тогда пересечение экватора спутником через сутки будет происходить с небольшим опозданием или опережением; за это время Земля поворачивается

на некоторый угол, обеспечивающий определенное смещение трассы. Эта орбита называется *квазипериодической* (квазигеосинхронной). Величина суточного смещения трассы устанавливается такой, чтобы при принятом угле обзора съемочной системы маршрутные полосы съемки (которые могут быть непоследовательными) примыкали друг к другу или даже перекрывались. На экваторе перекрытие между маршрутами будет минимальным, а к полюсам Земли оно увеличивается.

Таким образом, орбита околоземного спутника, предназначенного для многократной глобальной съемки высокого разрешения, должна быть круговой

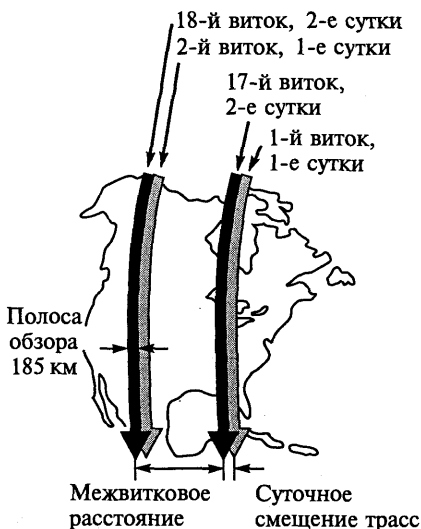


Рис. 2.34. Полосы съемки со спутника *Landsat*



полярной квазипериодической и солнечно-синхронной. Например, на такой орбите — с наклоном  $98^\circ$  и высотой 705 км, периодом обращения 99 минут, межвитковым расстоянием 2760 км и перекрытием 8 % между маршрутами на экваторе — работали в течение многих лет спутники американской ресурсной системы *Landsat-4, 5, 7*. Для съемки всей поверхности Земли спутнику требовалось совершить 233 оборота; через 16 дней он начинал повторную съемку (рис. 2.34).

**Разновидности космических съемок.** Для выполнения съемок запускаются различные по назначению спутники с разнообразными съемочными системами. Из систем, предназначенных для съемок из космоса, наиболее перспективными признаются оптико-электронные многозональные стереосканеры и радиолокаторы с синтезированной длиной антенны.

По технологии съемки и с учетом используемого спектрального диапазона различают *фотографическую* (черно-белую, цветную, спектрозональную) и *сканерную* (оптико-механического и оптико-электронного сканирования) съемки в видимом и ближнем инфракрасном диапазоне, *тепловую инфракрасную* съемку, *микроволновую радиометрическую* и *радиолокационную* съемки. При наиболее распространенных *пассивных* съемках регистрируется естественное отраженное солнечное или собственное излучение Земли, а при *активных* — отраженное земной поверхностью искусственное излучение, посланное с носителя.

В современном аэрокосмическом зондировании многозональный принцип стал основным. *Многозональная* съемка обычно выполняется одновременно в 3—7 узких спектральных зонах видимого и инфракрасного диапазона и иногда сочетается со съемкой в панхроматической зоне для получения снимков наиболее высокого пространственного разрешения. Сканеры с ПЗС-матрицами позволяют увеличить число спектральных зон до нескольких сотен (*гиперспектральная* съемка). При радиолокационной съемке многозональный принцип реализуется использованием нескольких длин радиоволн (частот) СВЧ-диапазона (*многочастотная* съемка) и разной поляризации зондирующего излучения (*поляризационная* съемка).

Детальные стереоскопические снимки, получаемые с космических высот длиннофокусными оптико-электронными сканерами, оказались пригодными для метрической характеристики рельефа земной поверхности, представляемой в виде изолинейных карт или цифровых моделей рельефа. Выполняемая для этого *стереоскопическая* съемка имеет несколько вариантов: *одновитковая (однопроходная)* съемка, когда перекрывающиеся стереопары снимков получают при разных направлениях оптической оси (*конвергентная* съемка «вперед — назад»); *двухвитковая* стереосъемка с поперечным перекрытием снимков с соседних витков при отклоне-

нии оптической оси в сторону. К конвергентной съемке относится и так называемая *многоракурсная (веерная)* съемка, при которой многоугловой сканер ведет съемку вдоль маршрута «вперед — назад», получая одновременно несколько перспективных снимков с различными углами наклона. Так, на спутнике *Terra* установлен 9-угловой сканер MISR. Различие яркостей изображения на разных ракурсных снимках обусловлено анизотропией индикатрис отражения аэрозоля атмосферы, а также некоторых земных объектов.

Для удовлетворения потребностей в снимках разного охвата и разрешения на спутниках устанавливают *несколько съемочных систем* (две, три), которые одновременно выполняют съемку, различающуюся по этим параметрам в 3—5 раз и более. Например, на спутнике *Ресурс-О* работал сканер МСУ-СК для обзорной съемки с разрешением 170 м и сканер МСУ-Э с разрешением 45 м.

### 2.4.3. Наземная стереофотограмметрическая съемка и другие виды съемок

Географы для работы обычно пользуются снимками, ранее полученными с самолета или с космического аппарата. Но при экспедиционных исследованиях им нередко приходится выполнять самостоятельно наземные съемки или участвовать в них.

**Наземная стереофотограмметрическая (фототеодолитная)** съемка применяется для изучения современных процессов рельефообразования и при крупномасштабном картографировании в высокогорных районах. Стереосъемка выполняется *фототеодолитом*, который представляет собою измерительную фотокамеру, оснащенную очень хорошим объективом (рис. 2.35). Для съемки используют малочувствительные, но зато мелкозернистые фотопластинки размером 13×18 см. Фототеодолитные снимки отличаются высоким фотографическим качеством, проработкой мельчайших деталей.

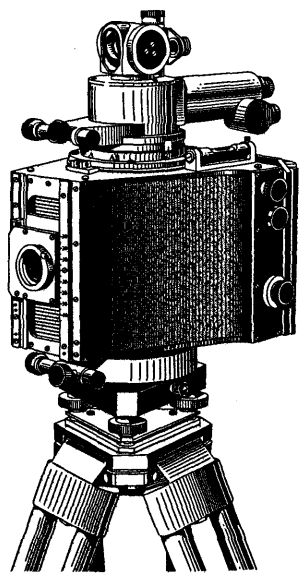


Рис. 2.35. Фототеодолит

При фототеодолитной съемке местности, например осыпного участка горной долины, на противоположном склоне выбирают две точки съемки, называемые *фотостанцией* (базисом). Длину съемочного базиса специально рассчитывают. Обычно она в 10—20 раз меньше, чем расстояние до самой дальней точки участка съемки. На обеих точках базиса устанавливают геодезические штативы, а затем фототеодолит поочередно на каждой

точке. Для простоты обработки стереопар фототеодолит на точках базиса при съемке ориентируют так, чтобы оптические оси были строго параллельны. Если участок съемки велик, то получают несколько стереопар, фотографируя его с различных съемочных базисов. Полевые работы при фототеодолитной съемке включают не только фотографирование и проявление негативов, но и геодезические измерения с помощью спутниковых GPS-приемников и лазерных дальномеров для определения длин съемочных базисов и координат точек фотостанций.

**Специальные съемки.** При изучении динамичных объектов и явлений, например снежных лавин, обвалов, волнения водной поверхности и т.д., производят *синхронную* стереосъемку двумя камерами или фотокамерой с двумя объективами (рис. 2.36).

При изучении ограниченных участков морского дна выполняется *подводная* стереосъемка. Для этого малогабаритная спаренная стереокамера помещается в защитный бокс, снабженный осветителями, и спускается на тросе в глубину.

**Стереоскопическое фотографирование.** Географ в экспедициях всегда пользуется фотоаппаратом. Для фиксации пространственного облика изучаемой местности или отдельных объектов рекомендуется получать не одну, а две перекрывающиеся фотографии, т.е. выполнять стереоскопическое фотографирование, что можно с успехом сделать обычным или цифровым фотоаппаратом (рис. 2.37). Для этого фотографируют один и тот же объект дважды с двух точек. Основная задача — правильно установить расстояние между точками, с которых производят фотографирование. Оптимальную длину съемочного базиса можно рассчитать по формуле

$$B = \frac{Y(Y + \Delta Y)}{\Delta Y f} \Delta p_{\max},$$

где  $Y$  — расстояние до объекта;  $\Delta Y$  — протяженность объекта по глубине;  $f$  —

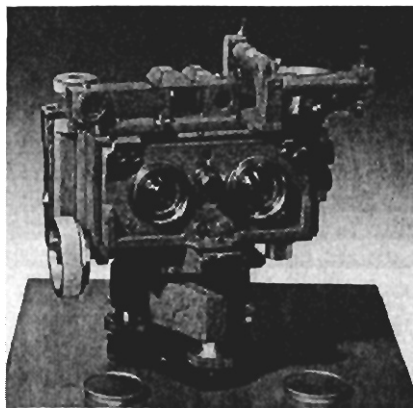


Рис. 2.36. Стерефотограмметрическая камера И.Г. Индиченко для съемки с близких расстояний



Рис. 2.37. Цифровой фотоаппарат со светочувствительной ПЗС-матрицей, включающей 5 250 000 пикселей, для получения цветных снимков

фокусное расстояние камеры;  $\Delta p_{\max} = \frac{7}{v}$  — максимальное значение разности продольных параллаксов, допускающее стереоскопическое наблюдение фотографических снимков с увеличением  $v$ . Естественно, расчеты производят заранее, а в полевых условиях пользуются составленной таблицей или номограммой.

Полученные стереоскопические фотографии можно рассматривать под стереоскопом, на экране компьютера, пользуясь стереочками, а после небольшой тренировки — невооруженными глазами.

## 2.5. Типы аэрокосмических снимков и их классификация

В результате выполнения аэрокосмических съемок накоплен многомиллионный фонд снимков, в котором насчитывается более 100 их разновидностей. Для того чтобы специалисты-географы могли эффективно использовать материалы аэрокосмических съемок, они систематизированы, сгруппированы в типы снимков, различающихся по возможностям их применения в географических исследованиях. Приводимые ниже классификации охватывают в основном космические снимки, как наиболее значимые для географических исследований.

### 2.5.1. Классификация космических снимков

При работе со снимками для географов в первую очередь важны спектральный диапазон съемки, который определяет биогеофизические характеристики объектов, передаваемые снимками, и технология получения изображения, от которой зависят изобразительные, радиометрические и геометрические свойства снимков. Эти две характеристики представляют основу классификации космических снимков, учитывающей возможности их географического дешифрирования (рис. 2.38).

**Спектральный диапазон съемки** определяет первый, фундаментальный, уровень этой классификации, учитывающий отражательные и излучательные характеристики объектов, воспроизводимые на снимках. По этому признаку выделяются три основные группы снимков:

а) в *видимом, ближнем и среднем инфракрасном* диапазоне, который называют также *световым*;

б) в *тепловом инфракрасном* диапазоне;

в) в *радиодиапазоне*.

По **технологии получения** снимки в световом диапазоне делятся на фотографические и сканерные, которые, в свою очередь,

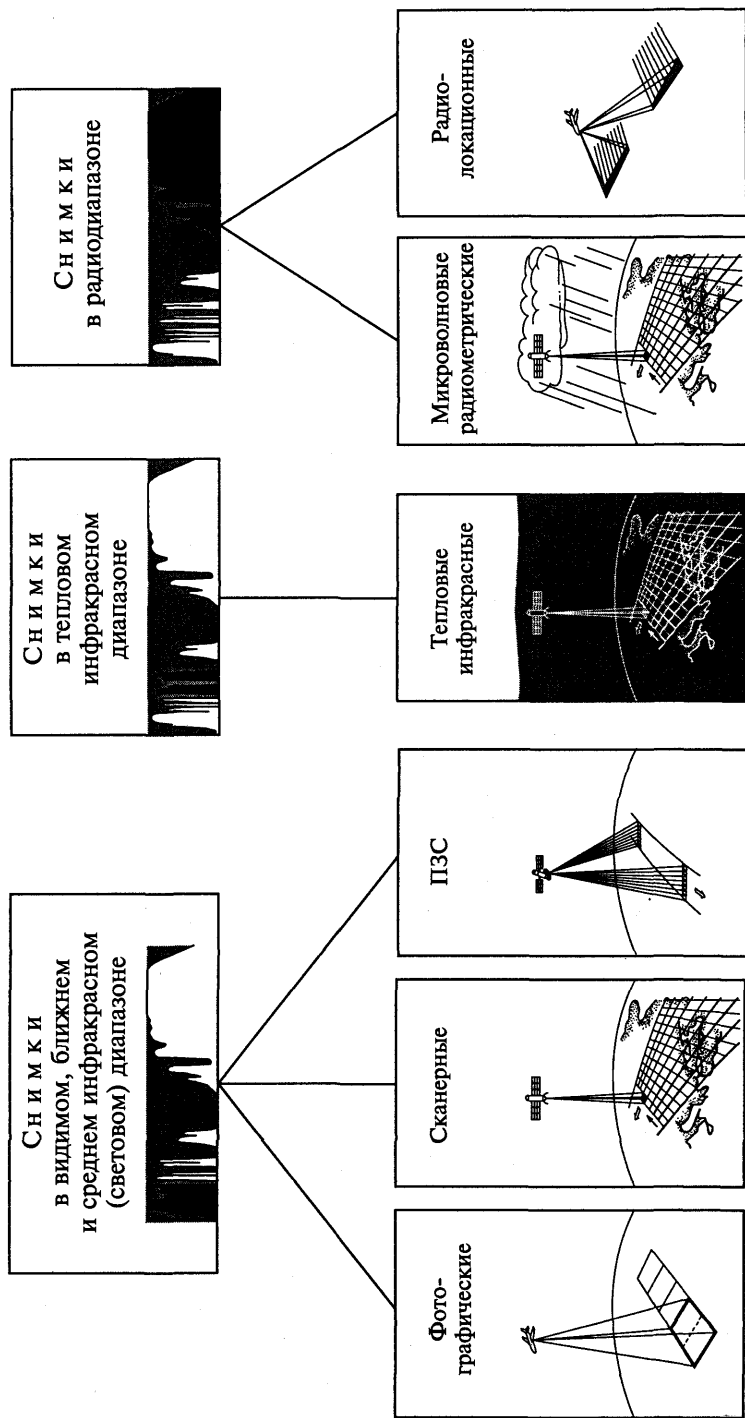


Рис. 2.38. Классификация космических снимков по спектральным диапазонам и технологии съемки

подразделяются на полученные оптико-механическим и оптико-электронным сканированием с использованием линейных ПЗС-приемников излучения. Для краткости первые из них названы сканерными, а вторые — ПЗС-снимками. Таким образом, в световом диапазоне выделены три типа снимков: *фотографические, сканерные и ПЗС-снимки*.

Поскольку снимки в тепловом инфракрасном диапазоне в настоящее время получают в основном по единой технологии, то они представлены одним типом — это *тепловые инфракрасные снимки*.

Снимки в радиодиапазоне делятся в зависимости от выполнения пассивной или активной съемки на *микроволновые радиометрические* снимки, получаемые при регистрации собственного излучения исследуемых объектов, и *радиолокационные* снимки, получаемые при регистрации отраженного радиоизлучения, посылаемого с носителя.

Названия типов снимков условны. Так, сканирование используется для получения разных типов снимков, а название *сканерные* отнесено лишь к снимкам, получаемым оптико-механическими сканерами в видимом и ближнем инфракрасном диапазоне.

Радиометрическими являются также несколько выделенных типов, а название отнесено лишь к микроволновым, чтобы подчеркнуть их отличие от получаемых при активном методе радиолокационных снимков.

Каждый из выделенных типов снимков далее может быть подразделен с учетом показателей, определяющих их дешифровочные возможности, — *обзорности, масштаба и пространственного разрешения* (территориального охвата), которые зависят от конкретных параметров съемки: высоты орбиты, характеристик съемочной аппаратуры и др.

Классификации космических снимков по этим трем показателям, важнейшим для дешифрирования, в целом образуют единую систему:

По обзорности	По масштабу
Глобальные (планета) $\bar{S} = n 10^8 \text{ км}^2$ ; $\Theta = 10\ 000 \text{ км}$	Сверхмелкомасштабные 1 : 10 000 000 — 1 : 100 000 000
Крупнорегиональные $\bar{S} = n 10^6 \text{ км}^2$ ; $\Theta = 500 — 3000 \text{ км}$	Мелкомасштабные 1 : 1 000 000 — 1 : 10 000 000
Региональные $\bar{S} = n 10^4 \text{ км}^2$ ; $\Theta = 50 — 500 \text{ км}$	Среднемасштабные 1 : 100 000 — 1 : 1 000 000
Локальные $\bar{S} = n 10^2 \text{ км}^2$ ; $\Theta = 10 — 50 \text{ км}$	Крупномасштабные 1 : 10 000 — 1 : 100 000

## По пространственному разрешению

Снимки низкого разрешения

$$L_R = n 1000 \text{ м}$$

Снимки среднего разрешения

$$L_R = n 100 \text{ м}$$

Снимки высокого разрешения  $L_R = n 10 \text{ м}$ :

а)  $L_R = 30—100 \text{ м}$  — относительно высокого

б)  $L_R = 10—30 \text{ м}$  — высокого

Снимки очень высокого разрешения

$$L_R = n 1 \text{ м}$$

Снимки сверхвысокого разрешения

$$L_R \leq 1 \text{ м}$$

$\bar{S}$  — площадь охвата снимка;  $\Theta$  — ширина полосы охвата;  $L_R$  — разрешение на местности;  $n = 1 \div 9$ .

По *обзорности* (охвату территории одним снимком) снимки разделяют следующим образом:

1. *Глобальные*, охватывающие всю планету, точнее освещенную часть одного полушария — это снимки Земли с геостационарных спутников и межпланетных космических аппаратов. Ширина зоны охвата у них более 10 тыс. км, а территориальный охват составляет сотни миллионов квадратных километров.

2. *Крупнорегиональные*, отображающие материки, их части и крупные регионы, — снимки с метеорологических спутников на околоземных орбитах, а также снимки малого и среднего разрешения с ресурсных спутников. Ширина зоны охвата варьирует от 3 тыс. км у снимков малого разрешения до 500 км у снимков среднего разрешения, территориальный охват составляет миллионы квадратных километров. На одном снимке этого типа изобразится Западная Европа, почти вся Австралия, Средняя Азия, Тибет.

3. *Региональные*, на которых изображаются регионы и их части, — это снимки с ресурсных и картографических спутников, а также с пилотируемых кораблей и орбитальных станций. Наиболее характерный охват  $350 \times 350 \text{ км}^2$ ,  $180 \times 180 \text{ км}^2$ ,  $60 \times 60 \text{ км}^2$ . На снимке подобного охвата изобразится такое государство, как Бельгия, небольшая область, например Московская, крупные мегаполисы.

4. *Локальные*, на которых изображаются относительно небольшие участки местности, — снимки со спутников для детального наблюдения и крупномасштабного топографического картографирования с охватом порядка  $10 \times 10 \text{ км}^2$ . На таком снимке изобразится промышленный комплекс, крупное хозяйство, небольшой город, а для Москвы потребуются несколько снимков.

Охват аэроснимков составляет от сотен квадратных метров до  $20 \times 20 \text{ км}^2$ ; обычно он существенно меньше, чем у космических снимков, но мелкомасштабные аэроснимки по охвату перекрываются с детальными космическими.

По *масштабу* космические снимки делят на следующие группы:

1) *сверхмелкомасштабные* — 1 : 10 000 000 — 1 : 100 000 000. Такие снимки получают с геостационарных спутников и с метеоспутников на околоземных орбитах;

2) *мелкомасштабные* — 1 : 1 000 000 — 1 : 10 000 000. Такие масштабы типичны для снимков с ресурсных спутников, а также с пилотируемых кораблей и орбитальных станций;

3) *среднемасштабные* — 1 : 100 000 — 1 : 1 000 000. Снимки таких масштабов получают с ресурсно-картографических спутников;

4) *крупномасштабные* — 1 : 10 000 — 1 : 100 000. Это снимки со спутников для детального наблюдения и крупномасштабного топографического картографирования, в том числе спутников двойного назначения: военного и гражданского. К данной группе относятся и аэроснимки, которые, в свою очередь, дифференцируются по масштабам.

По *пространственному разрешению* (размеру на местности минимального изображающегося элемента  $L_R$ ) снимки разделяют так:

1. Снимки *низкого* разрешения (измеряется километрами,  $L_R \geq 1000$  м). Такое разрешение характерно для сканерных и тепловых инфракрасных снимков с метеоспутников, включая геостационарные, и для снимков, получаемых сканерами малого разрешения с ресурсных спутников, где основные изображающиеся объекты — облачность, тепловая структура вод океана, крупнейшие геологические структуры суши.

2. Снимки *среднего* разрешения (сотни метров,  $L_R = 100 - 1000$  м), на которых отображаются многие природные объекты, но в большинстве случаев не воспроизводятся объекты, связанные с хозяйственной деятельностью. Это снимки, получаемые сканерами среднего разрешения, и тепловые инфракрасные снимки с ресурсных спутников.

3. Снимки *высокого* разрешения (десятки метров,  $L_R = 10 - 100$  м), на которых изображаются не только природные, но и многие хозяйственные объекты. Высокое разрешение характерно для наиболее широко используемых сканерных снимков с ресурсных спутников и фотографических снимков с пилотируемых кораблей, орбитальных станций, автоматических картографических спутников. Поскольку размерность большинства изучаемых географических объектов находится как раз в этих пределах, снимками этой группы удовлетворяется большинство географических задач. Но для решения этих задач они неравноценны. Поэтому эта группа подразделяется на две подгруппы:

а) снимки *относительно высокого* разрешения (30 — 100 м), получаемые главным образом сканирующей аппаратурой с ресурсных спутников для решения оперативных задач и обзорного тематического картографирования;



б) снимки *высокого* разрешения (10—30 м) — это фотографические, сканерные и ПЗС-снимки с ресурсно-картографических и ресурсных спутников, используемые для детального тематического картографирования.

4. Снимки *очень высокого* разрешения (единицы метров,  $L_R = 1 - 10$  м), на которых отображается весь комплекс природных и хозяйственных объектов, включая населенные пункты и транспортные сети. Снимки получают длиннофокусной фотографической и аппаратурой ПЗС-съемки с картографических спутников для решения задач топографического картографирования.

5. Снимки *сверхвысокого* разрешения (доли метра,  $L_R \leq 1$  м), детально отображающие населенные пункты, промышленные, транспортные и другие хозяйственные объекты. Эти снимки получают с использующих аппаратуру ПЗС-съемки специализированных спутников для детальной съемки и крупномасштабного топографического картографирования. К данной группе относится и весь огромный массив аэрофотоснимков.

При классификации снимков по масштабу следует учитывать, что для фотографических снимков принято указывать оригинальный масштаб снимков, получаемых при съемке; для сканерных же снимков принимают масштаб, наиболее широко используемый при визуализации изображения.

### 2.5.2. Характеристика основных типов снимков

В классификации космических снимков по спектральному диапазону и технологии съемки выделено шесть основных типов космических снимков. В разделах о приемниках излучения, съемочной аппаратуре, видах съемки приводятся сведения об их различных свойствах. В настоящем разделе рассматривается общая сравнительная характеристика этих типов снимков и областей их применения.

**Фотографические снимки**, которые получали с помощью фотографических камер, при вынужденной доставке экспонированной пленки на Землю, предназначались для решения не оперативных, а долговременных либо разведывательных задач. Они характеризуются высокой детальностью и до середины 90-х гг. XX в. были лучшими снимками по разрешению и геометрическим свойствам. На снимках находят отображение оптические характеристики объектов (интегральная или спектральная яркость). Космические фотоснимки обычно получали с низких околоземных орбит, с картографических (топографических) спутников в масштабах 1 : 200 000—1 : 1 000 000 с разрешением 2—30 м. Благодаря высокой детальности и непрерывному изображению с ними работают, как правило, при значительном увеличении — в 5—20 раз. При относительно небольшом (40—300 км) охвате снимков, име-

ющих центральную проекцию, искажения за кривизну Земли и рельеф невелики и устранимы. Перекрытие обеспечивает получение стереоскопических снимков. Для работы на компьютере фотографические снимки переводят в цифровую форму. Для топографического картографирования используют черно-белые панхроматические снимки, а для тематического — многозональные и спектрозональные, в основном цветные.

**Сканерные снимки**, получаемые при оптико-механическом сканировании в видимом и ближнем инфракрасном диапазоне и передаваемые по радиоканалам, как и фотографические, отображают оптические характеристики объектов, но такую съемку отличает оперативность, вплоть до получения изображений в реальном масштабе времени. В отличие от фотографических сканерные снимки представляют дискретные изображения, детальность которых определяется размером пиксела. Пространственное разрешение сканерных снимков долгое время было существенно ниже, чем фотографических, измерялось километрами, но в последние годы их получают с разрешением 15—30 м. Охват снимков варьирует от 180 км до 2—3 тыс. км. Характерны различия в проекции вдоль полета и по строке. Из-за перспективного изображения при больших углах сканирования по краям снимка масштаб становится более мелким, а разрешение падает. Вместе с одновременным получением изображения, когда на его формировании сказывается вращение Земли, все эти факторы влияют на геометрические свойства снимков и осложняют их обработку. Геометрическая коррекция снимков по орбитальным данным и по опорным точкам осуществляется с помощью компьютера. Сканерные снимки поступают с метеорологических и ресурсных спутников и используются для оперативных целей (прогноз погоды, гидрологические прогнозы) и тематического картографирования. Как правило, сканерные снимки — многозональные.

**ПЗС-снимки**, получаемые с помощью оптико-электронных сканеров с линейными ПЗС-приемниками излучения и передаваемые со спутника по радиоканалам, характеризуются высоким разрешением. Как и фотографические снимки, они регистрируют оптические характеристики исследуемой территории. Благодаря центральной проекции по строке снимка его масштаб в центре и по краям одинаков и форма объектов не искажается, что является преимуществом этих снимков по сравнению с полученными при оптико-механическом сканировании. Высокая чувствительность детекторов и их миниатюрные размеры вместе с использованием длиннофокусных объективов обеспечивают высокое разрешение, которое составляет от первых десятков метров (10—45 м) до метра и даже менее. Таким образом, теперь эти снимки по разрешению достигли лучших фотографических снимков. Однако охват снимков невелик — 40—70 км, а у снимков наиболее высо-

кого разрешения — всего 10—15 км. Наилучшим разрешением отличаются панхроматические снимки, а разрешение многозональных снимков в 2—4 раза хуже. Для стереообработки получают конвергентные снимки с отклонением оптической оси от вертикали. ПЗС-снимки делают с ресурсно-картографических спутников и специализированных спутников для детальной съемки; используют их для тематического и топографического картографирования.

**Тепловые инфракрасные снимки**, получаемые в тепловом инфракрасном диапазоне, отображают в отличие от предыдущих не оптические, а температурные характеристики поверхности — холодные и теплые объекты изображаются на них разными тонами. Можно получать снимки независимо от условий освещения, например полярной ночью, однако облачность является препятствием для съемки — на снимках отображается холодная верхняя поверхность облаков. Тепловая съемка нередко выполняется теми же сканирующими радиометрами, что и съемка в видимом и ближнем инфракрасном диапазоне, дополненными тепловыми каналами. Пространственное разрешение тепловых снимков, передаваемых с метеоспутников, такое же, как и снимков в видимом диапазоне, — 1 км, температурные различия регистрируются с точностью 0,1—0,2 °С. При значительном охвате 2—3 тыс. км и большом угле сканирования для них характерны те же геометрические искажения, что и для сканерных снимков в видимом диапазоне. С ресурсных спутников передают тепловые снимки более высокого пространственного разрешения, достигающего 60 м при охвате 180 км. Тепловые снимки поступают и в многозональном варианте съемки, а также при гиперспектральной съемке в узких зонах теплового диапазона.

**Микроволновые радиометрические снимки** регистрируют радиотепловое излучение Земли в микроволновом радиодиапазоне, которое, как уже отмечалось, зависит от электрических свойств поверхности и неодинаково у объектов с разным влагосодержанием, соленостью, различной кристаллической **структурой**. Снимки можно получать независимо от погодных условий и освещения. Разрешение микроволновых радиометрических снимков пока очень мало — 12—50 км, что не позволяет использовать их для изучения земной поверхности, но на них отображается возраст морских льдов, водосодержание снега. Микроволновые снимки получали с некоторых метеоспутников. Для широкого использования этих снимков с целью изучения влажности и солености почв, толщины и водозапаса снежного покрова необходимо повышение их пространственного разрешения.

**Радиолокационные снимки** получают в радиодиапазоне, регистрируя отраженные земной поверхностью радиосигналы, посылаемые бортовым радиолокатором. На радиолокационных снимках

отображаются шероховатость и влажность поверхности, ее рельеф, особенности структуры и состав пород, слагающих поверхность, характер растительного покрова. При определенных длинах волн излучения на снимках отображаются подповерхностные неоднородности грунта, грунтовые воды. Возможность получения снимков не зависит от условий погоды и освещения — облачность на них не отображается. Пространственное разрешение радиолокационных снимков определяется прежде всего размером антенны. У снимков, сделанных радиолокатором бокового обзора с реальной антенной, оно составляет 1—2 км, но в большинстве случаев при использовании радиолокаторов с синтезированной длиной антенны получают снимки с разрешением 10—30 м при ширине обзора около 100 км. В последние годы начали получать снимки радиолокаторами с переменным режимом работы, обеспечивающим снимки разного разрешения от 2 до 100 м при охвате 45—500 км. Специфику радиолокационного снимка составляет мелкая пятнистость изображения — технические спекл-шумы (от англ. *speckle* — крапчатость) и своеобразное отображение горного рельефа. Принцип многозональной съемки в радиодиапазоне реализуется при съемке в разных зонах пространственных частот и при различной поляризации излучения. Радиолокационные снимки поступают с океанологических и специализированных спутников; применяют их в широком спектре направлений исследований океана и суши, включая задачи топографического картографирования.

### ГЛАВА 3

## СВОЙСТВА И ОБРАБОТКА АЭРОКОСМИЧЕСКИХ СНИМКОВ

Успех аэрокосмических исследований во многом зависит от профессионального уровня проведенной обработки снимков. Тематическую (так называемую отраслевую) обработку снимков выполняет сам географ, который для этого должен знать информационные возможности аэрокосмических снимков и уметь извлекать из них необходимую информацию. Сейчас для обработки используют аэрокосмические снимки в основном двух видов — аналогового и цифрового. Известно, что первичные аналоговые снимки можно получать фотографическими и электронными съемочными системами, а цифровые — только электронными. Однако фотографические снимки путем сканирования (аналого-цифрового преобразования) можно перевести в цифровую форму, а цифровые — визуализировать в виде аналогового изображения на экране дисплея (цифро-аналоговое преобразование) или в виде принтерного отпечатка и т. д. При этом свойства цифрового фотографического снимка, например фотометрические, будут иными, чем у цифрового сканерного снимка, изначально записываемого в цифровом виде.

Как уже отмечалось, предметно-содержательную информацию об объекте, его географическом положении, геометрических характеристиках по аэрокосмическим снимкам получают в результате их дешифрирования и фотограмметрических измерений. Для географа приоритетное значение имеет дешифрирование. Это объясняется двумя обстоятельствами. Во-первых, именно дешифрирование дает наибольший объем географической информации о местности. Так, если результат аэрокосмических исследований представляется в виде карты, то полнота и глубина ее тематического содержания зависит от качества выполненного дешифрирования снимков, а точность картографической основы — от фотограмметрических определений. Во-вторых, географ, зная основные закономерности строения, функционирования и развития географической оболочки, владея географическим мышлением, оказывается всегда более профессионально подготовленным для выполнения любого интерпретационного дешифрирования, чем, например, инженерно-технические специалисты, которые лучше владеют техникой фотограмметрических работ.

Результаты визуального дешифрирования нередко носят субъективный характер, поэтому важно объективизировать этот метод получения информации, вводя в него меру и число. При применении наблюдательных и измерительных приборов говорят об *инструментальном* и *измерительном* дешифрировании; если результат дешифрирования получен на основе числовых характеристик изображения, то дешифрирование называют *количественным*.

Всегда стремились автоматизировать в целом эвристический процесс дешифрирования, поэтому в учебных пособиях по дисциплине встречаются термины — *автоматизированное* и даже полностью *автоматическое* дешифрирование, которое по праву относится к фундаментальному научному направлению — распознаванию образов.

С распространением персональных компьютеров дешифрирование стали чаще подразделять на *визуальное*, при котором, как и прежде, результат достигается человеком, использующим свою зрительную систему и интеллект, и *компьютерное*, когда это поручается (как правило, частично) электронно-вычислительной машине.

### 3.1. Изобразительные свойства и дешифрирование снимков

Дешифрирование снимков как метод исследования территорий, акваторий и некоторых атмосферных явлений по аэрокосмическому изображению основано на зависимости между свойствами объектов и характером их воспроизведения на снимках. Единый процесс дешифрирования включает стадии: обнаружение, распознавание и интерпретацию, а также определение качественных и количественных характеристик объектов и представление результатов дешифрирования в графической (картографической), цифровой или текстовой форме. Различают дешифрирование снимков военное, топографическое, геологическое, сельскохозяйственное и др. При географическом дешифрировании прежде всего приходится давать ответ на вопрос о том, *что* изображено на снимке. В зависимости от целей аэрокосмических исследований содержание этого ответа может быть достаточно простым (коренные породы, лес, водоем, ледник) или более сложным (ультраосновные горные породы; кедровый лес, сильно поврежденный сибирским шелкопрядом; участки водоема с различной концентрацией взвесей и фитопланктона; зона конжеляционного льдообразования на леднике).

Под дешифрированием всегда понималось извлечение качественной геоинформации со снимков при их непосредственном рассматривании. Не следует думать, что визуальное дешифриро-

вание в современных аэрокосмических методах — неоправданный анахронизм. В настоящее время это основной и наиболее распространенный способ извлечения информации из снимков. При визуальном дешифрировании изучаемый локальный объект или явление всегда рассматривается в пространственной взаимосвязи с его окружением, что дает важную, нередко решающую дополнительную информацию, которая обычно ускользает при компьютерной обработке. Поэтому стратегия совершенствования способов получения тематической информации по аэрокосмическим снимкам заключается в интеграции визуального и компьютерного дешифрирования, каждое из которых имеет свои достоинства и ограничения. Так, визуальное дешифрирование снимков на экране компьютера с успехом дополняется автоматизированной обработкой по специальным программам, позволяющим улучшить дешифровочные свойства снимка, либо быстро и с большой детальностью выделить четко изобразившиеся объекты. Для разделения объектов разного типа, определения границ между ними используются методы компьютерной классификации (кластеризации). Компьютер позволяет анализировать большие объемы цифровой информации, что необходимо, например, при обработке гиперспектральных снимков. Примечательно, что для суждения о достоверности результатов компьютерной обработки снимков нередко приходится использовать визуальные оценки.

### 3.1.1. Изобразительные свойства аэрокосмических снимков

Объем и характер качественной информации, получаемой по снимку, прямо зависит от его изобразительных свойств, которые тем выше, чем больше диапазон тоновых градаций и мельче отображаемые на снимке детали.

**Воспроизведение снимком яркостных градаций объектов.** Дешифровщику для практической работы важно знать, насколько правильно передает снимок яркостные градации, контраст реальных объектов.

**Фотографические снимки.** Ответ на вопрос о передаче яркостных градаций позволяет получить теория фотографического *тоновоспроизведения*, рассматривающая трансформацию яркостей объектов на отдельных этапах фотографического процесса.

Снимок будет без искажений передавать яркостные различия объектов местности, если разность оптических плотностей изображений объектов будет соответствовать как общему относительному контрасту (интервалу яркости местности)

$$U = \frac{B_{\max}^*}{B_{\min}^*},$$

так и контрасту смежных деталей объекта с яркостями  $B_1^*$  и  $B_2^*$  (см. гл. 2)

$$K_o = \frac{B_2^*}{B_1^*}.$$

В аэрокосмической фотографии для характеристики контрастов применяют не сами яркости, а их десятичные логарифмы, используя понятия *интервал фотографической яркости*

$$\lg U = \lg \frac{B_{\max}^*}{B_{\min}^*} = \lg B_{\max}^* - \lg B_{\min}^* = \Delta \lg B_U^*$$

и *деталь фотографической яркости*

$$\lg K_o = \lg \frac{B_2^*}{B_1^*} = \lg B_2^* - \lg B_1^* = \delta \lg B^*.$$

Следовательно, условие правильного воспроизведения фотографическим снимком яркостных градиентов местности можно представить как

$$\Delta D_{\max} = \Delta \lg B_U^* \text{ и } \delta D = \delta \lg B^*.$$

Закономерности передачи яркостных отношений фотографическим снимком удобно проследить на диаграмме воспроизведения тонов, состоящей из четырех взаимосвязанных графиков (рис. 3.1). Первый график характеризует оптическое изображение в фотокамере, на втором графике показана его трансформация при негативном, на третьем — при позитивном процессе. Четвер-

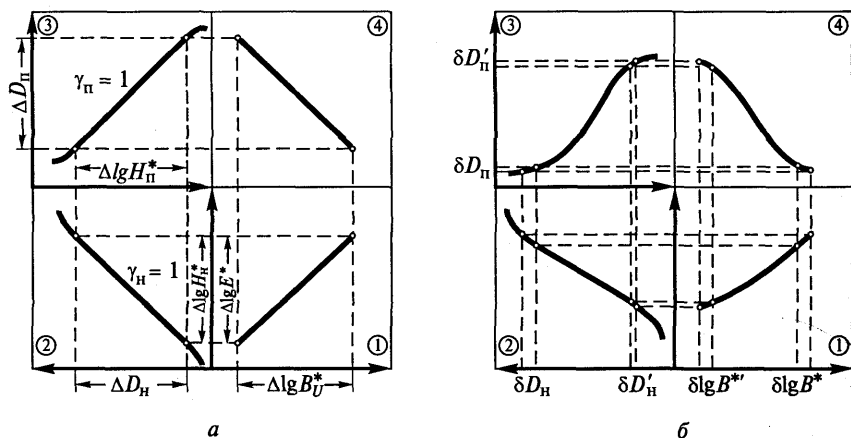


Рис. 3.1. Диаграмма фотографического воспроизведения тонов аэрокосмическим снимком:

*a* — для идеального случая; *b* — в реальных условиях аэрокосмической съемки.



тый график — результирующая кривая фотографического воспроизведения. В качестве единиц измерений по осям координат графиков приняты соответствующие логарифмические величины.

Вначале рассмотрим воспроизведение общего относительно контраста в идеальном случае, когда влиянием атмосферы можно пренебречь, а интервал яркостей  $U$  снимаемой местности соответствует прямолинейному участку характеристической кривой (рис. 3.1, а). На оси абсцисс первого графика отложены логарифмы яркостей  $B^*$  объекта съемки, а на оси ординат — логарифмы освещенностей  $E^*$  оптического изображения в фотокамере. График отображает прямо пропорциональную зависимость между интервалом фотографических яркостей местности  $\Delta \lg B_U^*$  и интервалом освещенностей ее оптического изображения  $\Delta \lg E^*$ , который численно равен приращению логарифмов экспозиций  $\Delta \lg H_n^*$ , действовавших на негативный фотоматериал. На втором и третьем графиках приведены характеристические кривые негатива и позитива, проявленных до соответствующих коэффициентов контрастности, т. е. для рассматриваемого случая  $\gamma_n = \gamma_p = 1$ . Тогда интервал оптических плотностей негатива  $\Delta D_n$  будет соответствовать интервалу фотографических яркостей местности  $\Delta \lg B_U^*$ , т. е.

$$\Delta D_n = \gamma_n \Delta \lg B_U^* = \Delta \lg B_U^*,$$

а на позитиве удастся отобразить без искажений весь интервал оптических плотностей негатива, что в абсолютных величинах можно представить как

$$\Delta D_p = \gamma_p \Delta \lg H_n^* = \Delta D_n.$$

В результате на позитиве общий контраст местности будет воспроизведен без искажений, т. е.

$$\Delta D_p = \gamma_n \gamma_p \Delta \lg B_U^* = \Delta \lg B_U^*.$$

Это графически отображено на четвертом графике прямой линией, имеющей угол наклона к осям координат  $45^\circ$ .

Передачу яркостных отношений при реальной аэрокосмической фотосъемке сквозь толщу атмосферы иллюстрирует рис. 3.1, б. Первый график, отражая закономерности воспроизведения яркостей в оптическом изображении, учитывает влияние атмосферной дымки, которая, уменьшая общий контраст, существенно снижает контраст деталей темных объектов, меньше влияет на контраст объектов средней яркости и почти не сказывается на контрасте деталей наиболее ярких объектов. Чем сильнее дымка, тем более пологой становится кривая. Одинаковые детали фотографической яркости светлых  $\delta \lg B^*$  и темных  $\delta \lg B^{**}$  объектов передадутся в оптическом изображении не одинаково. Худшая передача яркостных градаций темных объектов иллюстрируется на втором графике неравенством отрезков  $\delta D_n$  и  $\delta D_n'$ . Третий график ха-

рактирует воспроизведение тонов в позитивном процессе. Здесь необходимо иметь в виду, что при печати на фотобумаге приходится использовать не только небольшой прямолинейный участок характеристической кривой, но области недодержек и передержек. Это приводит к еще большему искажению относительных контрастов деталей на снимке, особенно для темных объектов. Для частичной компенсации влияния атмосферной дымки и лучшего соответствия тоновых контрастов снимка и местности при фотографическом проявлении негативов и позитивов стремятся выдержать условие  $\gamma_n \gamma_{\text{п}} = 1,5$ . Окончательная кривая фотографического воспроизведения на четвертом графике показывает характер изменения контрастов на снимке. Без существенных искажений воспроизводятся яркостные градации только при средних значениях яркости, а у светлых и темных объектов они приуменьшены, т. е.

$$\delta D_{\text{п}} < \delta \lg B^* \text{ и } \delta D'_{\text{п}} < \delta \lg B^{**}.$$

Картина еще более усугубляется при использовании не оригинальных фотоснимков, а их копий (дубль-негативов и позитивов).

Таким образом, влияние атмосферной дымки, использование не оригинальных снимков, а их контратипов, а также свойства позитивного фотоматериала не позволяют правильно передать на фотоснимке яркостные различия местности во всем тоновом диапазоне. Поэтому для надежного измерительного дешифрирования рекомендуется использовать лишь оригинальные фотонегативы, для которых известна величина коэффициента контрастности  $\gamma$ . При съемке в фильм с помощью калиброванного источника света впечатывают фотометрический клин, который после проявления позволяет построить характеристическую кривую и по ней определить величину коэффициента контрастности  $\gamma$ . При этом следует учитывать сложность выполнения компьютерного дешифрирования цифровых фотографических снимков. Отобранные многозональные снимки должны подвергаться дополнительной коррекции, устраняющей целый ряд фотометрических искажений, вносимых не только атмосферой и съемочной аппаратурой, но и химико-фотографической обработкой. Наиболее надежных результатов компьютерного дешифрирования удается достичь при расположении оптических плотностей дешифрируемых объектов на прямолинейном участке характеристической кривой при их среднем значении около 1,0.

Итак, без достаточно сложной и тщательно выполненной фотометрической коррекции (иногда с использованием фотометрических эталонов на местности) получить по фотографическим снимкам достоверные результаты компьютерного дешифрирования по алгоритмам, основанным на знании спектральной отра-

жательной способности объектов, нельзя. Однако на практике нередко используют оцифрованные цветные или спектрзональные фотоснимки для этих целей, но при условии размещения дешифрируемых и эталонных объектов на одном и том же снимке.

**Сканерные (цифровые) снимки.** Передача яркостных градаций на сканерных и фотографических снимках различна. Прежде всего электронные сканеры регистрируют в числовом виде собственно яркость объекта, а не производную от нее величину почернения фотографического изображения (см. гл. 2). При создании сканеров добиваются линейной передачи яркостей объекта. Однако, как и у фотографических систем, у электронных существуют верхний и нижний пороги чувствительности, за пределами которых яркость регистрируется как нулевая либо как максимальная. Влияние атмосферной дымки на яркость изображения объектов аналогично ее воздействию на фотографические снимки. Поэтому при многозональной сканерной съемке необходимо знание калибровочных коэффициентов, которые должны сопровождать файлы цифровых снимков. При создании файлов-копий цифрового снимка в отличие от фотографического не происходит каких-либо изменений яркостных градаций. Таким образом, цифровые снимки более пригодны для измерительного (компьютерного) дешифрирования.

**Разрешающая способность и пространственное разрешение аэрокосмических снимков.** Для характеристики детальности аэрокосмических снимков предложено несколько количественных показателей. Среди дешифровщиков наибольшее распространение получили два показателя: пространственное разрешение и разрешающая способность, которая, как показано в гл. 2, используется для оценки фотографических материалов. Этот показатель применяют также для оценки объективов съемочных камер, для характеристики способности зрительной системы человека различать мелкие детали и т. д.

**Аналоговые (фотографические) снимки.** Напомним, что величина разрешающей способности  $R$ , представляющая собой число белых и черных штрихов, раздельно воспроизводимых на 1 мм изображения снимка, выражается в миллиметрах в минус первой степени, а также линейной мерой  $l_R$ , равной ширине штриха миры. Эти величины связаны между собой:

$$l_R = \frac{1}{2R}.$$

Разрешающая способность фотографических снимков зависит от разрешающей способности объектива съемочной камеры  $R_{об}$  и фотопленки  $R_{пл}$ , значения которых для лучших образцов можно принять равными  $200 \text{ мм}^{-1}$ . Но полученные снимки будут иметь меньшую разрешающую способность, которую теоретически подсчитывают так:

$$\frac{1}{R_{\text{сн}}} = \frac{1}{R_{\text{об}}} + \frac{1}{R_{\text{пл}}} = \frac{1}{200} + \frac{1}{200} = \frac{1}{100} = 100 \text{ мм}^{-1} \text{ (100 л/мм)}.$$

Разрешающую способность объективов и фотопленок, которая указывается в паспортах и каталогах, определяют в лабораторных условиях по мере абсолютного контраста. Фотографируемая же местность в летнее время малоконтрастна, поэтому разрешающая способность реальных фотоснимков будет меньше расчетной. Кроме того, сдвиг изображения из-за движения и вибраций носителя, воздушная дымка и другие факторы еще больше снижают четкость снимка. В настоящее время аэрофотоснимки имеют разрешающую способность в среднем 10—40 мм<sup>-1</sup>, а космические фотоснимки — в 2—3 раза более высокую. Приведенные значения  $R_{\text{сн}}$  относятся к оригинальным негативам, а обычно применяемые для дешифрирования отпечатки на фотобумаге будут иметь более низкую разрешающую способность. Если дешифровщику требуется определить фактическую величину разрешающей способности конкретного фотоснимка, то измеряют с помощью измерительной лупы с 10× увеличением ширину нескольких наиболее узких и контрастных линейных объектов на снимке. Среднее значение измеренных величин в миллиметрах, допуская определенное упрощение, принимают за  $l_R$  и вычисляют разрешающую способность снимка, которую используют прежде всего для сравнительной оценки различных снимков и съемочных систем.

Распространенный показатель — разрешающая способность — наиболее подходит для оценки возможности снимка разделять передавать линейные близко расположенные объекты. При выборе же фотоснимков для дешифрирования важно заранее знать размер на местности того минимального реального объекта (или его отдельной детали), который изобразится на снимке. Здесь большую помощь может оказать другой показатель — пространственное разрешение. Для фотографических снимков в качестве такого показателя принимают *линейное разрешение*  $L_R$ , т. е. наименьшую ширину на местности линейного протяженного объекта, еще воспроизводимого конкретным снимком. Линейное разрешение можно предсчитать по номинальной величине разрешающей способности, используя формулу

$$L_R = l_R M = \frac{M}{2R_{\text{сн}}},$$

где  $M$  — знаменатель масштаба фотографического снимка.

Поскольку величина воспроизводимого объекта зависит также от его тонового контраста  $\Delta D$ , на практике расчетное значение линейного разрешения на местности  $L_R$  обычно уменьшают в  $\sqrt{\Delta D}$  раз. Необходимо также учитывать, что воспроизведение протя-

женных линейных объектов существенно лучше, чем компактных. По опытным данным, это соотношение составляет 1 : 3.

**Цифровые (сканерные и др.) снимки.** Для цифровых снимков вместо разрешающей способности  $R$  в миллиметрах в минус первой степени (линий/мм) нередко употребляют выражение разрешающей способности  $R_d$  в dpi (от англ. *dots per inch* — точек на дюйм). При этом считают, что

$$R_d = 25,4 \cdot 2\sqrt{2}R = 71,1R \text{ dpi.}$$

В отличие от фотоснимков за пространственное разрешение цифровых снимков принимают размер пиксела на местности, который обозначается PIX (от слова *pixel*).<sup>1</sup> Этот первостепенный показатель любой космической съемочной системы всегда приводится в ее проспекте. По этому номинальному показателю сравниваются различные сканерные системы. Например, пространственное разрешение снимков MSS/Landsat принимают равным 80 м, МСУ-Э/Ресурс-О — 45 м, Ikonos — 0,8 м.

Пиксел является наименьшим элементом цифрового изображения, внутри которого отдельные объекты не различаются. Экспериментально установлено, что для надежного воспроизведения компактного объекта на цифровом снимке его размер должен быть не менее четырех пикселов, а для того, чтобы различались компактные объекты разной формы, их площадные размеры должны составлять уже несколько десятков пикселов.

При строгой сравнительной оценке фотографических и цифровых снимков по пространственному разрешению, характеризующему для фотографических снимков линейным разрешением  $L_R$ , а для цифровых — размером пиксела PIX на местности, принимают, что

$$L_R = \sqrt{2}PIX.$$

Однако в практической работе с фотографическими и со сканерными снимками это различие нередко игнорируется.

**Географическое и другие виды разрешения.** Разрешающая способность, линейное разрешение, номинальный размер пиксела на местности являются универсальными показателями, которыми пользуются как разработчики съемочных систем, так и специалисты, применяющие снимки. Однако выбирая или оценивая снимки для дешифрирования, географ прежде всего задает вопрос: какие важнейшие для него объекты будут распознаваться на снимках?

---

<sup>1</sup> Однако это не означает, что одинаковым прямоугольным пикселям *pix*, из которых образован цифровой снимок, на местности соответствуют также одинаковые PIX — прямоугольные элементарные площадки. При сканировании эти площадки (пятна сканирования) на местности могут иметь разную форму, перекрываться, да и чувствительность приемника излучения в пределах пятна не всегда одинакова.

Уверенно ответить на этот вопрос, зная по проспектам номинальное значение показателей разрешения, не удастся. Поэтому для оценки снимков предложен качественный показатель их изобразительных свойств — *географическое разрешение*, которое характеризуется воспроизводимостью на снимках определенных (репрезентативных) объектов. Например, при исследовании горного оледенения такими объектами могут быть срединные морены и ледниковые трещины, при изучении населенных пунктов — их планировочная структура, улицы, здания. Географическое разрешение удобно использовать для определения оптимального для конкретной работы типа снимков, когда выбор объектов обусловлен задачами отраслевого дешифрирования и географическими особенностями региона. Другое его практическое применение — сравнительная оценка имеющихся снимков; в этом случае репрезентативные объекты должны составлять разноразмерный ряд однородных объектов.

Помимо пространственного разрешения, характеризующего детальность изображения на снимке, нередко говорят о радиометрическом (энергетическом), а также о спектральном, тепловом и даже временном разрешении.

*Радиометрическое (яркостное) разрешение* — число уровней яркости, регистрируемых приемником излучения. Оно может быть выражено также в битах (2 уровня — 1 бит, 4 уровня — 2 бита, 16 уровней — 4 бита, 64 уровня — 6 бит, 256 уровней — 8 бит, 1024 уровня — 10 бит).

*Спектральное разрешение* определяется шириной спектральных зон съемки и измеряется в нанометрах (нм) или микрометрах (мкм). Наиболее низкое спектральное разрешение (сотни нм) имеют фотографические панхроматические снимки и снимки, получаемые инфракрасными радиометрами, а самое высокое (до 10 нм) — гиперспектральные снимки. Повышение спектрального разрешения позволяет подробнее классифицировать объекты, например на основе знаний о полосах поглощения воды, хлорофилла, минералов, газов в атмосфере.

*Тепловое разрешение* характеризуется величиной разностей температур различных объектов, которые удастся зарегистрировать тепловым снимком. У лучших снимков оно составляет десятки градуса.

*Временное разрешение* зависит от периодичности съемок и оценивается интервалом времени между повторными съемками. Оно меняется от 15—30 мин при регулярной съемке с геостационарного метеоспутника, суточного интервала у околоземных метеорологических спутников, 16—18 сут у ресурсных спутников на солнечно-синхронных орбитах до интервалов в несколько лет, характерных для эпизодических съемок, выполняемых, например, с картографических спутников.

**Особенности изображения радиолокационных снимков.** Поскольку человек не видит в радиодиапазоне, то изображение на радиоло-

кационных снимках необычно и не соответствует привычному виду объектов. Тон изображения на радиолокационных снимках определяют несколько факторов — шероховатость, влажность, угол встречи радиолуча с отражающей поверхностью, а также длина волны и поляризация излучения. Гладкие поверхности (при неровностях меньше половины длины радиоволны) отражают излучение в противоположную от радиолокатора сторону и изображаются на снимке темным тоном; так выглядят песчаные пляжи, взлетные полосы аэродромов, нефтяная пленка на воде. При больших неровностях тон зависит от характера шероховатости поверхности, например высоты и структуры растительного покрова, волнения на море. Снимки, полученные при различных сочетаниях поляризации излучаемого и регистрируемого радиолокационного сигнала — горизонтальной (H) и вертикальной (V) — открывают дополнительные возможности дешифрирования. При этом поляризации типа HH, VV лучше выявляют объекты, имеющие гладкую поверхность, характеризующиеся однократным отражением (например, спокойная вода), а типа HV, VH — объекты, вызывающие многократное отражение сигнала (например, редколесья). На интенсивность отраженного радиосигнала влияет содержание воды, поэтому яркость изображения различна для сухого и тающего снега, сухих и влажных почв, сочной и высохшей растительности. Кроме того, длинноволновое радиоизлучение, как уже указывалось в гл. 2, обладает свойством подповерхностного проникновения, поэтому на снимках аридных районов под плащом сухих рыхлых грунтов, например песка, могут отображаться разным тоном геологические структуры или линзы грунтовых вод на некоторой глубине.

Поскольку положение объекта съемки на снимке зависит от фиксируемого радиолокатором наклонного расстояния между антенной и объектом, то верхние и нижние точки крутых горных склонов, «освещаемых» радиоизлучением, на изображении сближаются и такие склоны воспроизводятся в виде узких светлых полос. В то же время на противоположных склонах образуются *радиотени* — участки, куда радиоизлучение не попадает и информация о них полностью отсутствует; они имеют на снимках вид темных пятен. Совокупность радиотеней, которые всегда направлены перпендикулярно к линии полета, и светлых полос — так называемых радарных дорожек — создает хотя и искаженное, но выразительное изображение форм рельефа, что важно для геоморфологического и геологического изучения территории.

Для радиолокационных снимков характерно наличие на изображении мелкой пятнистости технического происхождения — спекл-шумов, — ухудшающей изобразительные свойства снимков и осложняющей дешифрирование. Для уменьшения влияния спекл-шумов проводится специальная обработка снимков.

**Генерализация изображения на аэрокосмических снимках.** Если последовательно рассматривать ряд разномасштабных снимков (или снимков с разным пространственным разрешением) одной и той же местности, можно заметить, что при переходе к более мелким масштабам не только уменьшается изображение объектов и обобщаются их детали, но происходит и более сложная перестройка всего аэрокосмического изображения, его рисунка. Многие черты изображения земной поверхности освобождаются от частных, и в то же время некоторые разрозненные детали объединяются в единое целое. Такое преобразование изображения получило название *аэрокосмической генерализации*, которую нередко называют также *естественной, дистанционной, фотографической, оптической*.

Под аэрокосмической генерализацией следует понимать закономерные особенности воспроизведения на аэрокосмических снимках различных объектов местности (обобщение пространственно-яркостных и цветовых характеристик изображения), которые обусловлены съемочной аппаратурой, параметрами и оптико-метеорологическими условиями съемки. В отличие от картографической генерализации управляющее воздействие на аэрокосмическую генерализацию может быть лишь опосредованным, путем выбора средств, параметров и времени съемки. Вообще правильной говорить не о генерализации, а о генерализованности изображения аэрокосмических снимков. Генерализованность изображения — важнейшее свойство аэрокосмического снимка, существенно влияющее на его информативность.

**Закономерности аэрокосмической генерализации.** На особенности воспроизведения объектов при изменении разрешения и масштаба снимков влияет их форма и контраст с окружающим фоном. Происходит упрощение формы, обобщение тонов и цветов, обеднение цветовой палитры; черные и белые тона заменяются менее контрастными, причем это изменение происходит тем быстрее, чем мельче контуры и меньше контраст изображения. Вытянутые контуры превращаются в линии, а округлые — в точки. По-разному обобщаются линейные, размытые (диффузные) и мозаичные границы: линейные упрощаются и спрямляются; размытые становятся контрастными и приближаются к линейным; мозаичные, в зависимости от степени их дисперсности, либо сохраняют мозаичность при укрупнении пятен, либо превращаются сначала в диффузные, а затем в линейные границы. Преобразование характера изображения границ приводит к изменению конфигурации и площадей контуров. Изображение различных объектов реагирует на уменьшение масштаба по-разному: наименее чувствительны к нему линейные элементы изображения, наиболее — компактные. Так, на космических снимках достаточно четко изображается дорожная сеть и неясно — населенные пункты.



При двухкратном изменении масштаба (разрешения) информативность снимков ощутимо не меняется, а при пятикратном — получаемая по разномасштабным снимкам информация сопоставима с трудом.

**Уровни генерализации.** В результате исследования закономерностей обобщения изображения на аэрокосмических снимках, имеющих огромный диапазон масштабов (от  $10^{-3}$  до  $10^{-8}$ ), обнаружено существование узловых точек перестройки изображения. При переходе от крупных масштабов к мелким, от аэроснимков к космическим снимкам при непрерывной потере деталей изображения происходит скачкообразная перестройка его рисунка. В этих узловых точках исчезает изображение одних объектов, но проявляется изображение других, более высокого иерархического уровня и больших размеров; сменяются основные компоненты, формирующие рисунок изображения: растительность — рельефом, а затем элементами гидрографии. В соответствии с этим обычно выделяют 5 уровней генерализации — от детального до глобального, которые сменяют один другой при изменении масштаба в 3—4 раза.

Для каждого уровня характерна максимальная дешифрируемость определенных объектов; поэтому по снимкам разного уровня генерализации решаются различные задачи. Так, для изучения поверхностных структур используют снимки более детальные, меньшего уровня генерализации, а наиболее глубокие структуры дешифрируются по самым генерализованным снимкам, что воспринимается как «просвечивание» глубинных структур, которое иногда называют «рентгеноскопичностью».

Важно, что благодаря исчезновению мелких деталей на генерализованном изображении космических снимков проявляются некоторые объекты, не видимые на крупномасштабных материалах. Например, космические снимки позволили открыть огромные по протяженности песчаные дюны — сэфы — в пустынях Африки и Аравии. Прежнее представление об эоловом рельефе этих районов давали отображавшиеся на аэроснимках небольшие эоловые формы, которые, как оказалось, осложняют гигантские формы совершенно иного простирания, остававшиеся незамеченными и не отображенные на картах (рис. 3.2).

**Значение аэрокосмической генерализации.** Генерализация изображения на аэрокосмических снимках играет и положительную, и отрицательную роль. С одной стороны, сильное обобщение изображения уменьшает возможности точного и детального картографирования по космическим снимкам. Поэтому, например, для топографического картографирования стремятся повысить разрешение съемочных систем, сделать снимки максимально детальными.

Но с другой стороны, генерализованность изображения космических снимков — их достоинство. Прежде всего генерализо-

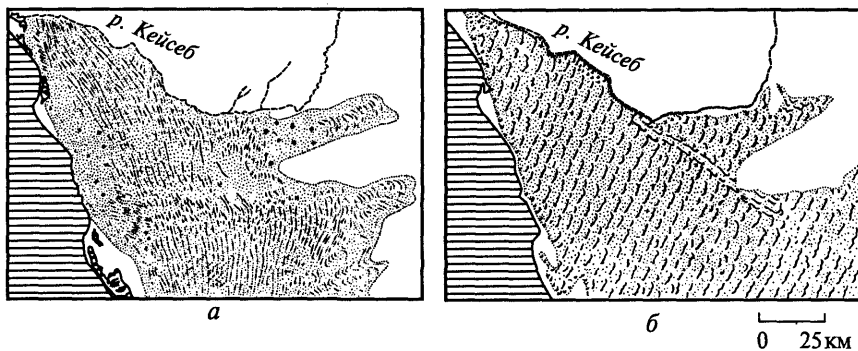


Рис. 3.2. Результаты дешифрирования золотого рельефа пустыни Намиб по космическому снимку (а) и его изображение на обзорно-топографической карте (б)

ванность изображения позволяет непосредственно составлять по космическим снимкам тематические карты в средних и мелких масштабах без предварительного крупномасштабного картографирования и трудоемкого перехода к мелким масштабам. Не менее важно, что отображение на космических снимках геосистем с определенного таксономического уровня дает возможность изучать их главные свойства. Например, на космических снимках с околоземных орбит не воспроизводится низший, фациальный уровень ландшафтов, а отображается уровень урочищ — основной структуроформирующий ландшафтный уровень. Это свойство снимков оказывается географически важным, поскольку на снимках разного уровня генерализации отображаются и различные иерархические уровни организации геосистем, а значит, может быть прослежена их многоуровневая иерархическая структура.

### 3.1.2. Психологические и физиологические основы визуального дешифрирования

Успех дешифрирования зависит не только от качества аэрокосмических снимков и совершенства технических средств их обработки, но и от профессиональной подготовки, а также психологических и физиологических особенностей дешифровщика. Известно, что опытные дешифровщики не просто рассматривают снимки, а на основе информации, извлекаемой из снимка, и своих знаний формируют в сознании мысленный образ изучаемой местности, анализ которого и приводит к определенным результатам дешифрирования. Это в психологии называют «эффектом присутствия».

**Психологические особенности зрительного восприятия снимков.** Хотя зрительный путь и начинается с глаза — органа, который первоначально регистрирует световое излучение объектов, но в

визуальном восприятии определяющее значение имеет мозг. Человек воспринимает объекты существенно иначе, чем их видит глаз. Психологи утверждают, что мы не только верим тому, что видим, но до некоторой степени и видим то, во что верим. Поэтому при оценке достоверности визуального дешифрирования, особенно тематического, выполняемого по сложной логической легенде, следует учитывать как изобразительные свойства снимков и зрительные пороги, так и психологические закономерности осознанного зрения. Остановимся на важнейших из них.

В соответствии с психофизическим законом Фехнера интенсивность зрительных ощущений  $G$  функционально связана с их световым возбудителем — яркостью  $B^*$  — *логарифмической зависимостью*

$$G = F \lg B^*,$$

т.е. с увеличением физической яркости объекта интенсивность субъективных ощущений растет значительно медленнее — пропорционально ее логарифму. Именно поэтому в качестве единицы измерения почернения (тона) на снимке также установлена логарифмическая величина — оптическая плотность.

Известно, что основная задача, решаемая в процессе дешифрирования, относится к объектно-фоновым отношениям при зрительном восприятии и заключается в выделении объекта из окружающего фона и определении, *что* он собой представляет. Однако ответ, который находится уточняющими итерациями или подбором вариантов, к сожалению, всегда носит вероятностный характер. Это положение следует учитывать прежде всего при косвенном дешифрировании космических снимков. Достоверность дешифрирования считается удовлетворительной, если вероятность правильного распознавания объектов составляет 0,75.

Зрение человека имеет способность структурировать увиденное, воспринимать не разрозненные детали, а целостный зрительный образ — гештальт (от нем. *Gestalt* — целостность, форма). Однако одна и та же информация, извлекаемая из снимка, может интерпретироваться дешифровщиком совершенно по-разному (рис. 3.3). С психологической точки зрения дешифрирование — это установление соответствия между изображением объекта на снимке и знаниями, хранящимися в памяти.

При внимательном анализе снимков дешифровщик последовательно фиксирует свой взор на выбранных участках изображения. Установлено, что вокруг точки фиксации человек в состоянии воспринять лишь несколько отдельных деталей (объектов) — обычно  $7 \pm 2$ . Поэтому движение глаз — существенный элемент зрительного восприятия при визуальном дешифрировании снимков.

Необходимо учитывать, что зрительная система человека плохо приспособлена для абсолютных оценок площадей, длин ли-



Рис. 3.3. Это изображение заимствовано из учебников по психологии зрительного восприятия. Полярный исследователь воспримет его как космический снимок морских льдов с разводьями, а животновод — совсем по-другому

ний, величин углов, освещенности объектов, но уверенно дает относительные оценки. Особо остро человек воспринимает симметрию. Поэтому дешифровщик достаточно точно (с погрешностью 1—3%) оценивает, например, размеры объекта, сравнивая

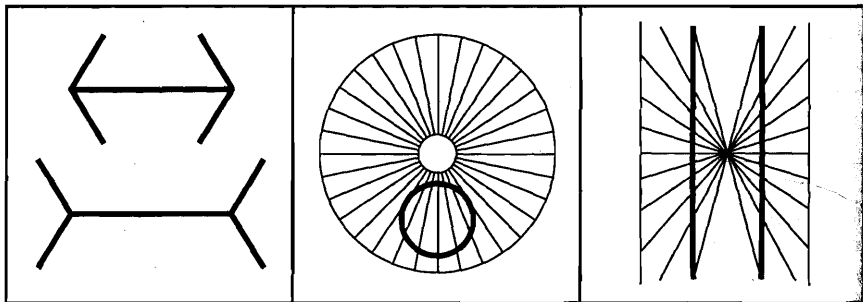


Рис. 3.4. Оптико-геометрические иллюзии: равные горизонтальные отрезки воспринимаются неравными по длине, круг — овалом, а параллельные прямые — кривыми линиями

их с размерами изобразившихся на снимке хорошо известных предметов. Выполняя глазомерные оценки, необходимо проявлять определенную осторожность и помнить о возможных оптико-геометрических иллюзиях (рис. 3.4). При бинокулярном рассматривании цветных изображений через лупу большого диаметра возникает известный в психологии *цветостереозффект*, вследствие которого красные контуры воспринимаются приподнятыми относительно сине-зеленых. Это явление объясняется различным преломлением длинноволновых и коротковолновых световых лучей при прохождении их через двояковыпуклую линзу.

**Восприятие тоновых различий и мелких деталей на снимках.** Известно, что человек может воспринимать только те яркостные и цветовые различия и те мелкие детали, которые превосходят *пороговые* (минимальные) величины.

Возможность глаза различать малейшие яркостные различия  $\Delta B_{\min}^*$  обычно характеризуют порогом визуального контраста:

$$K_{\min} = \frac{\Delta B_{\min}^*}{B^*}.$$

Многочисленными опытами установлено, что пороговая величина визуального контраста при хорошем освещении составляет  $K_{\min} = 0,02$ . Рекомендуемый в инженерной психологии визуальный контраст, обеспечивающий надежное различение объектов, должен в несколько раз превосходить эту пороговую величину.

Успешное дешифрирование снимков во многом зависит от тоновых контрастов изображения. Эксперименты показали, что наблюдатель в состоянии различить на фотографическом изображении два соседних контура, если разность их оптических плотностей больше пороговой величины тонового контраста, который принимается равным  $\Delta D_{\min} = 0,06$ . В практической же работе с реальными снимками, у которых  $\Delta D_{\max} = 2,5$ , дешифровщик в состоянии уверенно различить на прозрачном диапозитиве лишь до 20 тонов от черного до белого, а на бумажном фотоотпечатке — не более 10. В практике дешифрирования обычно используется 7-ступенная стандартизированная шкала со следующими названиями ахроматических тонов и значениями оптических плотностей: белый ( $< 0,1$ ), почти белый ( $0,1 - 0,2$ ), светло-серый ( $0,2 - 0,4$ ), серый ( $0,4 - 0,7$ ), темно-серый ( $0,7 - 1,0$ ), почти черный ( $1,0 - 1,3$ ) и черный ( $> 1,3$ ).

Способность глаза различать мелкие детали характеризуется *остротой монокулярного зрения* — минимальным углом, под которым наблюдатель еще видит отдельно две светящиеся точки и который составляет  $45''$ . Это так называемая острота зрения *первого рода*; она в два раза хуже остроты зрения второго рода, которая

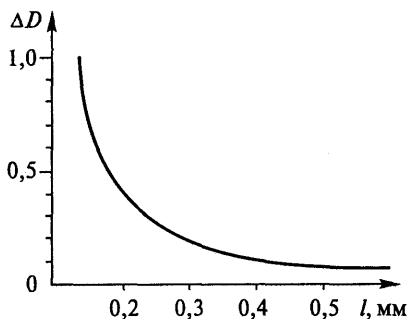


Рис. 3.5. Зависимость размера воспринимаемого глазом компактного объекта от контраста

характеризуется раздельным восприятием двух параллельных линий.

Возможность восприятия наблюдателем мелких объектов на фотографическом снимке зависит от их размера, контраста, резкости границ и формы. Мало-контрастные, нерезкие компактные объекты различаются на снимках значительно хуже, чем контрастные, четкие, линейные. Влияние тонового контраста  $\Delta D$  на минимальный размер  $l$  воспринимаемого компактного резкого объекта показано на рис. 3.5. Следует помнить, что при контрасте менее 0,06 любое увеличение размера объекта не приводит к его обнаружению на фотографическом снимке, а уменьшение размера компактного объекта менее 0,07 мм (ширины линейного менее 0,03 мм) не позволяет его обнаружить при любом контрасте. Для распознавания объекта его размер должен быть в 3—5 раз больше, чем для обнаружения.

**Восприятие цвета. Аддитивный и субтрактивный синтез цвета** (цв. вкл. I, 4). Цветовое восприятие значительно тоньше. Вариации цветности особенно хорошо заметны в голубой и желтой зонах спектра — здесь глаз улавливает изменение в длине световой волны всего на 1 нм. Принято считать, что в видимом спектре человек в состоянии различить около 200 цветовых тонов. Общее же число различаемых глазом цветов, отличающихся по цветовому тону, насыщенности и светлоте, значительно больше. Известно, что каждое узкоспектральное (монохроматическое) излучение воспринимается глазом в определенном спектральном цвете. Однако все многообразие цветов в соответствии с трехкомпонентной теорией цветового зрения можно получить, искусственно смешивая в разных пропорциях три *основных* цвета: *синий* (С), *зеленый* (З) и *красный* (К), которые при сложении образуют белый (Б) или серый «цвет»:

$$C + Z + K = B.$$

Синтез цвета путем сложения основных цветов (оптического или пространственного) называется *аддитивным* (или способом сложения). Так образуется цветное изображение на многозональном проекторе или на экране дисплея персонального компьютера. Этим способом можно синтезировать *дополнительные* цвета: *голубой* (Г), *желтый* (Ж), *пурпурный* (П):

$$C + Z = Г; Z + K = Ж; C + K = П,$$

каждый из которых попарно с основным дает белый «цвет»:

$$Б = К + Г = З + П = С + Ж.$$

Синтез цвета путем вычитания из белого дополнительных цветов называется *субтрактивным* (или способом вычитания). Вычитанием дополнительных цветов из белого можно синтезировать основные цвета:

$$К = Б - (Ж + П);$$

$$З = Б - (Ж + Г);$$

$$С = Б - (Г + П).$$

При вычитании из белого всех дополнительных цветов образуется черный (Ч) «цвет»:

$$Б - (Ж + П + Г) = Ч.$$

Так получают цветные отпечатки аэрокосмических снимков на фотобумаге или принтере. Вообще говоря, интуитивно предугадать результат манипуляций с основными и дополнительными цветами очень трудно. Здесь следует опираться на знания и опыт. Кроме того, визуальное восприятие цвета зависит также от цвета окружающих объектов (цветового контраста). Ахроматические объекты на цветном фоне воспринимаются с цветовыми оттенками дополнительного к фону цвета. Например, серый объект на красном фоне будет восприниматься зеленоватым, а зеленый — еще более зеленым.

Аддитивный и субтрактивный способы получения цвета составляют основу цветной аэрокосмической съемки, которая предусматривает два процесса — анализ цвета (цветоделение), обеспечивающий раздельное действие на приемник излучения основных цветов, и последующий синтез цвета (цветовоспроизведение), рассмотренное выше. При этом необходимо учитывать, что цвет не определяет однозначно спектрального состава света. Например, ощущение желтого цвета вызывает лучистый монохроматический поток с длиной волны 570 нм и поток, состоящий из смеси зеленых и красных лучей. Существует множество спектральных распределений, вызывающих одинаковое ощущение цвета.

**Стереоскопическое зрение.** Зрительная система большинства людей, среди которых больше женщин, обладает удивительным свойством слияния двух глазных изображений в единое с возникновением феноменального эффекта пространственной глубины или *стереоскопического эффекта*, который позволяет достоверно оценивать пространственное размещение объектов и воспринимать их трехмерную форму. Стереоскопическое зрение широко используется при визуальном дешифрировании и измерениях аэрокосмических снимков. Принято считать, что наиболее точную оценку

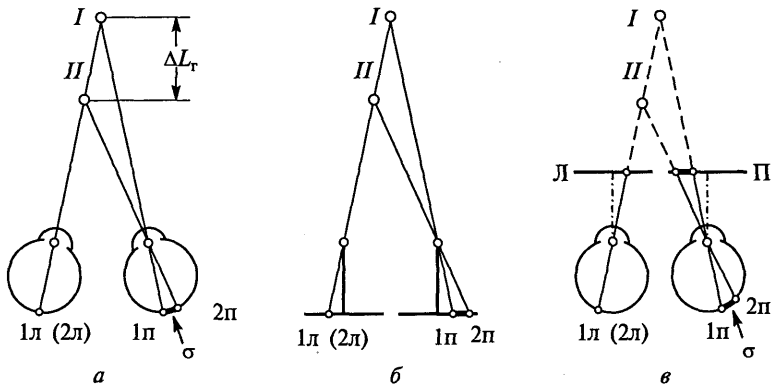


Рис. 3.6. Схема стереоскопического зрения (а) и получения искусственного стереоэффекта (б, в)

относительного положения объектов по глубине обеспечивает механизм стереоскопического зрения, основанный на различии двух глазных изображений (*диспаратности*). Если сосредоточить взор на какой-либо точке объекта *I* (так называемой точке фиксации), то изображение соседней точки объекта *II* на левой и правой сетчатках будет неодинаково смещено относительно изображения точки фиксации (рис. 3.6, а). Различие в величинах этих смещений по горизонтальному направлению называется *физиологическим параллаксом*  $\sigma$ . Он зависит как от относительного удаления точек наблюдения  $\Delta L_r$ , так и от абсолютного удаления  $L_r$  объекта от наблюдателя. Хотя между этими величинами нет жесткой связи, но для выражения их количественной зависимости обычно используют следующее основное уравнение стереоскопического зрения:

$$\Delta L_r = \frac{L_r^2}{b_r f_r} \sigma,$$

где  $b_r = 65$  мм,  $f_r = 17$  мм — соответственно величины глазного базиса и фокусного расстояния глаза. Чем ближе к наблюдателю расположен объект и, следовательно, больше физиологический параллакс, тем сильнее воспринимается глубина (объемность, рельефность, пластичность) иллюзорного пространственного образа. Однако если физиологический параллакс больше критической величины (около 0,5 мм), то объект воспринимается двоящимся и единый пространственный образ разрушается. Наименьшее значение физиологического параллакса, еще вызывающее ощущение глубины пространства, равно в среднем 0,002 мм. Эта величина называется *остротой стереоскопического зрения*. Ее можно выразить в угловой мере. Она оказывается выше остроты монокулярного зрения. Для различного рода расчетов среднее значение ост-



роты стереоскопического зрения принимают равным 30". При этой величине на *расстоянии наилучшего зрения* (250 мм) улавливается различие двух точек по глубине, равное 0,15 мм.

**Искусственный стереоэффект.** Если на место глаз наблюдателя (рис. 3.6, а) поместить миниатюрную стереокамеру и сфотографировать объект с теми же точками I и II (рис. 3.6, б), то при бинокулярном рассматривании левого Л и правого П снимков полученной стереопары (рис. 3.6, в) в сознании также возникает пространственный образ объекта, который принято называть его *стереоскопической моделью* или *искусственным стереоэффектом*. Пока науке достоверно не известен психофизиологический механизм возникновения этого, открытого почти два века назад, эффекта; здесь остается больше гипотез и догадок. Стереоэффект проще получить с помощью стереоскопа, когда каждый глаз наблюдателя видит не оба, а только один снимок стереопары. Если левый глаз наблюдателя рассматривает левый снимок стереопары, а правый — правый, то через определенное время, которое может достигать десятка секунд, возникает *прямой* стереоэффект. Если же снимки поменять местами, то стереоэффект будет *обратным* — ближние к наблюдателю точки будут восприниматься дальше, а дальние — ближе, т.е. возвышенности на плановых аэроснимках представляются впадинами, а понижения — возвышенностями. К настоящему времени для наблюдения искусственного стереоэффекта предложено множество как простых устройств, так и сложных приборов, основанных на различных принципах раздельного видения глазами левого и правого изображения стереопары. Объемную стереоскопическую модель удастся наблюдать после некоторой тренировки и при рассматривании стереоскопических изображений невооруженными глазами (рис. 3.7).

Для получения стереоскопического эффекта на компьютере используют разноцветные красно-синие очки-фильтры (*анаглифы*), через которые наблюдают на экране стереоскопическую модель, образованную из двух по-разному окрашенных снимков, например левого — красного и правого — синего. Применяют также эклипсные (светозатворные) очки, которые быстро открывают то левый, то правый глаз с одновременным синхронным чередованием кадров левого и правого снимков стереопары на экране дисплея; реже используются очки-поляроиды.

**Псевдостереоэффект.** Основной способ получения снимков для стереонаблюдений заключается в съемке одного и того же объекта (местности) с двух точек, т.е. с пространственного базиса. Однако два снимка, полученных с одной и той же точки, но в разное время, в течение которого взаимное расположение объектов изменилось, также позволяют наблюдать стереоэффект, но иного рода — так называемый стереоэффект смещения (*псевдостереоэффект*) (рис. 3.8). При стереоскопическом рассматривании таких

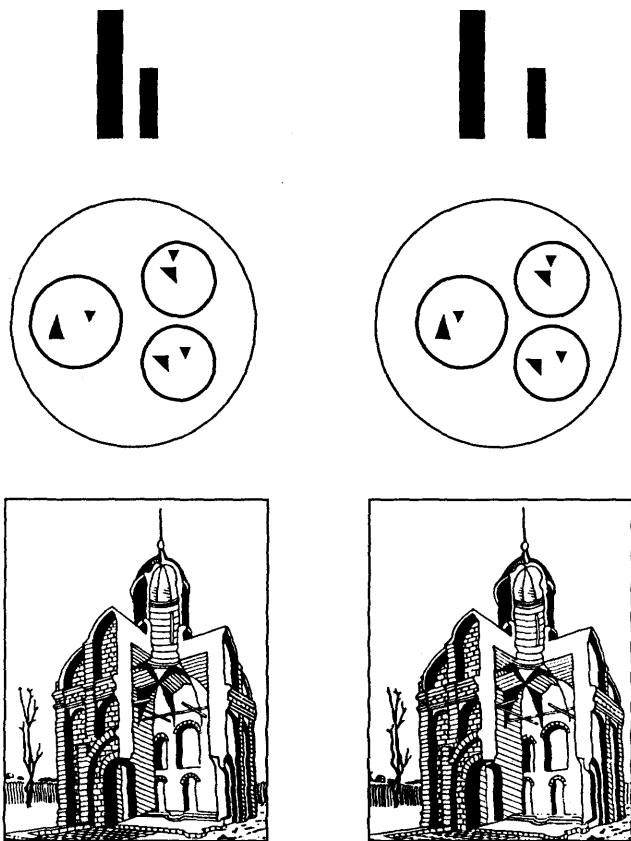


Рис. 3.7. Стереоскопические рисунки для наблюдения без стереоскопа. Для получения искусственного стереоскопического эффекта без стереоскопа следует, рассматривая рисунок, устремить взор вдаль так, чтобы левый глаз смотрел «сквозь» левое изображение, а правый — правое. Вначале начните рассматривать два верхних штриха, которые облегчают слияние изображений и возникновение стереоэффекта. Сосредоточьтесь на центральном изображении, которое должно восприниматься объемным, а на боковые левое и правое изображения не обращайте внимания

снимков неподвижные объекты будут восприниматься лежащими в одной плоскости, а сместившиеся — поднятыми в пространстве над ней. Таким образом, стереоскопический эффект в аэрокосмических методах используется не только для определения пространственной формы и размеров объектов, но и при изучении их динамики.

**Изобразительные свойства стереомодели.** Общеизвестно, что изобразительные свойства стереоскопической модели выше, чем одиночных снимков. Если одиночные снимки стереопары имеют

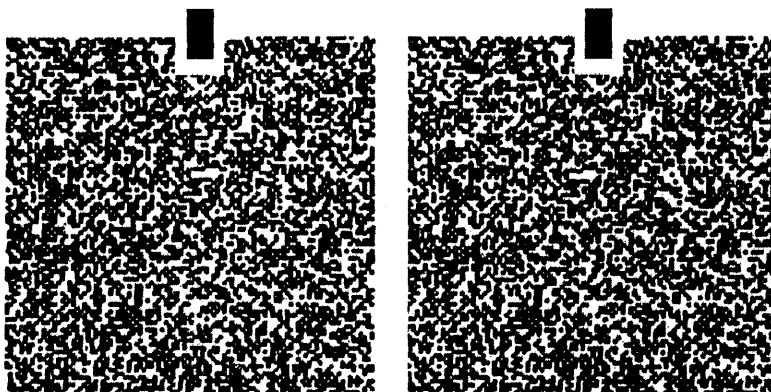


Рис. 3.8. Искусственные стереограммы для иллюстрации псевдостереоэффекта, который обеспечивает визуализацию сдвинутого вдоль глазного базиса на 3 мм квадрата размером  $2,5 \times 2,5$  см в центре стереограммы

разрешающую способность  $R_{\text{сн}}$ , то разрешающая способность стереоскопической модели будет:

$$R_{\text{мод}} = \sqrt{2}R_{\text{сн}}.$$

Поэтому на стереоскопической паре снимков дешифровщик увидит более мелкие детали, чем на одиночном снимке.

Работая с парой снимков, следует учитывать возможное различие вертикального и горизонтального масштабов наблюдаемой стереоскопической модели местности. При использовании плановых снимков, полученных кадровым аппаратом с фокусным расстоянием  $f$ , степень деформации наблюдаемой стереоскопической модели можно оценить по приближенной формуле

$$C = \frac{L_{0r}b}{b_r f},$$

где  $L_{0r}$  — расстояние наилучшего зрения;  $b_r$  — глазной базис,  $b$  — базис стереосъемки в масштабе снимков, который численно равен расстоянию между центрами снимков стереопары.

Приняв  $L_{0r} = 250$  мм и  $b_r = 65$  мм, получим

$$C = 3,6 \frac{b}{f}.$$

Для стереопары аэрофотоснимков с распространенным 60 % продольным перекрытием можно применять еще более простую формулу

$$C = \frac{250}{f}.$$

Например, для снимков, полученных аэрофотоаппаратом с фокусным расстоянием  $f = 70$  мм,  $C = \frac{250}{70} = 3,5$ . Следовательно, при стереоскопическом рассматривании снимков, полученных короткофокусными аэрофотоаппаратами, рельеф местности воспринимается утрированным, что облегчает изучение различных его микроформ. При этом следует учитывать, что при стереоскопическом восприятии таких снимков склоны кажутся значительно круче, чем они есть на самом деле.

При визуальном дешифрировании бывает полезным, используя свойства бинокулярного зрения, наблюдать не только стереоскопические пары снимков, но и пары, составленные из снимков разного цвета (бинокулярное смешение цветов), черно-белого и цветного, резкого (глянцевого) и нерезкого (матового) снимков и т. д.

### 3.1.3. Виды и методика визуального дешифрирования снимков

При визуальном дешифрировании исполнитель распознает объекты на аэрокосмическом снимке, определяет их качественные и некоторые количественные характеристики, выявляет взаимосвязи между объектами, явлениями и процессами, а также закрепляет результаты дешифрирования в графическом виде.

Важный методологический подход при географическом дешифрировании — анализ дешифрируемых объектов в развитии и в неразрывной связи с окружающей их средой. Дешифрирование выполняется по принципу от общего к частному. Аэрокосмический снимок для географа — прежде всего информационная модель изучаемой местности, воспринимаемая как единое целое. Однако при целевом дешифрировании исполнитель обычно сталкивается как с избыточной (лишней) информацией, присутствующей на снимке, так и с недостатком необходимой информации. Еще раз следует подчеркнуть, что дешифрирование аэрокосмических снимков требует определенных знаний и навыков. Чем глубже профессиональные знания исполнителя о предмете исследования, тем точнее, полнее и достовернее информация, извлекаемая из снимка. Результаты визуального дешифрирования, которое является интеллектуальной деятельностью, граничащей с искусством, существенно зависят не только от свойств снимков, но и от опыта, эрудиции, способностей к осмыслению, а нередко и интуиции дешифровщика.

**Технологические схемы дешифрирования.** Дешифрирование снимков, как исследовательское, так и производственное, всегда выполняется целенаправленно. Географы изучают по снимкам геосистемы разных рангов, их компоненты, а также отдельные объек-

ты, явления и процессы, выполняя ландшафтное, геоморфологическое, гидрологическое, гляциологическое и другие виды дешифрирования.

Технология и организация работ по дешифрированию существенно зависят от его задач, территории, масштаба и вида снимков (фотографических или сканерных, тепловых, радиолокационных и др.), от использования одиночных снимков или их серий (многозональных, разновременных). Существуют различные организационно-технологические схемы дешифрирования, но все они включают следующие этапы:

1) знакомство с методическими рекомендациями по данному виду дешифрирования, литературой и картографическими материалами по объекту и району исследований;

2) выявление набора объектов дешифрирования (составление предварительной легенды будущей схемы дешифрирования или карты);

3) подбор снимков для дешифрирования, преобразование снимков для повышения их выразительности, подготовка приборов и вспомогательных средств дешифрирования. Следует иметь в виду, что снимки, оптимальные для решения одной задачи, могут оказаться неэффективными для другой;

4) собственно дешифрирование аэрокосмических снимков и оценка его достоверности;

5) оформление результатов дешифрирования.

Центральным моментом любых работ является собственно дешифрирование аэрокосмических снимков. Тематическое дешифрирование можно выполнять по двум принципиальным логическим схемам. Первая схема предусматривает вначале распознавание объектов, а затем их графическое выделение; вторая схема — вначале графическое выделение на снимке участков с однотипным изображением, а затем их распознавание. Обе схемы завершаются этапом интерпретации, научного толкования результатов дешифрирования. Работая со снимками, особенно с космическими, дешифровщик широко привлекает дополнительный материал, обычно картографический, который служит для уточнения дешифровочных признаков и оценки результатов дешифрирования.

Первая схема оказывается универсальной для решения большинства задач; она получила широкое признание в практике визуального дешифрирования. Вторая схема весьма эффективна при дешифрировании относительно простых объектов по яркостным признакам, но имеет ограниченное применение. Обе эти схемы при компьютерном дешифрировании реализуются в технологиях классификации с обучением и без обучения.

**Дешифровочные признаки.** На аэрокосмическом снимке объекты отличаются один от другого по ряду дешифровочных (демаскирующих) признаков. Выделяют основные признаки, которые

принято делить на *прямые* (простые и сложные) и *косвенные* (цв. вкл. I, 5). Прямые простые дешифровочные признаки — форма, размер, тон (цвет) изображения и тень, а сложный (комплексный) признак, объединяющий выше названные признаки, — рисунок изображения. Косвенные признаки основаны на связях между объектами, на возможности выявления не видимых на снимке объектов по другим объектам, хорошо изобразившимся. Косвенными признаками служат также местоположение объекта, географическое соседство, следы воздействия объекта на окружение.

Каждому объекту присущи особенности, проявляющиеся в прямых и косвенных дешифровочных признаках, которые в общем не постоянны, а зависят от сезона, времени и спектральных диапазонов съемки, масштаба снимков и т. д. Наиболее разработанные для снимков видимого диапазона, эти признаки имеют свои особенности на тепловых и радиолокационных снимках. Так, тон изображения на снимках в видимом диапазоне зависит от яркости объектов, в тепловом инфракрасном — от их температуры, а в радиодиапазоне — от шероховатости поверхности, влагосодержания, геометрии освещения радиолучом. На тепловых инфракрасных снимках отсутствует такой дешифровочный признак, как тень, а на радиолокационных снимках использование структуры изображения равнинных районов осложняется наличием спекл-шумов. В зависимости от конкретных условий меняется относительная значимость дешифровочных признаков, да и сами признаки. Начинаящий исполнитель больше работает с прямыми дешифровочными признаками; умелое использование косвенных признаков — свидетельство высокой квалификации дешифровщика.

При *прямом* (непосредственном) дешифрировании используются прямые признаки. Приведем их характеристики для снимков видимого диапазона.

**Форма** — результативный прямой признак при визуальном дешифрировании. Именно в форме контура заключается основная часть информации об объекте. Антропогенные объекты имеют геометрически правильную, стандартную форму — по прямоугольной форме выделяют сельскохозяйственные поля (цв. вкл. I, 5, а), по перекрещивающимся полосам опознают аэродромы. Объемная форма позволяет распознавать объекты стереоскопически.

**Размер** — признак, используемый главным образом при работе с крупномасштабными снимками. По размеру различают здания разного функционального назначения (цв. вкл. I, 5, б), разделяют поля зерновых и кормовых севооборотов. Оценку размеров в процессе дешифрирования обычно производят путем визуального сравнения с размером известного объекта. Имеют значение как абсолютные размеры, так и их соотношения.

**Тон** (степень почернения) изображения, определяемый яркостью объекта и спектральной зоной съемки, помогает разделить

основные типы поверхности: снег, открытый грунт, растительность. Пятно солнечного блика на снимке нередко указывает на водные объекты. Однако тон — не стабильный признак. Даже при одинаковом освещении один и тот же объект может изобразиться в разных частях снимка разным тоном, и наоборот. Значительно стабильнее соотношение тонов — тоновые контрасты. На многозональном снимке тон одного и того же объекта, воспроизводимого на серии зональных снимков, будет различным. Коррелируя с кривой спектральной яркости, он трансформируется в сложный прямой признак — спектральный образ объекта.

**Цвет** — более информативный и надежный признак, чем тон черно-белого снимка. По цвету хорошо выделяются водные объекты, леса, луга, распаханное поле (цв. вкл. I, 5, в). Используя снимки с целенаправленно искаженной цветопередачей, разделяют различные типы растительности, горных пород и т. д.

**Тень** можно отнести как к прямым, так и к косвенным дешифровочным признакам. На фотографических и сканерных снимках она подразделяется на собственную и падающую. Тень на детальных снимках отражает силуэт заснятого объекта и позволяет оценить его высоту (цв. вкл. I, 5, г). Поскольку тень всегда имеет относительный контраст, значительно больший, чем сам объект, то часто только падающая тень позволяет обнаружить на снимках малоразмерные в плане, но высокие объекты, например заводские трубы. В горных районах глубокие тени затрудняют дешифрирование. Тени существенно влияют на рисунок изображения.

**Рисунок изображения** — устойчивый комплексный дешифровочный признак, обеспечивающий безошибочное опознавание не только таких объектов, как сельскохозяйственные поля, населенные пункты, но и разных типов геосистем. Существуют несколько классификаций рисунков аэрокосмического изображения, в которых их подразделяют, используя термины с одним-двумя прилагательными: зернистые, мозаичные, радиально-струйчатые и т. д. Каждому природно-территориальному комплексу свойствен определенный рисунок на снимке, который отражает его морфологическую структуру (цв. вкл. I, 6). В рисунке изображения различают *текстуру* — форму рисункообразующих элементов и *структуру* — пространственное расположение элементов текстуры. Иногда рисунок изображения характеризуют количественными показателями, что служит основой морфометрического дешифрирования.

При компьютерном дешифрировании обычно под текстурой цифрового изображения понимают пространственную изменчивость значений яркости пикселей, что частично объединяет содержание понятий текстуры и структуры, которые принято различать при визуальном дешифрировании.

**Морфометрическое дешифрирование.** Дешифровочный признак объектов — форма — при дешифрировании обычно определяется

визуально, но более точное разделение объектов по форме возможно на основе ее измерений. Кроме формы отдельных объектов определяют количественные статистические характеристики формы объектов массового распространения и их распределения — они также могут служить признаками определенного типа объектов.

Распознавание и изучение объектов, основанное на определении количественных показателей, характеризующих их форму, размеры, особенности пространственного распределения, рисунок изображения — его текстуру и структуру, называют *морфометрическим* дешифрированием. Способы определения морфометрических показателей, число которых в разных областях исследований измеряется десятками, варьируют от простейших визуально-инструментальных измерений до компьютерной обработки снимков.

Морфометрическое дешифрирование применяется при работе со снимками широкого масштабного ряда — от крупномасштабных аэроснимков до обзорных космических снимков. Оно используется в различных тематических областях исследований. Например, при лесной таксации одну из важных задач оценки насаждений — определение бонитета древостоев (т. е. их качества, запасов древесины) — решают косвенно на основе анализа диаметра крон и сомкнутости полога по крупномасштабным аэрофотоснимкам; статистические показатели этих характеристик получают путем измерения по профилям на стереофотограмметрических приборах.

Другой вид морфометрического анализа снимков, применяемый при геолого-геоморфологических исследованиях, — анализ распределения элементов разломной тектоники (длина, направление, густота линейментов). Получаемые по результатам дешифрирования линейментов розы — диаграммы их распределения служат основой для выделения районов с разным строением фундамента, имеющих различные перспективы для поиска месторождений полезных ископаемых. Для такого анализа снимков широко используются программные средства компьютерной обработки. Близкая задача — районирование территории по интенсивности эрозионного расчленения, например по густоте овражно-балочной сети. Выделение по снимкам районов с разной густотой и глубиной расчленения, углами наклона и экспозицией склонов на основе стереомодели и цифровой модели, создаваемой по снимкам, теперь также обеспечивается компьютерными программами. Более сложно морфометрическое дешифрирование по рисунку изображения, применяемое в ландшафтных исследованиях, поскольку характеристики рисунка труднее формализовать, выразить количественно. Тем не менее изучаются количественные характеристики ландшафтных рисунков для разработки на их основе алгоритмов ландшафтного морфометрического компьютерного дешифрирования.



**Индикационное дешифрирование.** В отличие от прямого при *косвенном* дешифрировании, которое основано на объективно существующей в природе взаимосвязи и взаимообусловленности между объектами и явлениями, дешифровщик определяет не сам объект, который может и не изобразиться на снимке, а его указатель, *индикатор*. В качестве индикатора наиболее часто выступают растительный покров, а также рельеф и гидрография. Косвенные признаки лежат в основе *ландшафтного* метода дешифрирования, базирующегося на многосторонних связях между отдельными компонентами ландшафта, между дешифрируемым объектом и всем природным комплексом. Обычно с уменьшением масштаба снимков роль косвенных дешифровочных признаков возрастает.

На цв. вкл. I, 5 приведены примеры объектов, дешифрируемых по косвенным признакам. Пятна вымокания почв на полях свидетельствуют о развитии просадочного микрорельефа и близком уровне залегания грунтовых вод. Петли и складки поверхностных морен на леднике говорят о том, что это пульсирующий ледник и ожидается его подвижка.

Косвенное дешифрирование с использованием индикаторов называют *индикационным* дешифрированием, при котором по наблюдаемым «физиономичным» компонентам ландшафта выявляются компоненты или процессы, менее доступные для наблюдения. Географическую основу такого дешифрирования составляет индикационное учение (индикационное ландшафтоведение). Особенно большую роль индикационное дешифрирование играет при работе с космическими снимками, когда прямые признаки теряют свое значение из-за сильной генерализованности изображения. На космических снимках равнинных районов в первую очередь отображается внешний, растительный покров земной поверхности, благодаря которому проявляется микрорельеф; по растительности можно судить также о почвах и грунтах. При индикационном дешифрировании составляют так называемые *индикационные таблицы*, где для каждого типа или состояния индикатора указан соответствующий ему вид индицируемого объекта. Такая методика особенно тщательно отработана для гидрогеологического дешифрирования, когда по распространению растительности удастся определить не только наличие, но и глубину залегания, и минерализацию грунтовых вод.

В качестве индикаторов могут выступать объекты, связи которых с исследуемым явлением на первый взгляд не очевидны. Так, неоднократно отмечалось образование линейных гряд кучевых облаков над крупными тектоническими разломами. Полевые геофизические исследования показали, что по таким разломам поднимаются дополнительные потоки тепла, что и объясняет образование облачности, которая, таким образом, может выступать в роли индикатора разломов.

При индикационном дешифрировании возможен переход от пространственных характеристик к временным. На основе выявления *пространственно-временных рядов* по индикационным признакам можно установить относительную давность протекания процесса или стадию его развития. Различные формы аласов на



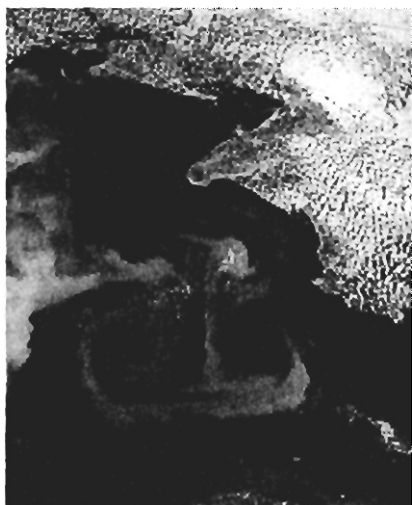
*a*



*б*



*в*



*г*

Рис. 3.9. Трассеры движения:

*a* — срединные морены на поверхности ледника; *б* — песчаные гряды в пустыне, вытянутые по направлению преобладающих ветров; *в* — потоки вод разной мутности, выносимые рекой в море; *г* — фитопланктон на поверхности моря, визуализирующий грибовидное течение

космических снимках в зоне вечной мерзлоты, их соотношение с термокарстовыми озерами индицируют стадии развития мерзлотных термокарстовых процессов, позволяя разделить молодой, зрелый, дряхлый термокарстовый рельеф.

Индикаторами движения водных масс в океане, приповерхностных ветров, льда ледников часто служат массовые объекты (*трассеры*), в совокупности визуализирующие направление и характер движения (рис. 3.9). Их роль могут выполнять битые льды, взвеси, фитопланктон, трассирующие движение вод в море, срединные морены, рисунок трещин или слоистости на поверхности горного ледника. Движение вод хорошо визуализируется температурными контрастами водной поверхности — именно по тепловым инфракрасным снимкам выявлена вихревая структура Мирового океана. Эоловые формы рельефа песчаных массивов и заструги на заснеженной поверхности покровных ледников указывают на преобладающее направление приземных ветровых потоков. Выявляются не только направление, но и некоторые количественные характеристики движения, его скорость. Например, дуги огив на горном леднике, возникающие под ледопадом, перемещаясь вниз вместе со льдом, вытягиваются по оси ледника, указывая на более высокую скорость в средней части по сравнению со скоростью движения льда у бортов ледника, что свидетельствует о ламинарном, а не глыбовом типе движения льда.

**Дешифрирование многозональных снимков.** Многозональный аэрокосмический снимок состоит обычно из 4—6 снимков, полученных в относительно узких спектральных зонах. К этому виду снимков можно также отнести радиолокационные снимки, получаемые как при регистрации отраженных радиоволн разной длины, так и при разной их поляризации. Работа с серией зональных снимков сложнее, чем с одиночным снимком, и дешифрирование многозональных снимков требует использования особых методических подходов. Наиболее универсальный прием — *синтезирование цветного изображения*, включая выбор варианта цветового синтеза, оптимального для решения конкретной задачи дешифрирования. Дополнительные результаты может дать также работа с серией ахроматических (черно-белых) зональных снимков. При этом используются два основных методических приема — *сопоставительное* и *последовательное* дешифрирование.

**Сопоставительное дешифрирование** серии зональных снимков основано на использовании спектральных образов изобразившихся на снимке объектов. Спектральный образ объекта на фотографическом снимке определяется визуально по тону его изображения на серии зональных черно-белых снимков; тон оценивается по стандартизованной шкале в единицах оптической плотности. По полученным данным строится кривая спектрального образа (рис. 3.10), отражающая изменение оптической плотности изоб-

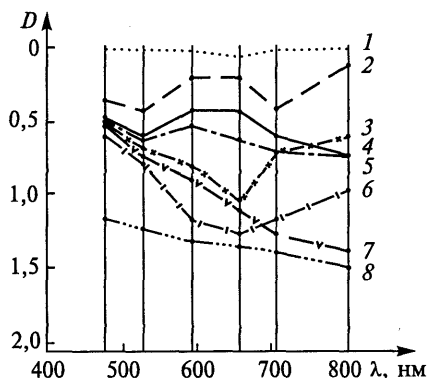
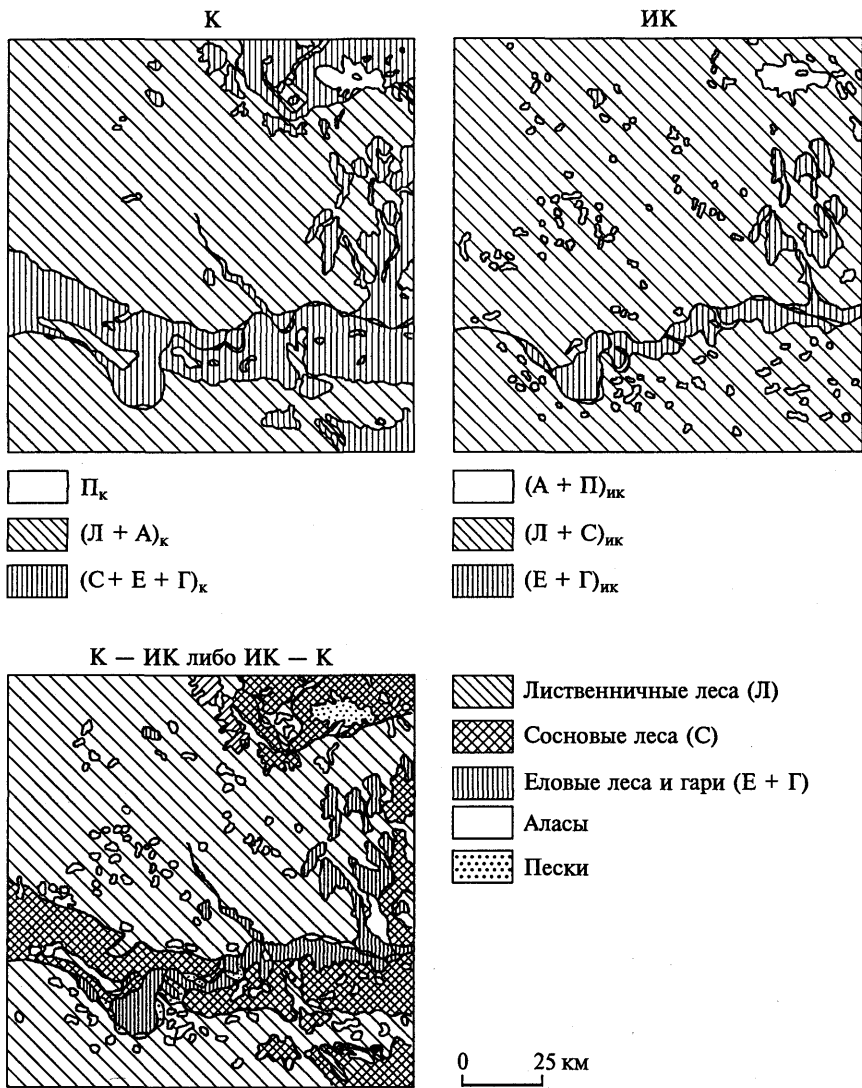


Рис. 3.10. Кривые спектрального образа основных лесобразующих пород и других объектов, полученные по серии фотоотпечатков зональных снимков МКФ-6/Союз-22 (вертикальные линии на графиках соответствуют съемочным зонам):

1 — песок; 2 — луга (аласы); 3 — сосна; 4 — лиственница; 5 — береза, ива, тополь; 6 — ель; 7 — гарь; 8 — вода

ражения на снимках в разных спектральных зонах. При этом откладываемые по оси ординат значения оптической плотности отпечатков  $D$ , в отличие от принятого, вверх по оси убывают, чтобы кривая спектрального образа соответствовала кривой спектральной яркости. Некоторые коммерческие программы предусматривают автоматическое построение графиков спектральных образов по цифровым снимкам. Логическая схема сопоставительного дешифрирования многозональных снимков включает этапы: *определение по снимкам спектрального образа объекта — сопоставление с известной спектральной отражательной способностью — опознавание объекта.*

При дешифрировании контуров на всей площади снимка спектральный образ с успехом используется и для определения границ распространения дешифрируемых объектов, что осуществляется приемами сопоставительного дешифрирования. Поясним их. На каждом из зональных снимков по тону изображения разделяются определенные совокупности объектов, причем на снимках в различных зонах эти совокупности разные. Например, в приведенном на рис. 3.11 примере на снимке в красной зоне (К) темным тоном выделяются совместно сосновые, еловые леса и гари, а в ближней инфракрасной (ИК) — еловые леса и гари. Сопоставление зональных снимков позволяет разделить эти совокупности и выделить индивидуальные объекты, в данном случае — сосновые леса. Такое сопоставление может быть реализовано совмещением («вычитанием») схем дешифрирования зональных снимков, на каждой из которых выделены разные совокупности объектов, или получением по зональным снимкам разностных изображений. Последовательность операций вычитания зональных изображений или схем их дешифрирования может быть записана в виде формул дешифрирования (см. рис. 3.11). Сопоставительное дешифрирование наиболее применимо при изучении растительных объектов, в первую очередь лесов и сельскохозяйственных культур.



**Формулы дешифрирования**

$$A = (A + П)_{ик} - П_{к}; \quad Л = (Л + А)_{к} - A = (Л + А)_{к} - [(A + П)_{ик} - П_{к}];$$

$$C = (Л + С)_{ик} - Л = (Л + С)_{ик} - \{(Л + А)_{к} - [(A + П)_{ик} - П_{к}]\}$$

$$\text{или } A = (A + П)_{ик} - П_{к}; \quad C = (C + E + Г)_{к} - (E + Г)_{ик};$$

$$Л = (Л + С)_{ик} - C = (Л + С)_{ик} - [(C + E + Г)_{к} - (E + Г)_{ик}]$$

Рис. 3.11. Сопоставительное дешифрирование многозональных снимков МКФ-6/Союз-22 для разделения по породному составу лесов среднетаежной зоны (Центрально-Якутская равнина, среднее течение р. Вилюй)

**Последовательное дешифрирование** основано на том, что на снимках в разных спектральных зонах оптимально отображаются разные объекты. Например, на снимках мелководий в связи с различным проникновением лучей разных спектральных зон (К, О, З) в водную среду находят отображение объекты, расположенные на разной глубине, и дешифрирование серии многозональных снимков позволяет выполнять разноглубинный анализ (рис. 3.12).

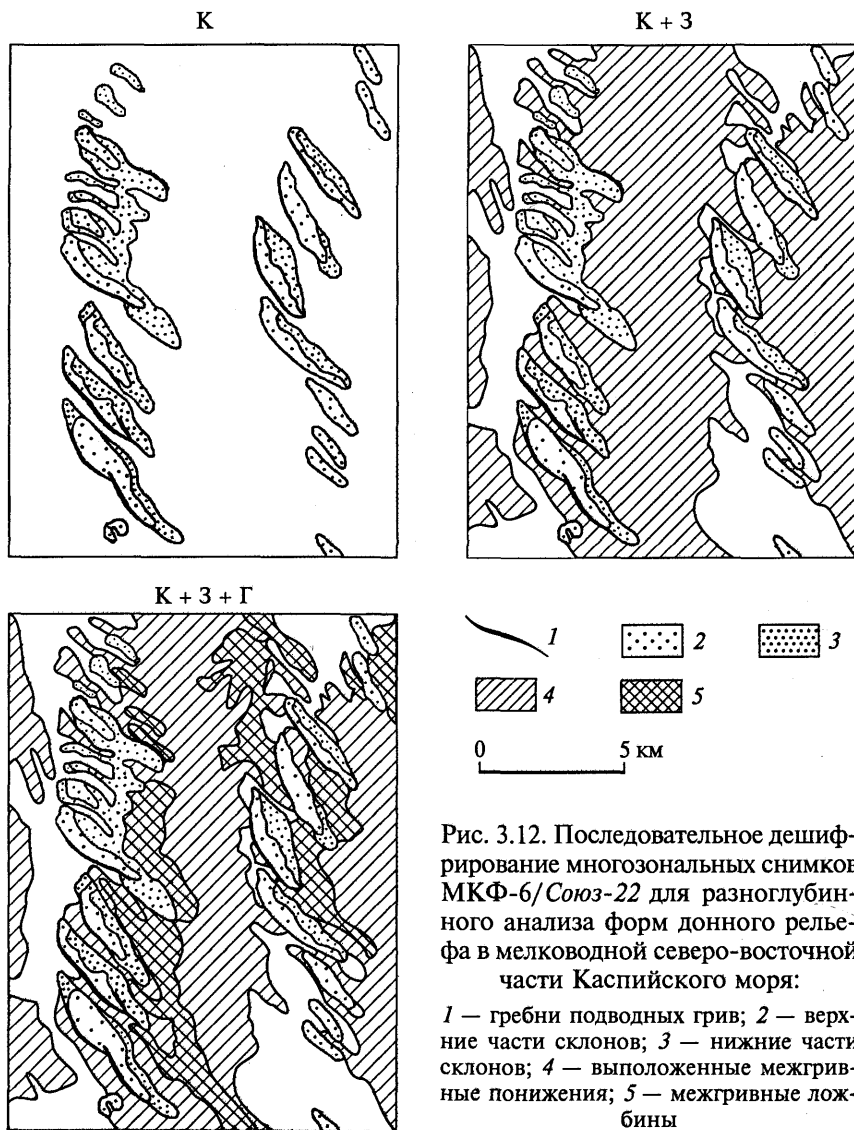


Рис. 3.12. Последовательное дешифрирование многозональных снимков МКФ-6/Союз-22 для разноглубинного анализа форм донного рельефа в мелководной северо-восточной части Каспийского моря:

1 — гребни подводных глив; 2 — верхние части склонов; 3 — нижние части склонов; 4 — выположенные межгрядовые понижения; 5 — межгрядовые ложбины

При последовательном дешифрировании многозональных снимков используется также тот факт, что темные на более светлом фоне контуры растительности в красной зоне благодаря повышению яркости ее изображения в ближней инфракрасной зоне как бы «исчезают» со снимка, не мешая восприятию крупных черт тектонического строения и рельефа. Это открывает возможность, например, при геоморфологических исследованиях дешифрировать по разным зональным снимкам формы рельефа разного генезиса — эндогенного по снимкам в ближней инфракрасной зоне и экзогенного — в красной. Последовательное дешифрирование предусматривает технологически сравнительно простые операции поэтапного суммирования результатов.

**Дешифрирование разновременных снимков.** Разновременные снимки обеспечивают качественное изучение изменений исследуемых объектов и косвенное дешифрирование объектов по их динамическим признакам.

**Исследования динамики.** Процесс извлечения динамической информации со снимков включает выявление изменений, их графическое отображение и содержательную интерпретацию. Для выявления изменений по разновременным снимкам их нужно сопоставить между собой, что осуществляется путем поочередного (раздельного) или одновременного (совместного) наблюдения. Технически визуальное сопоставление разновременных снимков осуществляется наиболее просто их поочередным наблюдением. Очень старый способ «миганий» (фликер-способ) позволяет, например, достаточно просто обнаружить вновь появившийся отдельный объект быстрым поочередным рассматриванием двух разновременных снимков. Из серии снимков изменяющегося объекта может быть смонтирована иллюстративная кинограмма. Так, если получаемые через 0,5 ч с геостационарных спутников в одном и том же ракурсе снимки Земли смонтировать в киноленту-«кольцовку» или анимационный файл, то возможно многократно воспроизвести на экране суточное развитие облачности.

Для выявления небольших изменений оказывается более эффективным не поочередное, а совместное наблюдение разновременных снимков, для чего используются специальные приемы: совмещение изображений (монокулярное и бинокулярное); синтезирование разностного или суммарного (обычно цветного) изображения; стереоскопические наблюдения.

При *монокулярном* наблюдении снимки, приведенные к одному масштабу и проекции и изготовленные на прозрачной основе, совмещают наложением один на другой и рассматривают на просвет. При компьютерном дешифрировании снимков для совместного просмотра изображений целесообразно использовать программы, обеспечивающие восприятие совмещаемых изображений как

полупрозрачных или «открывающие» участки одного изображения на фоне другого.

*Биноклярное* наблюдение, когда каждый из двух одновременных снимков рассматривается одним глазом, наиболее удобно осуществлять с помощью стереоскопа, в котором каналы наблюдения имеют независимую регулировку увеличения и яркости изображения. Биноклярные наблюдения дают хороший эффект при обнаружении изменений четких объектов на относительно однородном фоне, например изменений русла реки.

По разновременным черно-белым снимкам возможно получить и *синтезированное* цветное изображение. Правда, как показывает опыт, интерпретация такого цветного изображения затруднена. Этот технический прием результативен лишь при изучении динамики простых по структуре объектов, имеющих резкие границы.

При исследовании изменений вследствие движения, перемещения объектов наилучшие результаты дает *стереоскопическое наблюдение* разновременных снимков (псевдостереоэффект). Здесь можно оценить характер движения, стереоскопически воспринять границы движущегося объекта, например границы активного оползня на горном склоне.

В отличие от поочередного приема совместного наблюдения разновременных снимков требуют предварительных коррекций — приведения их к одному масштабу, трансформирования, причем эти процедуры часто более сложны и трудоемки, чем само определение изменений.

**Дешифрирование по динамическим признакам.** Закономерности временных изменений географических объектов, для которых характерна смена состояний во времени, могут служить их дешифровочными признаками, которые, как уже отмечалось, называют временным образом объекта. Например, тепловые снимки, полученные в разное время суток, позволяют распознавать объекты, имеющие специфический суточный ход температуры. При работе с разновременными снимками используются те же приемы, что и при дешифрировании многозональных снимков. Они основаны на последовательном и сопоставительном анализе и синтезе и являются общими для работы с любыми сериями снимков.

**Полевое и камеральное дешифрирование.** При *полевом* дешифрировании опознавание объектов производится непосредственно на местности путем сличения объекта в натуре с его изображением на снимке. Результаты дешифрирования наносятся на снимок или прикрепленную к нему прозрачную накладку. Это самый достоверный вид дешифрирования, но и самый дорогой. Полевое дешифрирование может выполняться не только на фотоотпечатках, но и на экранных (цифровых) снимках. В последнем случае обычно используется полевой микрокомпьютер с чувствительным экраном-планшетом, а также специальное программное обеспече-



ние. Результаты дешифрирования отмечаются в поле на экране с помощью компьютерной ручки, закрепляются набором условных знаков и записываются в текстовой или табличной форме в несколько слоев памяти микрокомпьютера. Возможен ввод дополнительной звуковой информации об объекте дешифрирования. При полевом дешифрировании нередко приходится наносить на снимки недостающие объекты. Досъемка производится глазомерным или инструментальным способом. Для этого применяются приемники спутникового позиционирования, позволяющие определять в поле координаты объектов, отсутствующих на снимке, практически с любой необходимой точностью. При дешифрировании снимков масштаба 1 : 25 000 и мельче удобно использовать портативные спутниковые приемники, соединенные с микрокомпьютером в единый полевой комплект дешифровщика.

К разновидности полевого дешифрирования относится *аэровизуальное* дешифрирование, которое наиболее эффективно в тундре, пустыне. Высоту и скорость полета вертолета или легкого самолета выбирают в зависимости от масштаба снимков: они тем больше, чем мельче масштаб. Аэровизуальное дешифрирование результативно при работе с космическими снимками. Однако выполнение его непросто — исполнитель должен уметь быстро ориентироваться и распознавать объекты.

При *камеральном* дешифрировании, которое представляет собой основной и наиболее распространенный вид дешифрирования, объект распознается по прямым и косвенным дешифровочным признакам без выхода в поле и непосредственного сличения изображения с объектом. На практике обычно комбинируют оба вида дешифрирования. Рациональная схема их сочетания предусматривает предварительное камеральное, выборочное полевое и окончательное камеральное дешифрирование аэрокосмических снимков. Соотношение полевого и камерального дешифрирования зависит и от масштаба снимков. Аэроснимки крупного масштаба дешифрируют преимущественно в поле. При работе с космическими снимками, охватывающими значительные площади, возрастает роль камерального дешифрирования. Наземная полевая информация при работе с космическими снимками нередко заменяется картографической, получаемой по картам — топографическим, геологическим, почвенным, геоботаническим и др.

**Эталонное дешифрирование.** Камеральное дешифрирование основано на использовании *дешифровочных эталонов*, создаваемых в поле на типичные для данной территории ключевые участки. Таким образом, дешифровочные эталоны представляют собой снимки характерных участков с нанесенными на них результатами дешифрирования типичных объектов, сопровождаемые характеристикой дешифровочных признаков. Далее эталоны используются при камеральном дешифрировании, которое выполняется способом гео-

графической *интерполяции* и *экстраполяции*, т. е. путем распространения выявленных дешифровочных признаков на участки между эталонами и за их пределами. Камеральное дешифрирование с использованием эталонов получило развитие при топографическом картографировании труднодоступных районов, когда в ряде организаций создавались фототеки эталонов. Картографической службой нашей страны были изданы альбомы образцов дешифрирования различных типов объектов на аэрофотоснимках. При тематическом дешифрировании космических снимков, в большинстве своем многозональных, такую обучающую роль выполняют подготовленные в МГУ им. М. В. Ломоносова научно-методические атласы «Дешифрирование многозональных аэрокосмических снимков», содержащие методические рекомендации и примеры результатов дешифрирования различных компонентов природной среды, социально-экономических объектов, последствий антропогенного воздействия на природу.

**Подготовка снимков для визуального дешифрирования.** Для географического дешифрирования редко используют оригинальные снимки. При дешифрировании аэрофотоснимков обычно применяют контактные отпечатки, а спутниковые снимки желательнее дешифрировать «на просвет», используя диапозитивы на пленке, которые более полно передают мелкие и малоконтрастные детали космического изображения.

**Преобразование снимков.** Для более быстрого, простого и полного извлечения из снимка необходимой информации выполняют его преобразование, которое сводится к получению другого изображения с заданными свойствами. Оно направлено на выделение необходимой и удаление излишней информации. Следует подчеркнуть, что преобразование изображения не добавляет новой информации, а только приводит ее к виду, удобному для дальнейшего использования.

Преобразование снимков можно выполнить фотографически, оптическими и компьютерными способами или при их сочетании. Фотографические способы основаны на различных режимах фотохимической обработки; оптические — на преобразовании светового потока, пропущенного через снимок. Наиболее распространены компьютерные преобразования снимков. Можно сказать, что в настоящее время альтернативы компьютерным преобразованиям не существует. Распространенные компьютерные преобразования снимков для визуального дешифрирования, такие, как компрессия-декомпрессия, преобразование контрастности, синтезирование цветных изображений, квантование и фильтрация, а также создание новых производных геоизображений, будут рассмотрены в разд. 3.2.

**Увеличение снимков.** При визуальном дешифрировании принято использовать технические средства, расширяющие возможности

глаза, например лупы с различным увеличением — от 2х до 10х. Полезна измерительная лупа со шкалой в поле зрения. Необходимость увеличения становится ясной из сравнения разрешающей способности снимков и глаза. Разрешающая способность глаза на расстоянии наилучшего зрения (250 мм) принимается равной  $5 \text{ мм}^{-1}$ . Для различия, например, всех деталей на космическом фотографическом снимке, имеющем разрешающую способность  $100 \text{ мм}^{-1}$ , его необходимо увеличить в  $\frac{100}{5} = 20$  раз. Только в этом случае можно использовать всю информацию, заключенную в фотоснимке. Необходимо учитывать, что получить снимки с большим увеличением (более 10х) фотографическими или оптическими способами не просто: требуются фотоувеличители крупных размеров или очень высокая сложно осуществляемая освещенность оригиналов снимков.

**Особенности наблюдения снимков на экране компьютера.** Для восприятия снимков важны характеристики экрана дисплея: наилучшие результаты дешифрирования достигаются на экранах большого размера, воспроизводящих максимальное количество цветов и имеющих высокую частоту обновления изображения. Увеличение цифрового снимка на экране компьютера близко к оптимальному в тех случаях, когда одному пикселу экрана  $\text{pix}_d$  соответствует один пиксел снимка  $\text{pix}_c$ . В этом случае увеличение  $v$  экранного снимка будет:

$$v = \frac{\text{pix}_d}{\text{pix}_c}.$$

Если известен размер пиксела на местности  $\text{PIX}$  (пространственное разрешение), то масштаб изображения снимка на экране дисплея равен:

$$\frac{1}{M_d} = \frac{\text{pix}_d}{\text{PIX}}.$$

Например, цифровой космический снимок *TM/Landsat* с размером пиксела на местности  $\text{PIX} = 30$  м будет воспроизведен на экране дисплея с  $\text{pix}_d = 0,3$  мм в масштабе  $1 : 100\,000$ . При необходимости рассмотрения мелких деталей экранный снимок с помощью компьютерной программы можно дополнительно увеличить в 2, 3, 4 раза и более; при этом один пиксел снимка изображается 4, 9, 16 пикселями экрана и более, но изображение принимает заметную для глаза «пиксельную» структуру. На практике наиболее распространено дополнительное увеличение 2 — 3х. Для одновременного просмотра на экране всего снимка в целом изображение приходится уменьшать. Однако в этом случае отображаются только каждые 2-е, 3-и, 4-е и т. д. строки и столбцы снимка и на нем неизбежны потери деталей и мелких объектов.

Время эффективной работы при дешифрировании экранных снимков короче, чем при визуальном дешифрировании отпечатков. Необходимо учитывать также текущие санитарные нормы работы на компьютере, регламентирующие, в частности, минимальное расстояние глаз дешифровщика от экрана (не менее 500 мм), длительность непрерывной работы, интенсивность электромагнитных полей, шума и т. д.

**Приборы и вспомогательные средства.** Часто в процессе визуального дешифрирования необходимо произвести несложные измерения и количественные оценки. Для этого применяют различного рода вспомогательные средства: палетки, шкалы и таблицы тонов, номограммы и т. д. (рис. 3.13). Для стереоскопического рассматривания снимков применяют стереоскопы различных конструкций. Лучшим прибором для камерального дешифрирования следует считать стереоскоп с двойной наблюдательной системой, обеспечивающей просмотр стереопары двумя дешифровщиками. Перенос результатов дешифрирования с отдельных снимков на общую картографическую основу обычно выполняют с помощью небольшого специального оптико-механического прибора.

**Оформление результатов дешифрирования.** Результаты визуального дешифрирования наиболее часто представляют в графической, текстовой и реже цифровой формах. Обычно в итоге дешифровочных работ получают снимок, на котором графически выделены и обозначены условными знаками изучаемые объекты. Закрепление результатов дешифрирования выполняют и на прозрачной накладке. При работе на компьютере результаты удобно представлять в виде принтерных отпечатков (твердых копий). По космическим снимкам создаются так называемые *схемы дешифрирования*, которые по своему содержанию представляют фрагменты тематических карт, составленных в масштабе и проекции снимка.

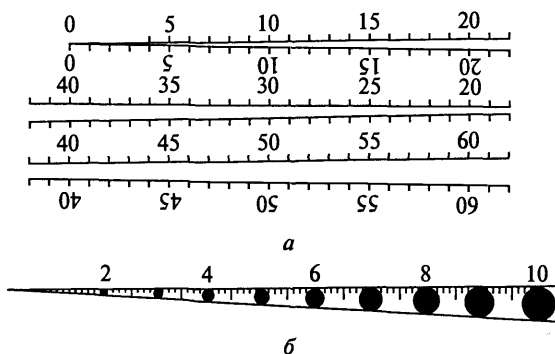


Рис. 3.13. Простейшие измерительные принадлежности:  
 а — измерительный клин; б — шкала кружков

## 3.2. Радиометрические свойства и компьютерная обработка цифровых снимков

### 3.2.1. Радиометрические свойства снимков и компьютерные средства их обработки

**Понятие о цифровом аэрокосмическом снимке.** Компьютерные способы обработки позволяют эффективно извлекать информацию об объектах из цифрового аэрокосмического снимка, определяя зарегистрированную на нем величину отраженного или собственного излучения объекта, т.е. его *радиометрические* характеристики (от англ. *radiance* — сияние, энергетическая яркость).

*Цифровой аэрокосмический снимок* — это упорядоченный массив чисел, визуализируемый в виде двумерных изображений, причем каждое из чисел соответствует определенному элементарному участку земной поверхности (PIX) и функционально зависит от его интегральной яркости. Цифровые снимки хранятся в растровом формате — элементарные участки земной поверхности отображаются на экране компьютера как прямоугольные элементы изображения — пикселы (pix), составляющие регулярную сетку ячеек. В отличие от фотографического изображение цифрового снимка дискретно и его копии идентичны оригиналу.

Цифровые снимки получают двумя основными способами: во-первых, путем цифровой записи при электрической регистрации излучения в съемочных сканерах; во-вторых, путем цифрования (с помощью сканера) ранее полученных аналоговых снимков, прежде всего оригинальных негативов фотографических снимков.

В настоящем разделе рассматриваются методы обработки цифровых многозональных снимков, полученных сканерами при съемке, в том числе с ПЗС-приемниками, а также цифровыми электронными камерами. При соблюдении условий цифрования, рассмотренных ниже, те же методы применимы к многозональным фотоснимкам. Особенности компьютерной обработки радиолокационных снимков не рассматриваются, однако многие описываемые методы обработки, в частности компьютерная классификация, применяются и к этому виду снимков.

**Цифрование фотографических снимков.** При цифровании (сканировании) фотографического негатива непрерывное (непрерывное) изображение дискретизируется, преобразуясь в массив пикселов. Непрерывная последовательность значений оптической плотности заменяется дискретным набором средних для площади каждого пиксела значений. Целесообразно, чтобы при этом сохранялись оригинальный диапазон плотностей и детальность негатива. Исходя из того что оптическая плотность типичного негатива варьирует от 0,05 до 2, что соответствует ослаблению светового потока до 100 раз, необходимо получить не менее 100 уров-

ней яркости цифрового изображения. Требуется также обеспечить линейную передачу между значениями плотности и яркости, чтобы последующие определения значений яркости на компьютере были точными. Чтобы иметь возможность проверить качество и линейность передачи яркостей, негатив следует цифровать вместе с впечатанным в него контрольным фотометрическим клином. Для сохранения детальности снимка размер пиксела при цифровании задается в 2 раза меньше, чем разрешающая способность исходного снимка (например, при разрешающей способности  $50 \text{ мм}^{-1}$  пиксел должен быть  $0,01 \times 0,01 \text{ мм}$ ). Для цифрования используют негативы снимков, по возможности оригинальные. Отпечатки снимков на бумаге использовать для цифрования нежелательно, так как печать на бумаге значительно искажает воспроизведение оптических плотностей и сокращает их диапазон. Для обеспечения надлежащей точности цифрования используют профессиональные фотограмметрические сканеры.

**Радиометрические свойства цифровых снимков.** Напомним, что конструкция большинства оптико-механических, оптико-электронных сканеров и многозональных цифровых камер такова, что в пределах их чувствительности (интервала между минимальным и максимальным уровнем регистрируемого излучения) получают линейную зависимость между цифровыми значениями яркости пикселов снимка и яркостью соответствующих площадок земной поверхности.

Чтобы иметь возможность определить по снимкам физические величины яркости, современные съемочные системы периодически регистрируют излучение от калибровочных ламп на борту, а также от поверхности Солнца и ряда объектов на земной поверхности (например, белых песков), отражательные и излучательные характеристики которых известны. Это позволяет выполнять радиометрические измерения по снимку и проводить количественный анализ, в том числе сравнение значений яркости объектов в пределах одного снимка и на разных снимках.

Чувствительность датчиков сканеров обычно позволяет записывать до 150—250 уровней яркости и более. Погрешность определения значений яркости в пределах одного снимка (одной спектральной зоны) составляет для современных многозональных цифровых съемочных систем  $\pm 1—2 \%$  (погрешность определения относительных значений яркости), а на разных снимках (или в разных спектральных зонах одного снимка)  $\pm 4—5 \%$  (погрешность определения абсолютных значений яркости). Такая точность достаточна для решения большинства географических задач. Ограничения по количеству распознаваемых объектов обычно возникают не из-за недостаточного числа уровней яркости на снимке, а из-за малого объема наземной информации, не позволяющего идентифицировать все потенциально различимые по яркости объекты.

Радиометрические свойства переведенных в цифровую форму путем сканирования фотографических снимков в 2—3 раза хуже. Как было показано в разделе о воспроизведении яркостных градиций на фотоснимках, значения оптической плотности цифруемых негативов связаны с величинами яркости земной поверхности нелинейно. В областях недодержек и передержек на негативе эта связь существенно иная, чем в области нормальных экспозиций. При фотометрических определениях по оригинальным негативам погрешности составляют около  $\pm 5\%$  в пределах одного зонального снимка и  $\pm 15\%$  для разных снимков. При цифровании негативов вносятся дополнительные искажения. Поэтому количество типов объектов, которые можно распознать по оцифрованному фотографическому снимку, значительно ниже, чем по полученному при цифровой сканерной съемке.

**Радиометрическая коррекция цифровых снимков.** Снимки, первоначально получаемые со спутников, записаны в виде так называемых «сырых значений» яркости ( $DN$ , Digital Number). Задачи радиометрической коррекции состоят в приведении этих значений в физические единицы (на основании калибровки); устранении влияния различий освещенности, обусловленных геометрией съемки, атмосферой, рельефом; устранении дефектов изображения.

**Радиометрическая калибровка снимков.** До запуска на орбиту характеристики спутниковой съемочной системы — минимальная и максимальная величина регистрируемого излучения, линейность передачи яркостей в регистрируемом диапазоне — тщательно исследуются в лаборатории для расчета калибровочных коэффициентов и констант. При соблюдении линейного закона передачи значений яркости калибровка многозональных снимков в оптическом диапазоне осуществляется по простому закону:

$$B_{\lambda}^* = K_{\lambda} DN + C_{\lambda},$$

где  $B_{\lambda}^*$  — это энергетическая яркость для спектральной зоны  $\lambda$ ;  $DN$  — «сырые значения» яркости;  $K_{\lambda}$  — калибровочный коэффициент;  $C_{\lambda}$  — калибровочная константа, соответствующая минимальной величине регистрируемой яркости. Значения  $K_{\lambda}$  и  $C_{\lambda}$  распространяются вместе с цифровыми снимками в виде специального калибровочного файла. Для большинства современных съемочных систем проводится периодическая калибровка на борту спутника, по внутренним или внешним калибровочным объектам, что позволяет периодически обновлять  $K_{\lambda}$  и  $C_{\lambda}$ . Обновленные значения поставляются со вновь полученными снимками, публикуются в научной и специальной литературе и в сети Интернет для всеобщего пользования.

Если требуется количественное сравнение снимков, полученных в разное время, для учета различной освещенности производят пересчет значений спектральной энергетической яркости,

вычисляя отношение  $\rho_\lambda$  отраженного потока излучения к падающему, %:

$$\rho_\lambda = \pi B_\lambda^* D_\odot^2 / (J_{\odot\lambda} \cos Z_\odot),$$

где  $D_\odot$  — расстояние от Земли до Солнца в астрономических единицах на конкретную дату;  $J_{\odot\lambda}$  — средняя солнечная внеатмосферная энергетическая освещенность, Вт/(м<sup>2</sup>·нм);  $Z_\odot$  — зенитное расстояние Солнца (угол, дополняющий высоту Солнца до 90°);  $D_\odot$  и  $J_{\odot\lambda}$  берутся из справочных таблиц, а  $Z_\odot$  — из калибровочного файла, сопровождающего цифровой снимок.

**Радиометрическая коррекция влияния атмосферы.** Как указывалось ранее, на значения яркости, регистрируемые съемочной системой, влияют поглощение и рассеяние излучения в атмосфере. Наиболее простой (хотя и не очень точный) метод коррекции этих явлений в видимом и ближнем инфракрасном диапазоне предполагает, что регистрируемые значения яркости завышены в связи с влиянием атмосферной дымки, причем наиболее сильно в коротковолновой части спектра. Принимается, что значения яркости наиболее темных объектов на снимке (участков глубокой тени в видимой части электромагнитного спектра, глубоких и чистых водоемов в ближней инфракрасной), которые теоретически должны быть нулевыми, полностью определяются дымкой. Они вычитаются из значений яркости всех пикселей снимка соответствующей спектральной зоны.

Более сложный и точный подход подразумевает моделирование прохождения излучения через атмосферу с учетом типов рассеяния в атмосфере и уровня видимости. Так, существует ряд моделей (LOWTRAN, MODTRAN, 5S/6S) и рассчитаны несколько «стандартных состояний атмосферы», учитывающих географическое положение района и сезон съемки, например «лето в умеренных широтах». Для выбора параметров модели могут использоваться данные метеорологических спутников, полученные в день съемки.

Для разработки и уточнения подобных моделей выполняют подспутниковые эксперименты, в ходе которых одновременно со съемкой проводятся наземные измерения отражательной способности объектов и параметров состояния атмосферы, которые затем учитываются при коррекции значений яркости на снимке.

**Другие виды коррекции.** На наземных пунктах приема и в центрах первичной обработки снимков проводят технические коррекции, например взаимную калибровку различных детекторов одной линейки ПЗС, что увеличивает однородность данных и облегчает их обработку. Кроме того, заменяют случайно пропущенные при съемке или передаче данных значения яркости пикселей или строк значениями яркости соседних. Это, конечно, не добавляет новой информации, но облегчает использование снимков.

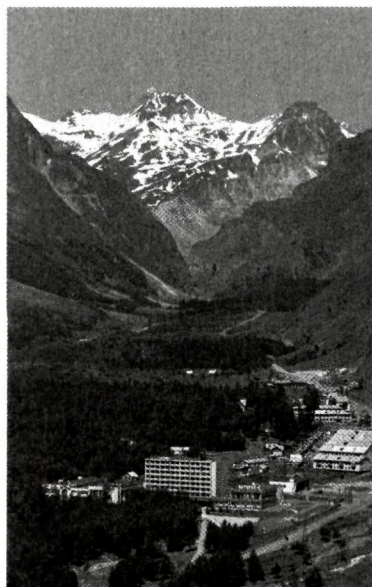


## ЦВЕТНАЯ ВКЛЕЙКА I

### 1. Снимки на разных исторических этапах развития дистанционных методов исследований



Рисованный снимок наступающего эльбрусского ледника Б. Азау (1849)



Фототеодолитный снимок (1981) ледниковой долины в период отступления ледника Б. Азау

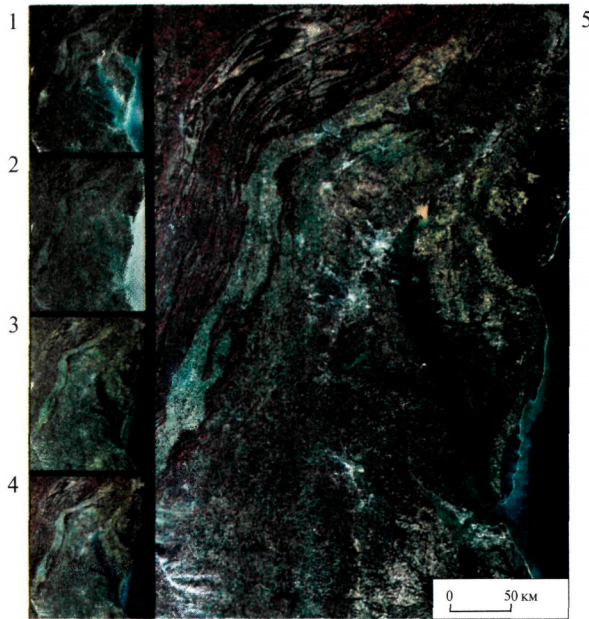


Плановый аэрофотоснимок языка ледника Б. Азау (1957)



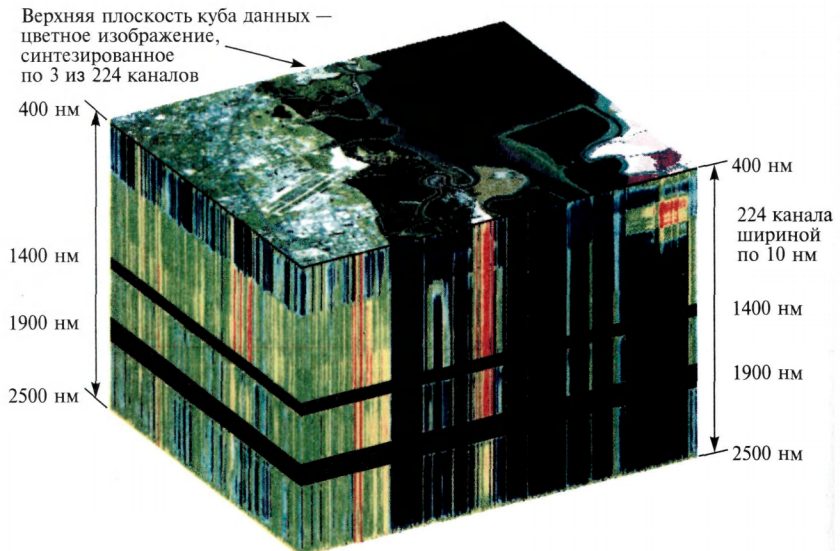
Космический снимок ASTER/Terra юго-западного участка оледенения Эльбруса (2002)

## 2. Влияние индикатрисы отражения на характер изображения местности



Снимки MISR/Terra с разными направлениями съемки (1, 2 — вперед; 3, 4 — назад; 5 — в надир). США, Чезапикский залив, Аппалачи

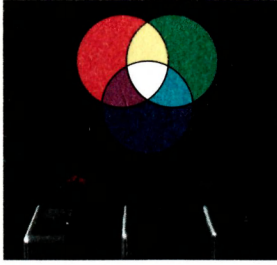
## 3. Гиперспектральный куб



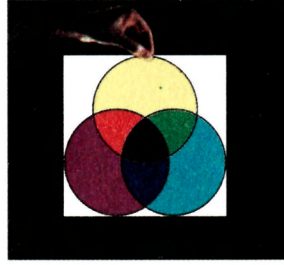
Трехмерное представление материалов гиперспектральной аэросъемки (система AVIRIS)



#### 4. Аддитивный и субтрактивный синтез цвета



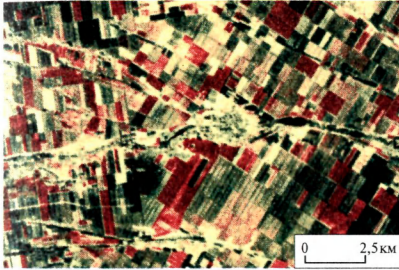
Аддитивный синтез  
дополнительных цветов  
(способ сложения)



Субтрактивный синтез  
основных цветов  
(способ вычитания)

#### 5. Дешифровочные признаки объектов на аэрокосмических снимках

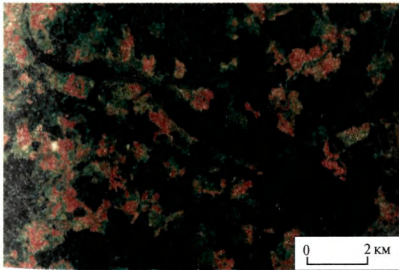
Прямые



Форма



Размер

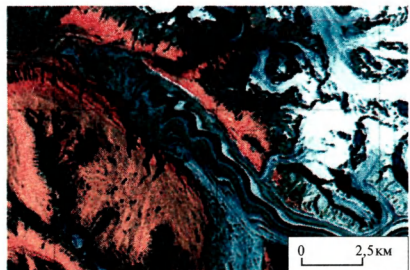
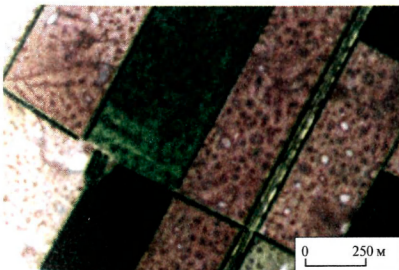


Тон, цвет

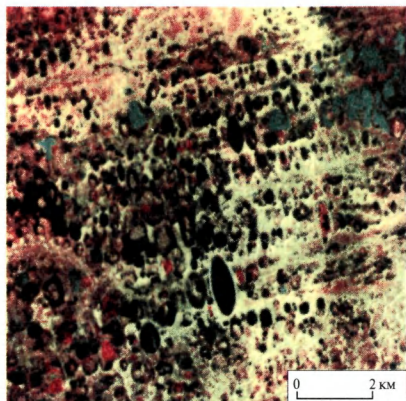


Тень

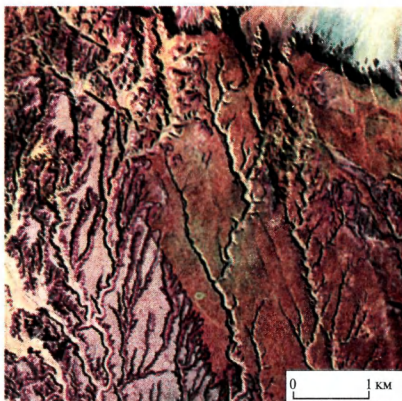
Косвенные



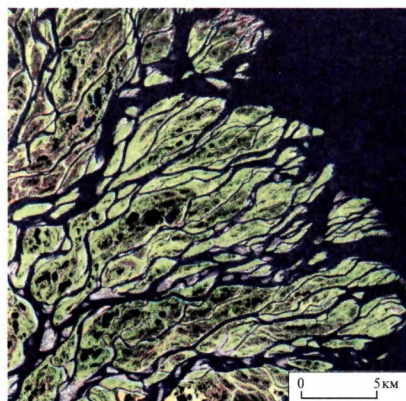
6. Рисунок изображения различных природно-территориальных комплексов



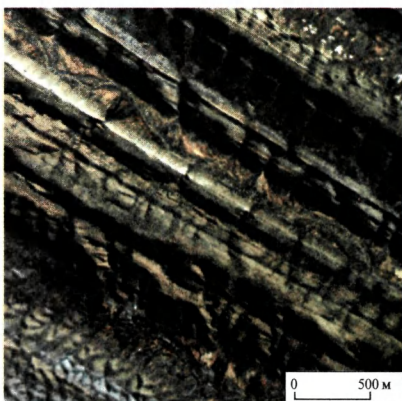
Термокарстовые озера  
в районе многолетней мерзлоты



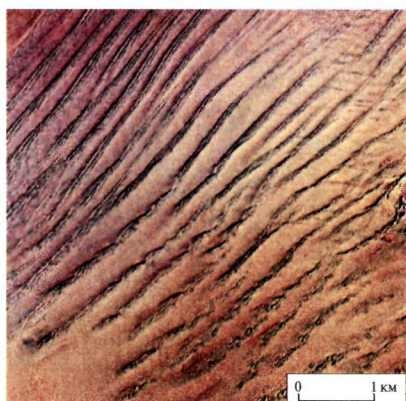
Эрозионное расчленение  
территории



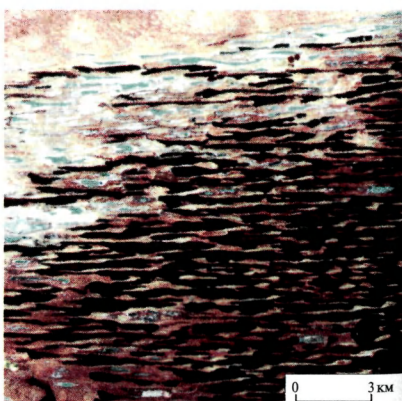
Разветвленная русловая сеть  
дельты



Складки горных пород



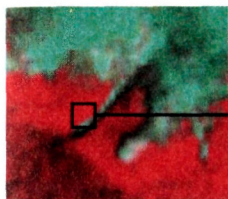
Эоловый рельеф песков



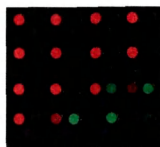
Бэрвские бугры



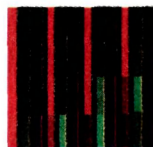
## 7. Отображение цветного синтезированного снимка на экране монитора



Снимок на экране



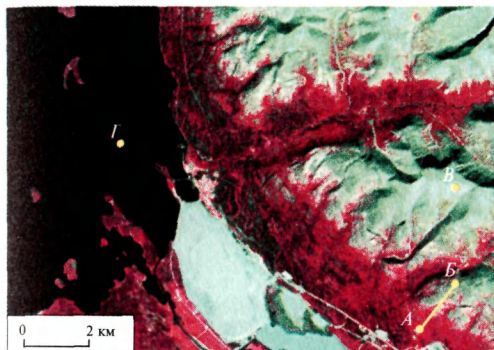
*a*



*б*

Множкратно увеличенный фрагмент изображения на экране с точечными (*a*) и линейными (*б*) люминофорами

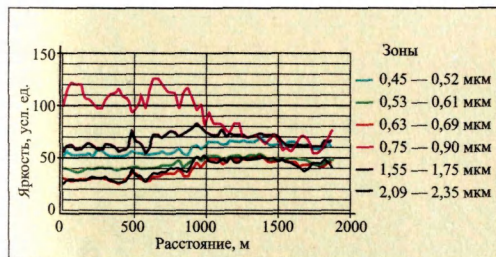
## 8. Определение спектральной яркости на компьютере по цифровому многозональному снимку



Фрагмент снимка



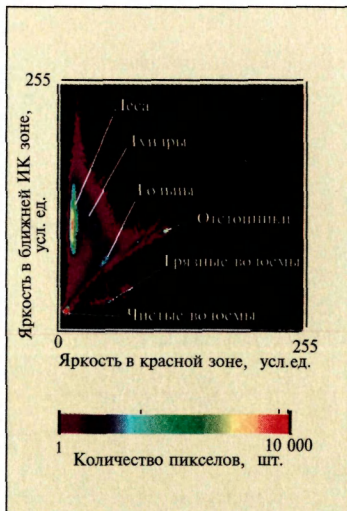
Кривые спектрального образа для пикселей *A*, *B*, *B*, *Г*



Изменение спектральной яркости по профилю *АВ*

Зоны, мкм	<i>A</i>	<i>B</i>	<i>B</i>	<i>Г</i>
0,45 — 0,52	56,00	67,00	85,00	51,00
0,53 — 0,61	41,00	53,00	70,00	30,00
0,63 — 0,69	30,00	53,00	71,00	23,00
0,75 — 0,90	117,00	80,00	67,00	13,00
1,55 — 1,75	64,00	70,00	90,00	10,00
2,09 — 2,35	29,00	41,00	83,00	9,00

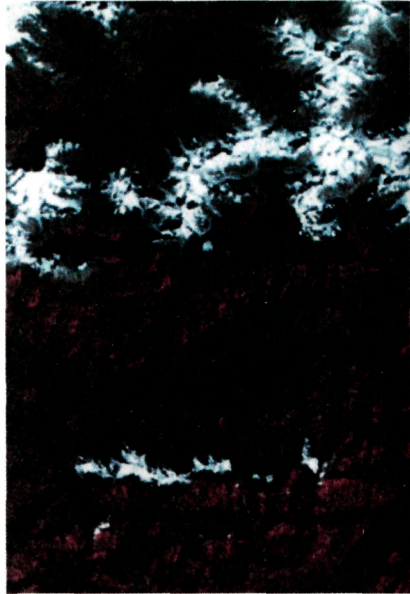
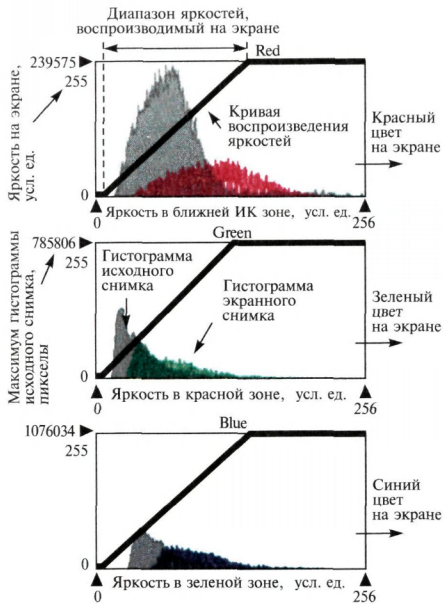
Значения спектральной яркости пикселей *A*, *B*, *B*, *Г*



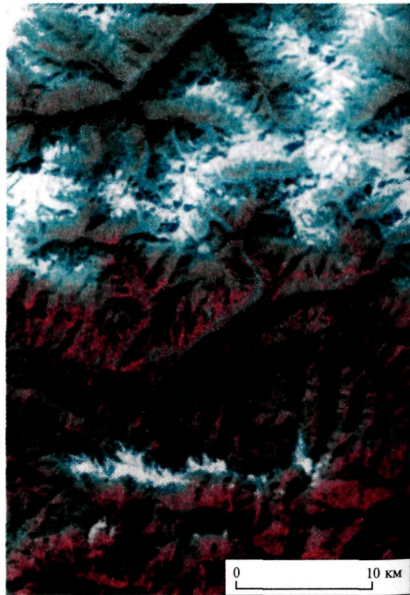
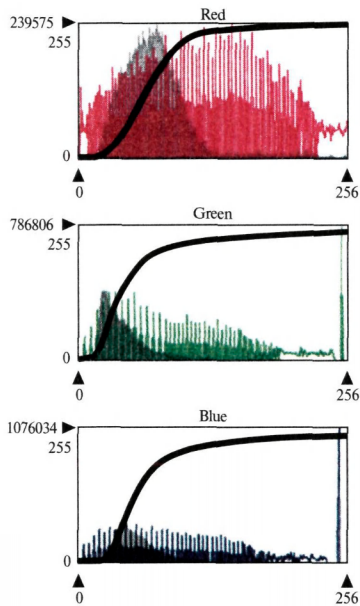
Яркости объектов в пространстве спектральных признаков

Хибины, оз. Имандра, ETM+/Landsat

## 9. Преобразование контрастности



Линейная передача яркости основного диапазона яркостей снимка (а)



Выравнивание контрастности по всему диапазону яркостей снимка (б)

Приэльбрусье, ASTER/Terra

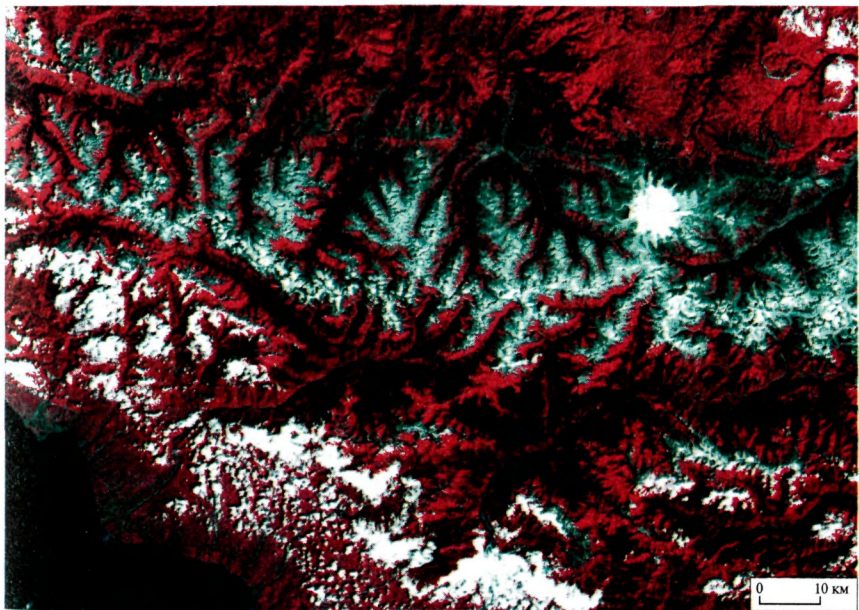
Слева показаны построенные с помощью программы ERDAS Imagine совмещенные графики кривой воспроизведения яркостей, гистограммы яркостей исходного снимка и гистограммы яркостей полученного на экране изображения для каждой из трех спектральных зон, используемых для синтеза цветного изображения



## 10. Варианты цветовой синтеза



Близкая к натуральной цветопередача



Ложная цветопередача с изображением растительности красным цветом

Центральный Кавказ, ETM+/Landsat

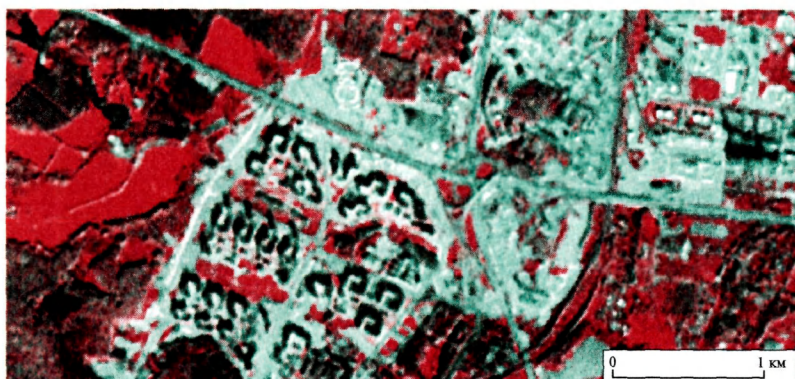
## 11. Синергизм снимков разного разрешения



Многозональный цветной синтезированный снимок  
более низкого разрешения



Панхроматический снимок высокого разрешения



Результат слияния изображений

Микрорайон Северное Бутово, Москва, ETM+/Landsat



## 12. Пространственная фильтрация с помощью скользящего окна



Исходный снимок (а)

$$\begin{array}{|c|c|c|} \hline 1/9 & 1/9 & 1/9 \\ \hline 1/9 & 1/9 & 1/9 \\ \hline 1/9 & 1/9 & 1/9 \\ \hline \end{array} \times \begin{array}{|c|c|c|} \hline 9 & 7 & 5 \\ \hline 9 & 5 & 6 \\ \hline 2 & 8 & 3 \\ \hline \end{array} = \begin{array}{|c|c|c|} \hline & & \\ \hline & 6 & \\ \hline & & \\ \hline \end{array}$$

Принцип расчета (б)

1/9	1/9	1/9
1/9	1/9	1/9
1/9	1/9	1/9



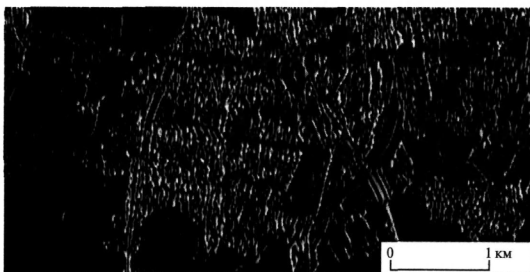
Сглаживание изображения (в)

-1/9	-1/9	-1/9
-1/9	17/9	-1/9
-1/9	-1/9	-1/9



Увеличение четкости изображения (г)

-1/9	2/9	-1/9
-1/9	2/9	-1/9
-1/9	2/9	-1/9

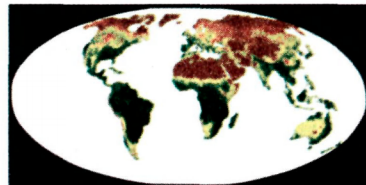
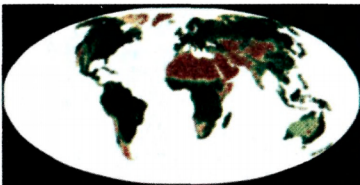
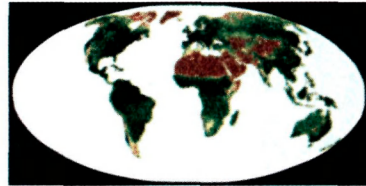
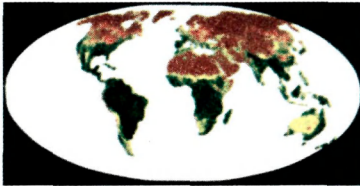


Выделение линейных границ меридионального направления (д)

### 13. Производные изображения вегетационного индекса

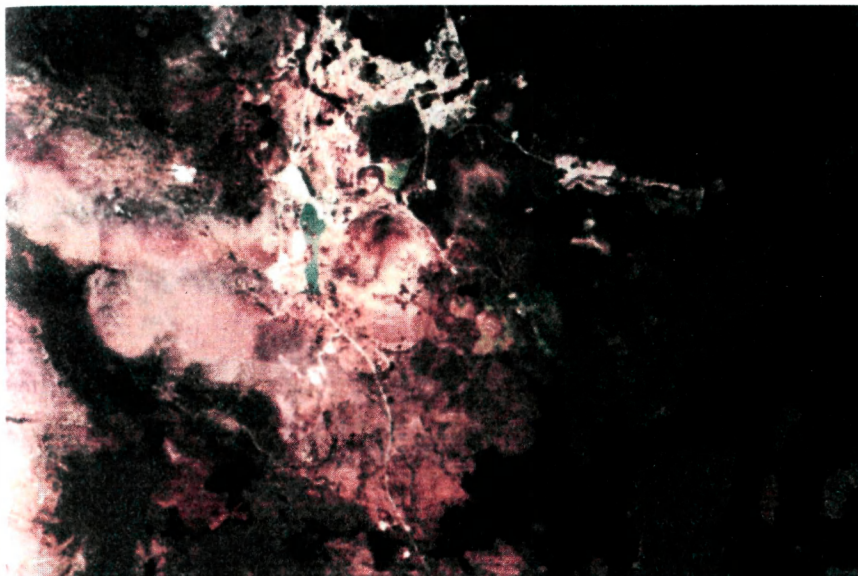


Часть глобального изображения NDVI  
с осреднением за 10 дней (11–20 мая 1998 г.)

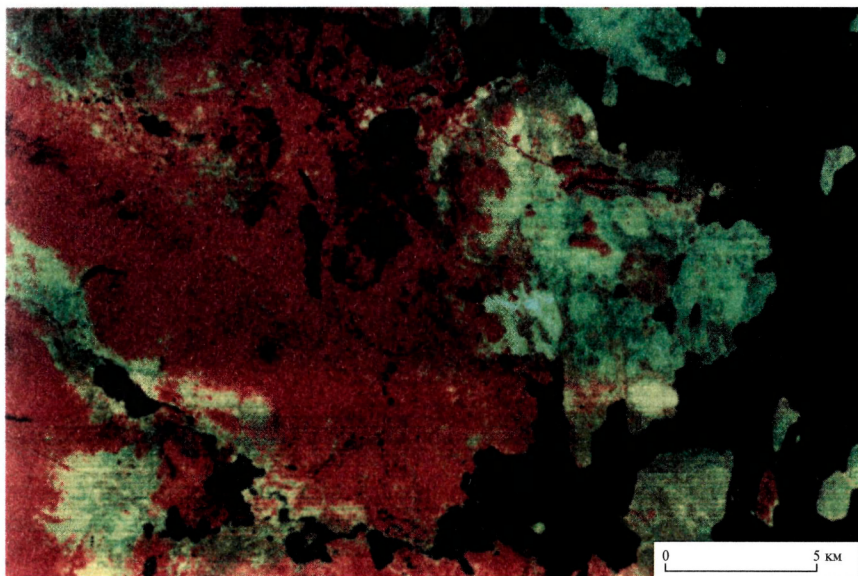


Разносезонные глобальные изображения NDVI

#### 14. Преобразование по методу Каута — Томаса для отображения характеристик растительности



Исходный снимок в естественных цветах

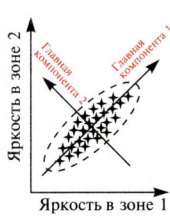


Компоненты «яркости», «зелености» и «влажносодержания»,  
синтезированные в сочетании RGB

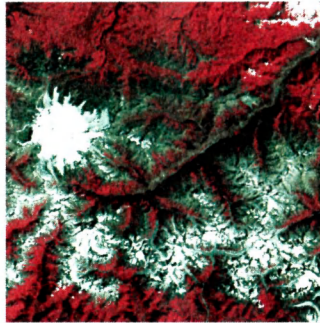
Район Мончегорска, ETM+/Landsat



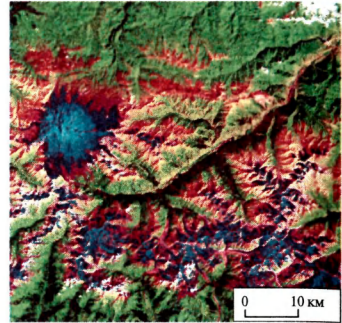
## 15. Преобразование по методу главных компонент



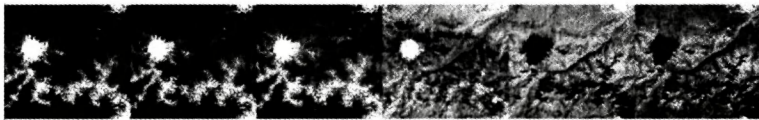
Определение  
положения  
главных  
компонент



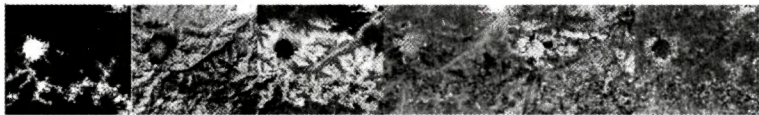
Синтез спектральных зон съемки  
4—3—2



Синтез главных компонент  
1—2—3



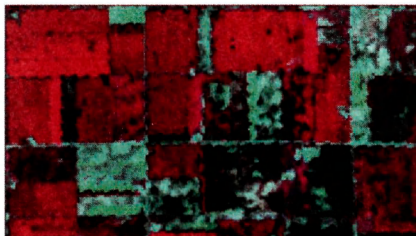
Спектральные зоны съемки



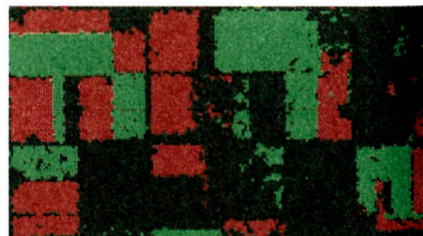
Главные компоненты

Центральный Кавказ, ETM+/Landsat

## 16. Результаты классификации способом параллелепипеда



Исходный снимок



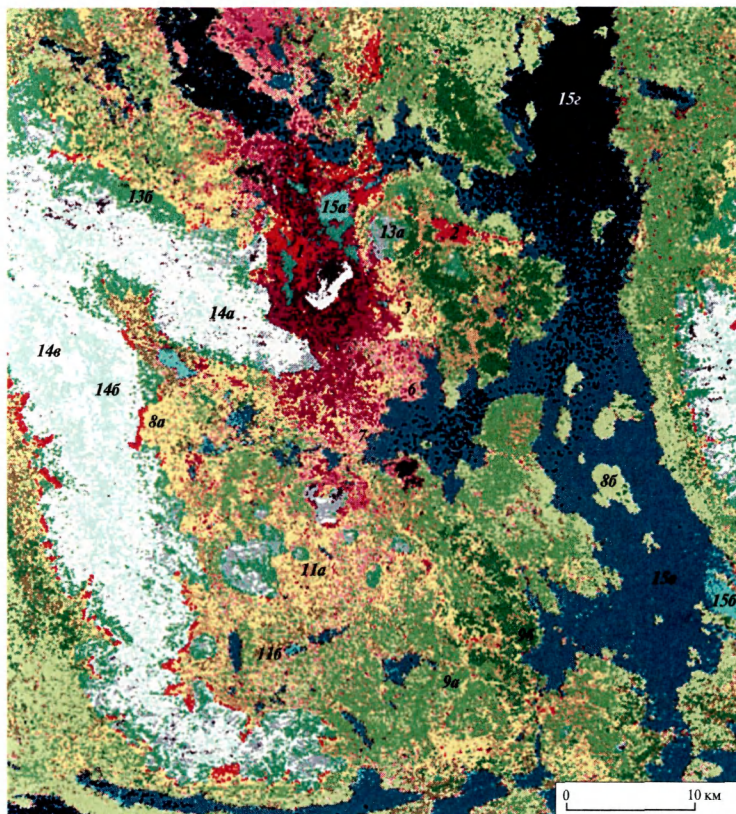
■ соя ■ кукуруза ■ овес

Классифицированное изображение  
сельскохозяйственных полей

TM/Landsat

# 17. Результаты классификации способом максимального правдоподобия

## Карта состояния растительности



**Промышленные, селитебные и сельскохозяйственные территории**

- 1 — жилая застройка и промзоны
- 2 — карьеры
- 3 — сельскохозяйственные земли

**Техногенные пустоши в зоне промышленного воздействия**

- 4 — с полностью уничтоженным почвенно-растительным покровом
- 5 — с почти полностью уничтоженным почвенно-растительным покровом

**Лесная растительность, в разной степени поврежденная промышленными выбросами**

- 6 — сильно поврежденная (доля погибших и поврежденных деревьев 80—100%)
- 7 — существенно поврежденная (60—80%)
- 8 — частично поврежденная (40—60%)
- 8a — с преобладанием хвойных пород
- 8b — с преобладанием лиственных пород
- 9 — слабо поврежденная (до 40%)
- 9a — с преобладанием хвойных пород
- 9b — с преобладанием лиственных пород
- 10 — гари

**Болотная растительность**

- 11 — низинные болота
- 11a — травяные
- 11b — моховые

**Тундровая растительность**

- 13 — каменистые кустарничково-лишайниковые горные тундры
- 13a — поврежденные промышленными выбросами
- 13b — не поврежденные промышленными выбросами

**Каменистые пустыни нивальной зоны (14)**

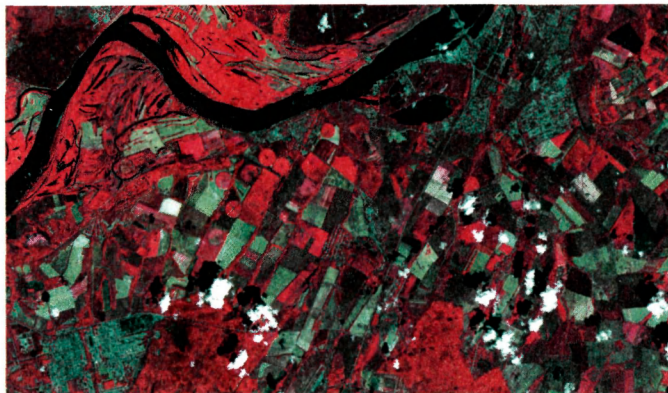
- 14a — каменистые пустыни
- 14b — сочетания каменистых пустынь со снежниками
- 14e — сезонный снежный покров

**Водоёмы (15)**

- 15a — сильно загрязненные
- 15b — средне загрязненные
- 15e — слабо загрязненные
- 15e — не загрязненные



## 18. Результаты кластеризации



Исходный снимок



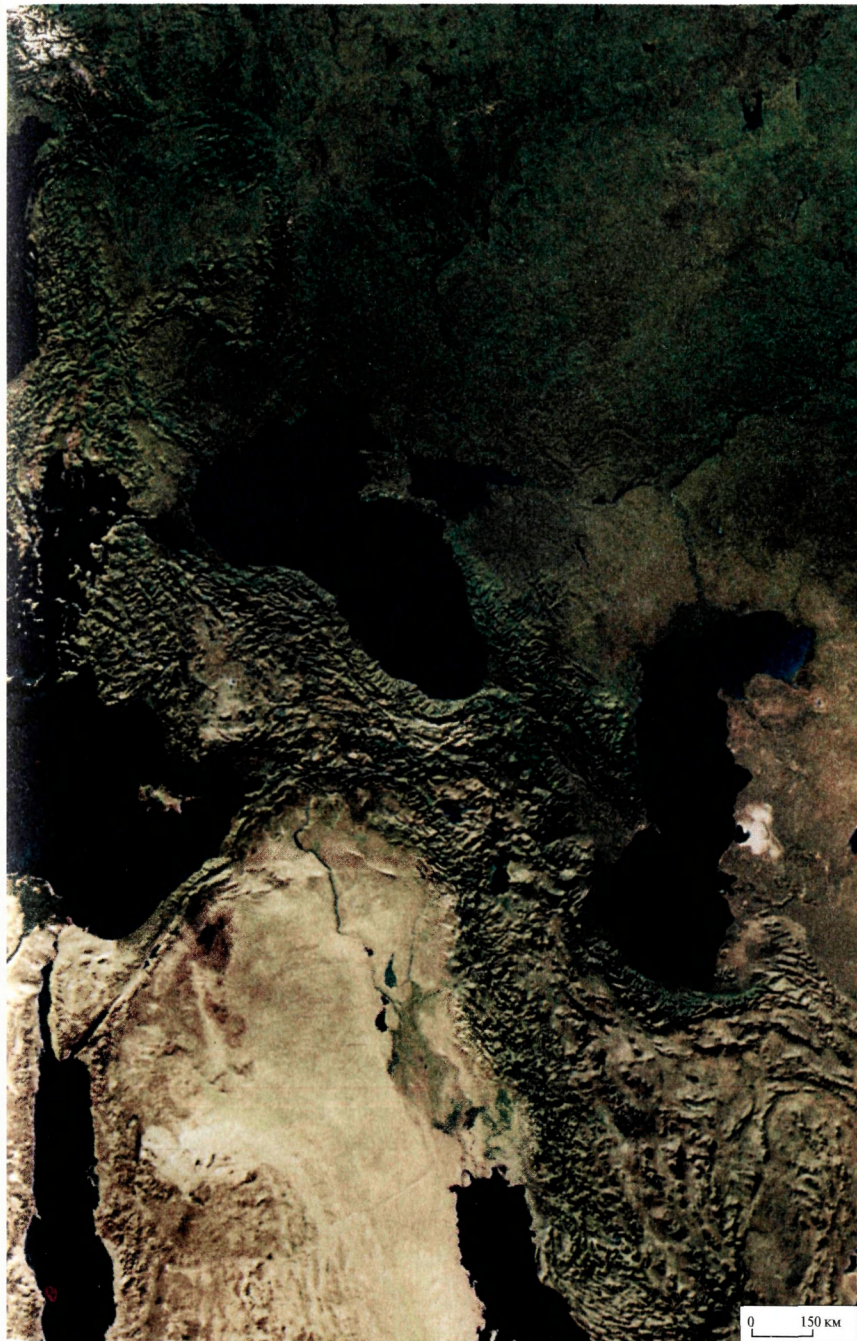
Способ быстрого выделения кластеров



Способ ISODATA

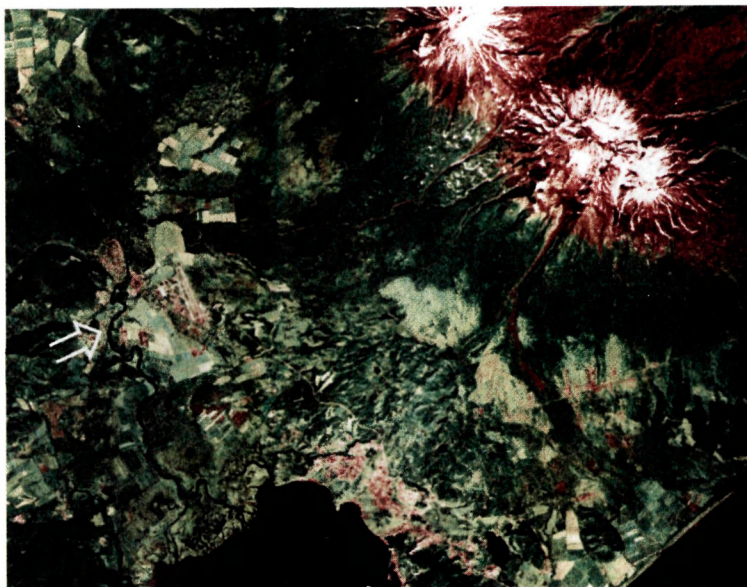
Центральная часть Татарстана, ASTER/Terra

19. Космическая фотокарта, составленная по снимкам AVHRR/NOAA с отмывкой рельефа, выполненной по цифровой модели

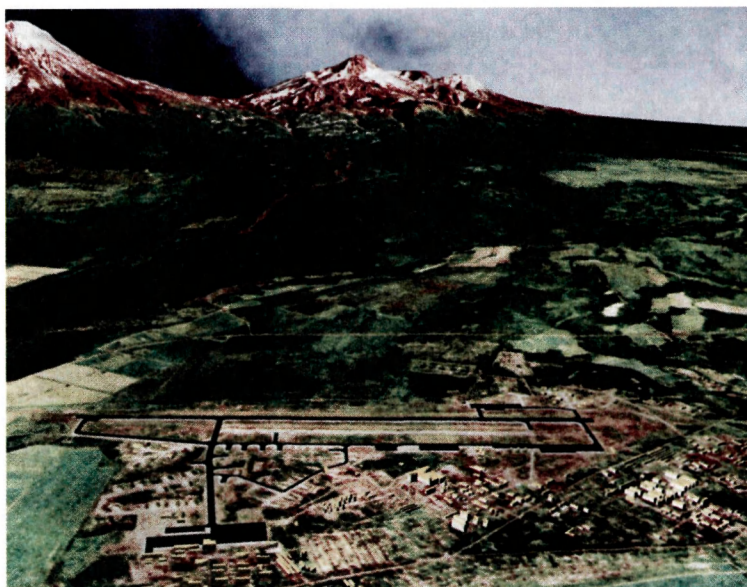




## 20. Трехмерная модель местности



Плановый космический снимок центральной части Камчатки с Корякской сопкой и Авачинским вулканом. КФА-1000/*Ресурс-Ф*



Визуализация 3D модели этого же района в привычной перспективе  
Стрелкой на верхнем снимке показано направление наблюдения при визуализации 3D модели



При получении сканерных снимков обычно проводят их первичную геометрическую коррекцию (трансформирование по орбитальным данным), в том числе устранение искажений, связанных с кривизной и вращением Земли, неравномерностью движения спутника и др. При последующей работе со снимками их дополнительно преобразуют в какую-либо географическую проекцию путем трансформирования по опорным точкам. Принципы трансформирования изложены в разделе о геометрических свойствах и фотограмметрической обработке снимков.

При обработке снимков осуществляют также коррекции влияния рельефа и геометрии съемки на значения яркости, что упрощает количественный анализ значений яркости при сопоставлении снимков горных и равнинных территорий или снимков, полученных при разной геометрии съемки. Для этого требуются параметры геометрии съемки, такие, как азимут и высота Солнца, угол визирования, обычно предоставляемые вместе со снимком, а также цифровая модель рельефа местности.

#### **Характеристики компьютерных систем для обработки снимков.**

Рассмотрим отдельно требования к компьютерному оборудованию для обработки снимков — аппаратному обеспечению — и к программному обеспечению.

**Аппаратное обеспечение.** Основные компоненты компьютера включают: *центральное процессорное устройство* (ЦПУ); *оперативную память* (ОП), хранящую данные и программы, используемые компьютером в текущий момент работы; *жесткий диск* для постоянного хранения данных и программ; управляющие *контроллеры* различных внешних (*периферийных*) устройств для ввода, вывода и представления информации — дисководов, монитора, принтера, сканера, устройств для чтения и записи магнитных лент, устройств воспроизведения звука, стереочков, цифровых камер, карманных компьютеров, приемников глобального спутникового позиционирования (ГЛОНАСС/GPS) и т. п. Возможно подключение такой системы устройств к компьютерной сети (рис. 3.14).

Для обработки снимков наиболее важны следующие взаимосвязанные параметры компьютера:

1. **Быстродействие.** Снимки, как правило, обрабатываются по-пиксельно, а число значений яркости пикселей, особенно в многозональном снимке, достигает сотен миллионов и более. Скорость выполнения команд связана с так называемой частотой процессора ЦПУ, измеряемой в мегагерцах. Типичная частота современного (на начало 2000 г.) процессора в 1500 МГц означает, что за 1 с обрабатывается 1,5 млрд бит (от англ. *bit*, *binary* — двоичный и *digit* — знак, единица информации, используемая для измерения компьютерной памяти). Быстродействие зависит и от скорости передачи данных между ЦПУ, оперативной памятью, жестким диском компьютера, видеопамятью и системами записи данных.

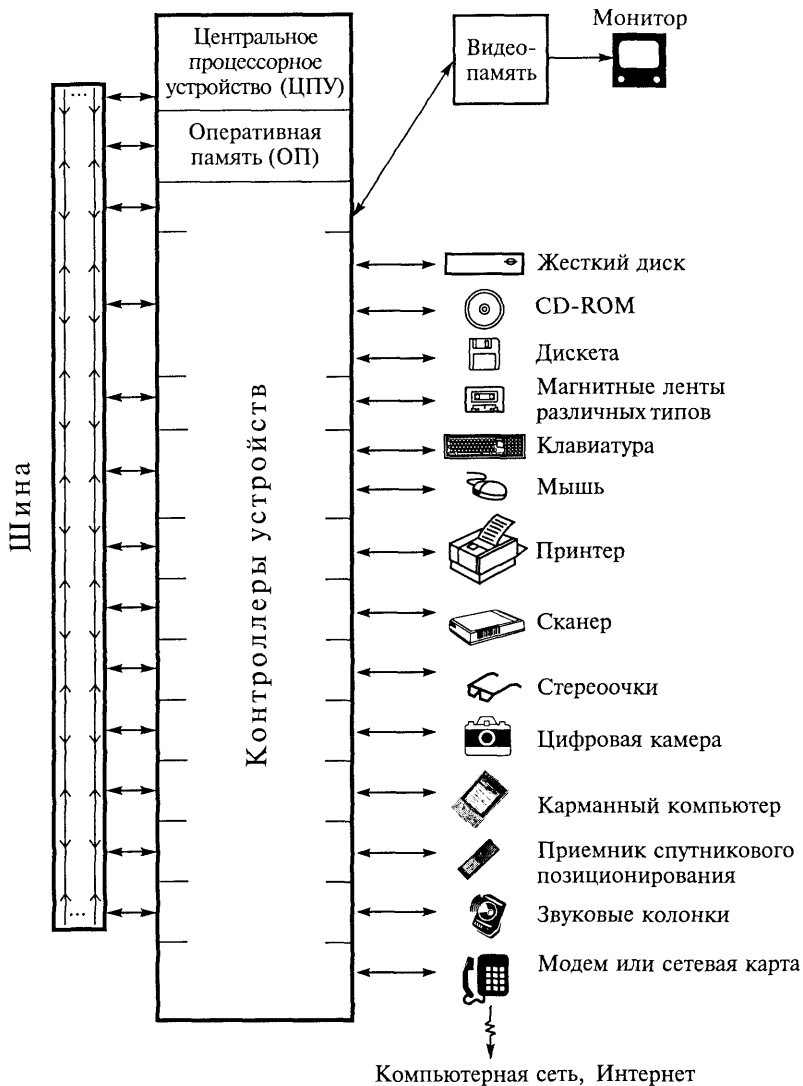


Рис. 3.14. Типичные компоненты и периферийные устройства компьютера. ЦПУ, оперативная память и контроллеры устройств соединены шиной, передающей данные

Передача данных упрощается, если в компьютере имеется специальная оперативная память — кэш, к которой у процессора обеспечен сверхбыстрый доступ.

2. *Объем дисковой и оперативной памяти.* Современные цифровые снимки занимают сотни мегабайт памяти (1 байт = 8 бит, 1 Мбайт =  $2^{20}$  байт). Для хранения снимков и результатов их ком-

пьютерной обработки необходимы в среднем десятки и сотни Гбайт дискового пространства. Объем ОП напрямую определяет скорость обработки снимка, часто он важнее высокой частоты процессора. Желательно, чтобы этот объем был в 3—4 раза больше объема памяти, занимаемой снимком. Физическое положение файла на жестком диске не влияет на время, необходимое для считывания данных. Так же организован доступ к данным на дискетах и на лазерных дисках CD-ROM. Для хранения снимков применяют и магнитные ленты большой емкости (несколько Гбайт): на них доступ к данным организован последовательно, т. е. при считывании файла в середине ленты пролистываются все предшествующие файлы, что замедляет передачу данных. Поэтому основное применение магнитных лент для снимков — хранение архивов и резервных копий.

При работе в компьютерной сети необходимо обеспечить высокоскоростную передачу данных между компьютерами. При этом возможна совместная обработка снимков на компьютерах, находящихся на большом удалении, в том числе соединенных через глобальную сеть Интернет (т. е. через оптоволоконные кабели и телекоммуникационные спутники). Подсоединения же по телефонным линиям с помощью коммуникационных устройств — модемов — характеризуются низкой скоростью передачи данных и для пересылки и обработки космических снимков мало пригодны.

3. *Объем видеопамати* определяет скорость, с которой обновляется изображение снимка при выводе на экран, а *характеристики системы визуализации* (частота обновления изображения, физический размер экрана и количество пикселей в матрице экрана) — удобство работы и качество изображения на экране монитора. Для отображения снимка на экране монитора значения яркости пикселей снимка передаются из оперативной памяти в видеопамать, обеспечивающую быстрое обновление изображения. Затем значения яркости считываются из видеопамати и преобразуются в электрические сигналы, которые передаются на экран и активизируют его светящиеся элементы — люминофоры. Время их свечения невелико, поэтому процесс считывания и активизации экрана постоянно повторяется. Чтобы мигание экрана не мешало работе дешифровщика, частота обновления изображения должна быть не ниже 75 Гц.

**Экранная визуализация и принтерная печать снимков.** Для представления цветных снимков требуется 24 бит (3 байта) видеопамати для каждого пиксела: на каждый из основных цветов (красный, зеленый, синий) приходится 8 бит, что позволяет хранить  $2^8 = 256$  различных значений яркости (от 0 до 255). Триплет значений яркости передается на красный, зеленый и синий люминофоры, входящие в каждый пиксел экрана (рис. 3.15). На экранах старого образца люминофоры пиксела имеют форму круглых то-

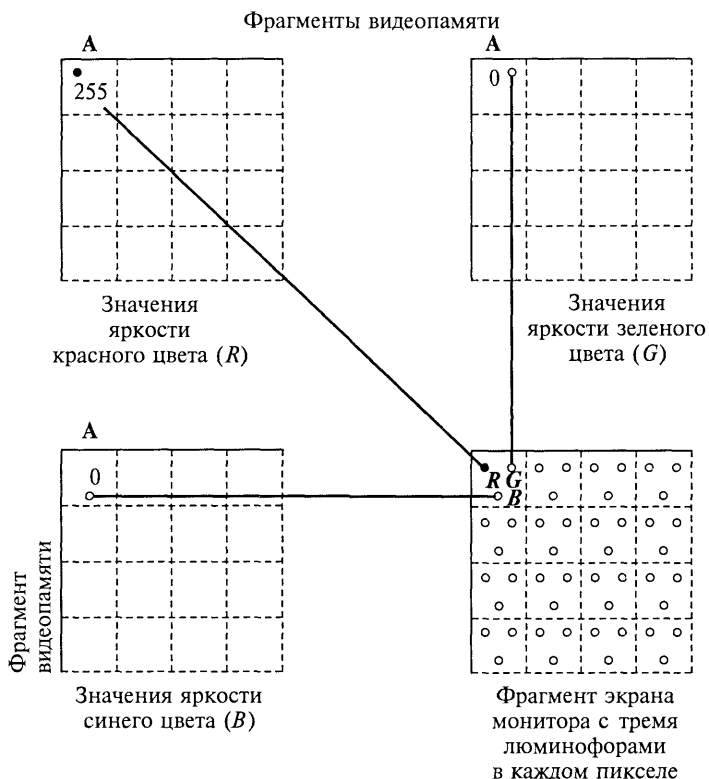


Рис. 3.15. Схема формирования цветного изображения снимка на экране компьютера. Пиксел А со значениями яркости  $\{255, 0, 0\}$  отображается красным цветом максимальной интенсивности

чек, расположенных в вершинах треугольника, а на более современных экранах выглядят как три вертикальные линии. Их свечение сливается для глаза наблюдателя в единый синтезированный цвет (цв. вкл. I, 7). При этом теоретически можно получить  $256^3 = 16\,777\,216$  возможных оттенков цветов, хотя глазом четко различимы всего около 200. Черно-белые снимки на современных экранах отображаются при одинаковых значениях яркости для всех трех основных цветов. Например, серый цвет средней яркости изобразится, если передать на экран значения яркости  $\{127, 127, 127\}$ .

Опыт показывает, что для комфортного визуального дешифрирования снимка на экране важно использовать экран размером не менее 17 дюймов (43 см) по диагонали, с матрицей экрана не менее  $1024 \times 768$  пикселей, что соответствует размеру пиксела не более 0,3 мм.

Поскольку результаты компьютерной обработки часто представляются на бумаге, немаловажен способ изготовления прин-

терных отпечатков снимков. Для этого используется *лазерная и струйная* печать. При более распространенной струйной технологии изображение создается с помощью печатающей головки принтера, из которой на бумагу выпрыскиваются микроскопические капельки разноцветных чернил. Различают термические и пьезоэлектрические струйные принтеры. В термических принтерах выпрыскивание чернил на бумагу происходит за счет их расширения при нагревании. В пьезоэлектрическом принтере выпрыскивание осуществляется пьезокристаллом, меняющим свои размеры при пропускании через него электрического импульса. Для пьезоэлектрической технологии характерны высококачественное воспроизведение мелких деталей и оттенков цвета и более низкая скорость печати.

Цветные снимки, как правило, печатают чернилами голубого, пурпурного, желтого и черного цветов, которые составляют основу четырехкрасочной печати субтрактивным способом. Для обозначения такого воспроизведения цветов пользуются английской аббревиатурой СМΥК (С — cyan — голубой, М — magenta — пурпурный, Υ — yellow — желтый, К — условный индекс для обозначения черного цвета). Смешение чернил первых трех цветов в различных пропорциях формирует цвет изображения. Однако смешением цветных чернил практически нельзя получить чисто черный цвет. Кроме того, не удастся геометрически точно совместить идентичные точки разных цветов и в результате черные контуры, получаемые смешением трех цветов, оказываются размытыми. Поэтому для четкого воспроизведения контуров используются черные чернила. В некоторых моделях принтеров используются шесть и более цветов (к традиционному набору добавляются осветленные голубые и пурпурные чернила либо оранжевые и зеленые). Это позволяет лучше передать на снимке тонкие оттенки цвета.

При изготовлении принтерных отпечатков следует учитывать, что всегда цвета отпечатка будут отличаться от цветовой гаммы экранного снимка. Поэтому необходима взаимная калибровка принтера и экрана монитора, для которой имеются специальные компьютерные программы. Еще один важный параметр — разрешающая способность принтера, традиционно измеряемая в dpi. Для высококачественного воспроизведения полутонового снимка необходима разрешающая способность не менее 600 dpi, что соответствует  $12 \text{ мм}^{-1}$  (см. разд. 3.1). Струйные принтеры печатают и с более высокой разрешающей способностью, если используется бумага со специальным покрытием, но это целесообразно только применительно к снимкам очень большой детальности.

**Программное обеспечение** подразделяется на операционные системы и прикладные программы. Первые обеспечивают работу компьютера в целом и базовые функции: доступ к файлам, запуск прикладных программ, управление порядком обращения различ-

ных программ ко внешним устройствам, таким, как жесткий диск и принтер. Среди них наиболее известны системы Windows и Unix, возможности которых примерно одинаковы. Вторые позволяют осуществлять различные операции, нужные пользователю, в том числе специализированную обработку снимков. Прикладные программы обычно создаются на языках программирования высокого уровня, таких, как С и Фортран. Комплексная компьютерная обработка и дешифрирование снимков обычно осуществляются с помощью *пакета* прикладных программ — совокупности нескольких программ, каждая из которых выполняет специализированную операцию, например визуализацию снимка на экране.

К пакетам программ для компьютерной обработки снимков предъявляются следующие основные требования:

а) универсальность: обеспечение полного спектра операций по обработке снимков, либо всех операций для решения определенной задачи (например, компьютерной классификации), а также перевода изображений из одного формата в другой (импорта и экспорта);

б) возможность визуализации: наличие широкого инструментария визуального представления снимков и сопутствующих данных;

в) программируемость: возможность добавления новых функций пользователем, обычно с применением встроенного языка программирования;

г) интегрированность: совместное использование растровых (снимков) и векторных данных (обычно карт), в частности содержащихся в геоинформационных системах; поддержка форматов, используемых в наиболее распространенных ГИС без необходимости импорта-экспорта.

Большое значение придается таким характеристикам, как открытость пакета программ, т.е. возможность встраивания в него дополнительных блоков с использованием общепринятых языков программирования, возможность осуществлять однообразные повторяющиеся операции в автоматическом режиме, а также возможность работы в распределенной сети компьютеров.

Ряд универсальных профессиональных пакетов программ для обработки снимков, например ERDAS Imagine, ENVI, ER Mapper, удовлетворяют большинству перечисленных требований и позволяют проводить комплекс основных операций по обработке разных типов снимков — от радиометрических и геометрических коррекций до классификации и вывода итоговых карт на печать. Основные из этих пакетов разрабатываются коммерческими компаниями и дорогостоящи (на 1—2 порядка дороже среднего компьютера), хотя возможно получение образовательных лицензий для учебных заведений по умеренным ценам.

Специализированные профессиональные пакеты программ удовлетворяют многим из перечисленных требований и осуществ-

ляют комплекс операций в определенной области, например PHOTOMOD (фотограмметрическая обработка снимков для топографического картографирования), MultiSpec (классификация по многозональным снимкам). Это программное обеспечение может быть как коммерческим, так и общедоступным некоммерческим, распространяемым бесплатно.

В последнее время для сложной обработки больших по объему снимков, например для классификации объектов на основе алгоритмов нейронных сетей, используют компьютеры с несколькими процессорами — суперкомпьютеры и особое программное обеспечение, позволяющее эффективно использовать несколько процессоров.

Применяют также программное обеспечение общего назначения: для визуализации снимков, простой обработки и подготовки к выводу на печать — программы графической редакции (Adobe Photoshop, Corel PHOTO-PAINT), для создания описаний и отчетов — текстовые программы-редакторы (MS Word, Word Perfect), для количественного анализа снимков — программы статистической обработки данных (MS Excel), для просмотра и получения снимков по сети Интернет — сетевые программы (MS Internet Explorer, Netscape, ftp). Эти программы распространены наиболее широко и доступны.

**Форматы хранения цифровых снимков.** Формат, в котором хранится файл снимка — это способ его записи для хранения на носителе информации (жестком диске, дискете, CD-ROM, магнитной ленте и т. п.).

В отличие от простых текстов снимки обычно хранятся в бинарном (двоичном) формате, представляемом числом бит. Если значения яркости представлены целыми числами, то они обычно хранятся в 8, 16 или 32-битном формате, если вещественными числами — то в 32 или 64-битном (число бит растет с увеличением необходимого количества десятичных знаков). Для чтения бинарных форматов нужны специализированные программы.

Существует большое разнообразие бинарных растровых графических форматов для хранения различных изображений, которые используются и для снимков, например TIFF, BMP (без потери информации), JPEG, GIF (с потерей информации). Единого общепринятого формата для хранения аэрокосмических снимков нет. Однако в форматах многозональных космических снимков, поставляемых наземными пунктами приема и центрами первичной обработки снимков, есть общие структурные элементы:

а) заголовок в текстовом или бинарном формате, содержащий служебные данные о снимке, например дату и время съемки, тип съемочного аппарата, азимут и высоту Солнца, калибровочные данные, информацию о проведенной предварительной обработке и т. п.;

б) значения яркости для каждого пиксела снимка, записанные одним из трех способов: 1 — все значения в одной спектральной зоне, затем все во второй и т. п. (BSQ — Band Sequential); 2 — построчно — первая строка во всех спектральных зонах, затем вторая и т. п. (BIL — Band Interleaved by Line); 3 — попиксельно — все зональные значения яркости для первого пиксела, затем для второго и т. п. (BIP — Band Interleaved by Pixel).

Большинство пакетов программ для компьютерной обработки снимков обеспечивают чтение наиболее распространенных растровых форматов и перевод из одного формата в другой.

**Компрессия цифровых снимков** («упаковка», «сжатие») — это преобразование, направленное на уплотнение информации, на уменьшение ее объема, выражаемого в битах или байтах. Это необходимо для экономии памяти, требуемой для записи и хранения снимков, при передаче их со спутников на Землю по каналам космической связи с небольшой пропускной способностью, а также для сжатия избыточно детальных изображений, что позволяет быстрее обрабатывать их на компьютере или передавать по сети Интернет.

Компрессия сочетается с *декомпрессией* («распаковкой») — восстановлением исходного изображения. Компрессия может производиться без потерь и с потерей информации. Если на снимке присутствуют однотонные объекты, которые отображаются пикселями с одним и тем же значением яркости, например чистые водоемы, то компрессия без потери информации проводится путем замены повторяющихся одинаковых значений яркости одним значением с указанием числа таких пикселей. Опыт показывает, что при этом виде компрессии объем информации аэрокосмических снимков в среднем уменьшается раза в два, но изображение можно полностью восстановить при декомпрессии. Обычно сжатие без потери информации осуществляют посредством широко используемого для записи изображений формата TIFF. При компрессии с потерей информации изменяющиеся в определенных пределах значения яркости пикселей однотипных участков, например лесных насаждений, застройки, осредняются, а затем для всех пикселей записывается одно это среднее значение и число пикселей. В этом случае объем информации аэрокосмического изображения удастся уменьшить в десятки раз, но при декомпрессии детали изображения уже не восстанавливаются. Так выполняется сжатие изображения в формате JPEG, который используется для изготовления просмотрных космических снимков (quicklook) в Интернете.

**Тенденции развития аппаратного, программного и информационного обеспечения.** Персональные компьютеры быстро совершенствуются, расширяя возможности обработки снимков. Увеличивается быстродействие процессоров, растет их количество, объем дисковой и оперативной памяти; практикуется распределенная об-



работка снимков на нескольких компьютерах благодаря использованию локальных сетей и сети Интернет; увеличивается размер экранов и улучшается их качество; расширяются компьютерные средства для использования стереоизображений и виртуальных трехмерных моделей в процессе дешифрирования. В перспективе возможно голосовое управление программами вместо ручного ввода команд. Увеличивается объем общедоступной справочной цифровой информации, например библиотек эталонных значений спектральных характеристик различных объектов на земной поверхности; появляются новые цифровые топографические и тематические карты на разные районы Земли. Совершенствуются алгоритмы обработки данных и разрабатываются полуавтоматические интерактивные экспертные системы для дешифрирования снимков на основе базы знаний — совокупности решающих правил и базы справочных данных.

**Компьютерное представление объектов в пространстве признаков.** В гл. 2 было дано понятие о двумерном пространстве спектральных признаков. Напомним, что так называют графическое представление соотношения значений спектральных яркостей в двух наиболее информативных спектральных зонах (см. рис. 2.8). Значения яркости для каждого объекта образуют в пространстве признаков характерные области (рис. 3.16). Первый этап компьютерного распознавания объектов по многозональным снимкам сводится к определению границ этих областей, т.е. характерных сочетаний значений спектральных яркостей для каждого объекта. Эти сочетания являются количественным выражением спектральных, или радиометрических, дешифровочных признаков объекта. На втором этапе распознавания проводят *классификацию* — по значениям спектральных признаков каждый пиксел снимка относят к определенному классу объектов.

Подчеркнем, что «сырые значения» яркости (без учета геометрических условий съемки и состояния атмосферы) искажают соотношения между яркостями в разных спектральных зонах, поэтому при распознавании объектов целесообразно использовать абсолютные значения энергетической яркости либо относительные значения коэффициентов спектральной яркости после соответствующей радиометрической коррекции.

Если совокупности значений яркости в двух зонах недостаточ-

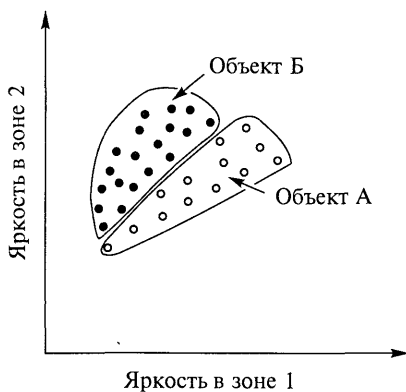


Рис. 3.16. Области, занимаемые объектами А и Б в двумерном пространстве спектральных признаков

но для различения объектов, то при компьютерной обработке используют более двух спектральных зон. Алгоритмы обработки анализируют снимки во всех спектральных зонах одновременно, а для облегчения визуального анализа на экран выводятся двумерные графики пространства признаков попарно для всех спектральных зон.

Введенные ранее понятия спектрального образа и временного образа объекта тесно связаны с пространством спектральных признаков. Кривая спектрального образа объекта — это график характерных для объекта значений яркости во всех зонах, определенных по снимку, как бы «развертка» пространства спектральных признаков для этого объекта. Если для обработки используется совокупность разновременных снимков в единой проекции, то временной образ также является «разверткой» соответствующего пространства временных яркостных признаков для данного объекта. Различие кривых спектрального образа двух объектов, построенных по их средним значениям яркости, позволяет дать предварительную оценку разделимости объектов, а для учета разброса значений яркости для каждого объекта и перекрытия экстремальных значений яркости между объектами следует использовать пространство спектральных признаков.

Компьютерные программы для обработки снимков позволяют автоматизированно строить графики кривых спектрального образа, пространственного изменения значений яркости пикселей и пространства спектральных признаков (цв. вкл. I, 8). По графикам можно проводить визуальный анализ, а измеренные для их построения значения яркости используют как эталонные параметры при автоматизированной компьютерной обработке, в том числе для распознавания объектов. Кроме спектральных для компьютерной обработки привлекают *текстурные признаки*, характеризующие пространственную изменчивость яркостей на снимке, которые также можно представить в своем пространстве признаков.

Далее в разд. 3.2.2 — 3.2.5 рассматриваются основные алгоритмы обработки цифровых снимков: от простых, предназначенных для улучшения визуальной дешифрируемости объектов и распознавания небольшого их количества, к более сложным, предназначенным для автоматизированной классификации большого числа объектов.

### **3.2.2. Преобразование снимков и создание производных изображений**

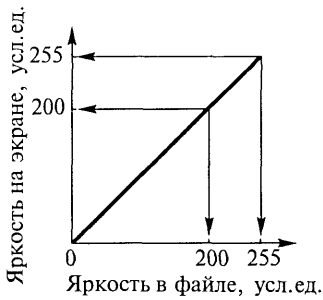
В ходе компьютерной обработки снимков проводят преобразования и получают производные изображения для решения трех основных задач: улучшения изображения экранных снимков для визуального дешифрирования; выявления определенного типа

объектов или получения его характеристик; выявления нескольких (двух-трех) типов объектов или получения ряда характеристик одновременно. Как правило, преобразования выполняются автоматизированно. Дешифровщик задает некоторое количество параметров преобразования, а затем интерпретирует полученные результаты. Из списка задач следует, что *преобразованные* изображения дают специализированную, одностороннюю характеристику местности, изобразившейся на снимке. В этом их отличие от *классифицированных* изображений, дающих более комплексную характеристику местности.

**Улучшение изображения для дешифрирования на экране.** Большая часть преобразований направлена на улучшение качества изображения для визуального дешифрирования на экране. Охарактеризуем наиболее распространенные.

**Преобразование контрастности** снимка основано на регулировании соотношения между яркостью пикселей цифрового снимка в файле и на экране компьютера (либо в файле и на принтерном отпечатке), которое задается специальной функцией — *кривой воспроизведения яркостей*. Ее отображают на графике, по горизонтальной оси которого отложены значения яркости в файле, а по вертикальной оси — значения яркости на экране. Например, для 8-битового изображения значения яркости по каждой из осей будут меняться от 0 до 255 (рис. 3.17). Если кривая воспроизведения яркостей представляет собой прямую линию, идущую из начала координат под углом  $45^\circ$ , то это значит, что все значения яркости из файла отображаются такими же значениями яркости на экране (рис. 3.17, а). Однако общий диапазон яркостей снимка обычно составляет лишь часть максимально возможного. Поэтому следует исключить из рассмотрения значения яркости, не входящие в реальный диапазон яркостей снимка. Кроме того, целесообразно, чтобы наиболее важные для дешифровщика объекты отобразились с хорошей проработкой. Для этого нужно диапазон яркостей этих объектов в файле отобразить более широким диапазоном яркостей на экране, чтобы усилить цветовые различия между деталями. Учитывая эти два обстоятельства, преобразуют прямую в кусочно-линейную ломаную линию или кривую (рис. 3.17, б). В диапазоне яркостей, соответствующем дешифрируемым объектам, кривая воспроизведения яркостей для обеспечения оптимального контраста должна иметь наибольшую крутизну. Значениям яркости, находящимся за пределами диапазона яркостей снимка, в таком случае соответствуют горизонтальные участки кривой и они отображаются одним значением яркости на экране.

Для изменения и выбора оптимальной кривой воспроизведения яркостей целесообразно использовать *гистограмму яркостей* цифрового снимка — график, показывающий по одной оси значения яркости, а по другой — количество пикселей с такими зна-



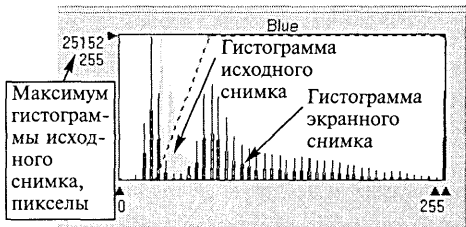
*a*



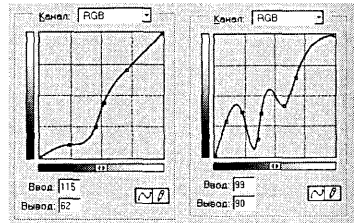
*б*

Монотонно  
возрастающая  
кривая

Произвольная  
кривая



*в*



*г*

Рис. 3.17. Графики кривой воспроизведения яркостей:

*a* — линейная передача значений яркости из файла на экран по максимально возможному диапазону; *б* — кусочно-линейная передача в пределах избранного диапазона. Выбор кривой воспроизведения яркостей: *в* — в программе ERDAS Imagine; *г* — в программе PhotoShop

чениями. Для удобства выбора кривой с помощью программных средств выводят на экран совмещенное изображение гистограммы яркостей исходного снимка и кривой воспроизведения яркостей. Программы обработки снимков позволяют вручную задавать произвольную форму кривой. Они также выводят на совмещенный график получаемую при таком варианте кривой гистограмму экранного снимка, по которой можно судить, сколько пикселей соответствует каждой градации яркости на экране (рис. 3.17, *в*). Чем равномернее распределяются пиксели на гистограмме, тем больше оттенков можно различить на экранном снимке. Программы графической редакции, такие как PhotoShop, тоже позволяют изменять форму кривой воспроизведения яркостей, но не дают контрольного совмещения с гистограммами (рис. 3.17, *г*). Желательно, чтобы эта кривая монотонно возрастала, т.е. с увеличением значений яркости в файле росли бы значения яркости на экране. Иначе, если на кривой есть выраженные минимумы, то диапазоны яркостей, соответствующие разным объектам, изобразятся одинаковым цветом на экране. Произвольные кривые,

имеющие минимумы, используют только в полиграфии для повышения локального контраста изображения.

Форму кривой воспроизведения яркостей можно задавать вручную на основе опыта работы или использовать способы, рекомендуемые программами обработки снимков. Например, можно задать линейную передачу яркостей в пределах их реального диапазона на снимке. Для цветного изображения, синтезируемого на экране из многозонального снимка, функция передачи задается отдельно для каждой спектральной зоны в соответствии с ее диапазоном яркостей (цв. вкл. I, 9, а).

Широко используется и другой алгоритм, когда каждому значению яркости изображения на экране ставится в соответствие примерно одинаковое количество пикселей исходного снимка. В результате пиксели с исходными значениями, редко встречающимися на снимке, объединяются в группы одного тона, а пиксели с часто встречающимися значениями, напротив, изображаются с более дробным разделением тонов. Таким образом контрастность выравнивается по диапазону яркостей снимка и достигается максимальный контраст по всему изображению (цв. вкл. I, 9, б).

При наличии на изображении больших по площади однотонных объектов (например, облаков, заснеженных участков или водоемов) применяют алгоритмы адаптивного преобразования контрастов, когда анализируется малая окрестность каждого пиксела, в пределах которой меняется контраст. Этот прием эффективен как для подчеркивания мелких деталей путем увеличения контраста, так и для устранения шумов сглаживанием контрастов.

**Синтезирование цветных изображений** на экране компьютера осуществляется аддитивным способом: смешивается свет от зеленого, синего и красного элементов-люминофоров, который включает каждый пиксел экрана. Для обозначения этого способа цветовоспроизведения принято употреблять английскую аббревиатуру RGB (Red, Green, Blue — красный, зеленый, синий). Сущность объектов целесообразно определять по снимкам с натуральной цветопередачей, а разделение объектов и их оконтуривание выполнять по снимкам с преднамеренно ложной цветопередачей (табл. 3.1). Например, широко применяется синтез с окрашиванием изображения, полученного в зеленой зоне спектра, синим цветом, в красной — зеленым, а в ближней инфракрасной — красным. В этом случае растительность изображается красным цветом, обнаженные поверхности — серо-голубым, водные поверхности — синим (цв. вкл. I, 10). Если же окрасить эти зоны в другом порядке, можно получить другие варианты цветового синтеза.

Кроме зональных снимков для синтеза можно использовать и другие снимки, приведенные к единой системе координат, например разновременные, а также производные изображения-ин-

Примеры цветопередачи при синтезировании снимков

Люминофоры	Цветопередача и сочетание исходных спектральных зон	Цвет изображения объектов		
		Растительность	Открытые почвы	Вода
R G B	<b>Натуральная:</b> красная зеленая голубая	Зеленый	Коричнево-серый	Синий
R G B	<b>Ложная:</b> ближняя ИК красная зеленая	Красный	Серо-голубой	Черный
R G B	<b>Ложная:</b> красная ближняя ИК зеленая	Зеленый	Розовый	Фиолетовый

дексы (о них говорится ниже), что позволяет более выразительно выделять определенные виды объектов дешифрирования.

Иногда применяют прием, обратный синтезированию — расщепление сканированных цветных изображений на компоненты RGB. При этом для каждого снимка получают три изображения. Иногда их условно рассматривают как аналоги зональных снимков и применяют к ним алгоритмы обработки многозональных изображений. Необходимо иметь в виду, что такие снимки не содержат информации об измеренных значениях спектральной яркости.

**Синергизм снимков** — это слияние различных изображений, приведенных к единой системе координат, например сканерных снимков в видимом диапазоне и радиолокационных снимков. Наиболее широко применяется синергизм панхроматического изображения высокого разрешения с цветным синтезированным (многозональным) изображением более низкого разрешения. В ходе преобразования пиксела панхроматического снимка придается цвет. При этом создается новый многозональный снимок с таким же количеством пикселей, как на панхроматическом снимке, и, следовательно, с таким же пространственным разрешением, но позволяющий иметь цветное синтезированное изображение (цв. вкл. I, 11). Если участки электромагнитного спектра, охватываемые многозональным и панхроматическим снимками совпадают, то цветовая гамма нового изображения практически соответствует исходному многозональному.

Для этого преобразования используют ряд способов, реализованных в стандартных программах компьютерной обработки сним-

ков, в том числе перевод цветного синтезированного снимка из цветового пространства RGB (красный, зеленый, синий) в пространство IHS (I — Intensity, светлота или яркость; H — Hue, цвет; S — Saturation, насыщенность). Другой распространенный способ синергизма снимков основан на использовании метода главных компонент.

**Квантование** — разновидность преобразования, когда непрерывное полутоновое изображение заменяется дискретным, яркость которого разделена на несколько ступеней. В практике дешифрирования снимков используют квантование равномерное и неравномерное. При *равномерном* квантовании диапазон яркостей снимка делится на равные ступени. Оно используется для дискретизации изображения объектов с плавно изменяющимися характеристиками, например разделения вод с разной степенью мутности (рис. 3.18, *а*), снежного покрова разной загрязненности. *Неравномерное* квантование выполняется для выделения определенных видов объектов, которым соответствуют ступени яркости разной

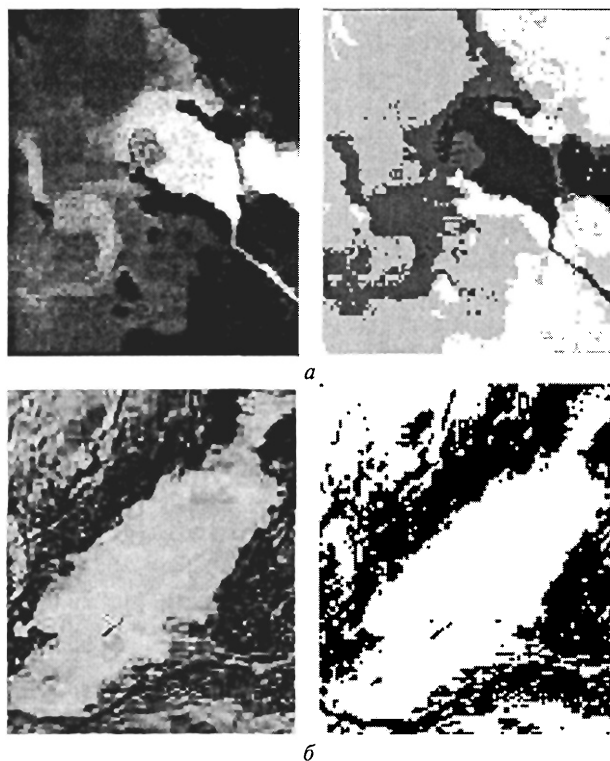


Рис. 3.18. Квантование:

*а* — равномерное (разделение вод по степени мутности); *б* — неравномерное (отделение лесных участков от нелесных по зимнему снимку)

величины. Простейший его случай — бинарное квантование изображения на два уровня яркости по значениям, устанавливаемым дешифровщиком, применяемое, например, для выделения контуров лесов среди заснеженных безлесных пространств на зимнем снимке (рис. 3.18, б). Нередко применяют окрашивание квантованных изображений в контрастные цвета для подчеркивания результатов разделения объектов.

Неправильный выбор ступеней квантования может привести к появлению ложных контуров или объединению в одном контуре разнородных объектов. Чтобы избежать таких ошибок, следует сравнивать кривые спектрального образа, построенные по многозональному снимку для разных участков в пределах одной выделенной ступени, и по возможности проверять границы полученных контуров по достоверным картам или другим источникам на ключевых участках.

**Фильтрация** — преобразование, в процессе которого избыточная для решения определенной задачи информация отсеивается, а необходимая приводится к виду, упрощающему ее использование. Этот вид преобразований применяется для подчеркивания контуров, выделения линейных элементов определенной ориентировки, выявления изменений изображения на серии снимков, а также для ликвидации различного рода помех на изображении, уменьшения влияния атмосферной дымки и т. д. Наибольшее распространение получили два компьютерных способа фильтрации: изменение яркости в «скользящем окне» и преобразование Фурье<sup>1</sup>.

В первом способе на снимке (цв. вкл. I, 12, а) задается прямоугольное окно, например размером  $3 \times 3$  пиксела, в котором выделяют центральный пиксел и пикселы его окрестности. Для центрального пиксела вычисляют новое значение яркости как некоторую функцию от яркостей пикселов окрестности. Затем окно сдвигают на один пиксел и процедура повторяется. В результате получают пикселы изображения снимка с преобразованными значениями яркости. Обычно яркость центрального пиксела в скользящем окне вычисляют как средневесовое из яркостей пикселов его окрестности (цв. вкл. I, 12, б). При этом для каждого пиксела в зависимости от его положения в окне устанавливается свой весовой коэффициент. Принятые значения весовых коэффициентов, которые дешифровщик подбирает с учетом целей преобразования изображения, определяют и характер преобразования. Приведем некоторые простейшие примеры. Если все весовые коэффициенты одинаковы, то происходит осреднение значений яркости в пределах окна, т. е. уменьшение контраста, сглаживание изображения, что приводит к исключению резких и контрастных элементов изображения, затрудняющих его целостное восприятие (цв.

---

<sup>1</sup> Жан Фурье (1768—1830) — французский математик.



вкл. I, 12, в). Наиболее результативен этот прием для устранения спекл-шумов на радиолокационных снимках. Если же для центрального пиксела установить положительный весовой коэффициент, а для его окружения отрицательные, то при расчете средневесового значения центрального пиксела получится большие значения, если яркость центрального пиксела сильно отличается от краевых, и малые значения, если яркости центрального и краевых пикселей похожи (в результате взаимной компенсации отрицательных и положительных весов). Поэтому на новом изображении возрастает яркостной контраст между пикселями и изображение воспринимается как более резкое. Этот вариант фильтрации применяют для подчеркивания границ, уменьшения сглаживающего влияния атмосферной дымки (цв. вкл. I, 12, г). При подборе значений весовых коэффициентов симметрично относительно выбранного направления на изображении выделяются линейные элементы того же направления (цв. вкл. I, 12, д). Возможны и более сложные схемы задания весовых коэффициентов, позволяющие изменять изображения в нужном направлении.

Суть другого способа фильтрации, основанного на преобразовании Фурье, заключается в следующем. Изобразим строку изображения цифрового снимка в виде непрерывного профиля яркости. При преобразовании Фурье этот профиль удастся моделировать совокупностью (спектром) синусоид с различными амплитудами и периодами (частотами) (рис. 3.19). Чем больше на снимке мелких и контрастных деталей, тем больше требуется для его представления синусоид с большими амплитудами и высокими частотами. С помощью специальных приемов можно ис-

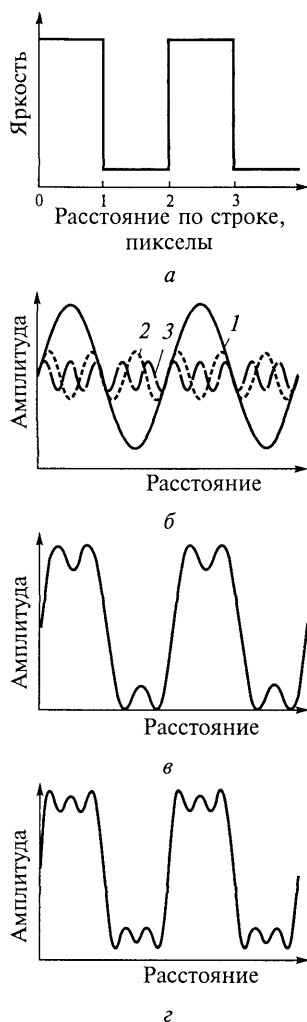


Рис. 3.19. Представление изменений яркостей по строке снимка в виде суммы синусоид:

*а* — исходные значения яркостей на снимке; *б* — спектр синусоид (1, 2, 3) с разными частотами и амплитудами, отображающих изменения яркостей; *в* — кривая яркостей, получаемая суммированием синусоид 1 и 2; *г* — кривая яркостей, получаемая суммированием синусоид 1, 2 и 3

ключить из всего спектра некоторые синусоиды с определенными параметрами, а затем суммированием оставшихся восстановить профиль яркости, который, как и весь снимок, будет отличаться от исходного. Этот способ фильтрации дает хорошие результаты при устранении характерных полос, которые часто наблюдаются на сканерных снимках. Выполнение преобразования Фурье для аэрокосмического снимка требует значительных вычислений, которые можно осуществить только с помощью достаточно мощного компьютера.

В теории обработки изображений развиваются также *вейвлет*-преобразования (от англ. *wavelet* — небольшая волна), направленные на фильтрацию снимков на основе выделения в них компонент разного масштаба и детальности (что достигается сочетанием различных фильтров на основе скользящего окна и выборочного использования строк и столбцов снимка). Перспективна фильтрация снимков на основе теории фракталов и другие.

**Создание простых производных индексных изображений.** Так называемые *индексные изображения*<sup>1</sup>, в которых яркость каждого пиксела определяют на основе индексов, кратко рассмотренных в гл. 2, создают для дешифрирования одного типа объектов или его характеристики. Принцип расчета индексных изображений обусловлен тем, что при изучении объектов по многозональным снимкам часто важны не абсолютные значения, а характерные соотношения между значениями яркости объекта в спектральных зонах. Индексные изображения получают путем простых преобразований снимков на основе арифметических операций со значениями яркости в различных спектральных зонах (их сложения, вычитания, деления, умножения).

**Вегетационные индексы** основаны на отношениях значений яркости в спектральных зонах, наиболее информативных для характеристики растительности. Обычно используют характерный перепад между яркостями растительности в красной и ближней инфракрасной зонах. Чтобы понять принцип работы индексов, обратимся к двумерному пространству этих спектральных признаков. В нем значения яркости растительности образуют характерную область, напоминающую треугольник (рис. 3.20). С увеличением фитомассы и сомкнутости растительности значения ее яркости растут в ближней инфракрасной зоне и падают в красной. Разные виды растительности в различном состоянии будут занимать соответствующие части треугольной области, а изменение характеристик растений при смене фенологических фаз отобразится в ней характерной траекторией — временным образом растительности (см. рис. 2.8, б). Ниже области растительности яркости участков почвы без растительности формируют на графике

---

<sup>1</sup> В книге А. М. Берлянта «Геоиконика» они отнесены к гиперизображениям.

так называемую *линию почв* — гипотетическую линию, которая соответствует яркости открытых почв. Ее осредненное положение определяют, отобразив на графике значения яркости для участков различных почв со снимка и проведя через них аппроксимирующую прямую. Область в нижней части графика, ниже этой прямой, соответствует водным объектам, имеющим минимальную яркость в ближней инфракрасной зоне.

*Вегетационный индекс VI* (Vegetation Index) — это простое зональное отношение:

$$VI = \frac{B_{ик}^*}{B_{к}^*},$$

где  $B_{ик}^*$  — значение яркости в ближней инфракрасной зоне;

$B_{к}^*$  — значение яркости в красной зоне (часто используют также коэффициенты яркости  $r_{ик}^*$  и  $r_{к}^*$ ). Значения индекса изменяются от 0 до бесконечности (рис. 3.21, а). Для зеленой растительности значения  $VI > 1$  и растут с увеличением зеленой фитомассы, сомкнутости растительности. Линия почв соответствует  $VI = 1$  или несколько более высокому значению в зависимости от цвета и влаго-содержания почв (это значение определяют измерениями яркости участков открытых почв на снимке). Использование  $VI$ , помимо



Рис. 3.20. Растительность, почвы и водные объекты в пространстве спектральных признаков



Рис. 3.21. Вегетационные индексы в пространстве спектральных признаков: а —  $VI$ ; б —  $NDVI$ ; в —  $SAVI$ . Пунктиром показано примерное положение линии почв, а серым фоном обозначена область значений яркости растительности

выделения растительности, позволяет уменьшить такие мешающие дешифрированию снимка эффекты, как, например, затененность горных склонов: она понижает уровень яркости примерно одинаково в видимой и ближней инфракрасной части спектра, что при делении зональных значений яркости компенсируется.

Несмотря на достоинства индекса  $VI$ , чаще используют *нормализованный разностный вегетационный индекс*  $NDVI$  (Normalised Difference Vegetation Index) (рис. 3.21, б):

$$NDVI = \frac{B_{ик}^* - B_{к}^*}{B_{ик}^* + B_{к}^*},$$

который аналогичен  $VI$ , но изменяется в пределах от  $-1$  до  $+1$ . Это удобнее для хранения в памяти компьютера и анализа, поскольку заранее известны минимальные и максимальные значения индекса. Для растительности характерны положительные значения  $NDVI$ , и чем больше зеленая фитомасса, тем они выше. На значения индекса влияет также видовой состав растительности, ее сомкнутость, состояние, экспозиция и угол наклона поверхности, цвет почвы под разреженной растительностью. Линия почв соответствует значениям индекса, близким к  $0$ , в диапазоне  $0 \leq NDVI \ll 1$  в зависимости от свойств почв.  $NDVI$  удобен для изучения сезонной динамики растительности, например прослеживания ее фенологических изменений (цв. вкл. I, 13).

При сравнении изображений индексов  $VI$  или  $NDVI$ , полученных для разных регионов, необходимо учитывать, что граница между почвами и растительностью может соответствовать разным значениям индекса, и привлекать для проверки дополнительные данные.

Для снимков территорий с разреженным растительным покровом, где значительный вклад в яркость вносят почвы, используют *вегетационный индекс, скорректированный за почву* —  $SAVI$  (Soil Adjusted Vegetation Index):

$$SAVI = \frac{1}{1 + a_{savi}} \cdot \frac{B_{ик}^* - B_{к}^*}{B_{ик}^* + B_{к}^* + a_{savi}},$$

где  $a_{savi}$  — корректировочный коэффициент, меняющийся от  $0$  для очень густого растительного покрова до  $1$  для очень разреженного. Чаще всего используют  $a_{savi} = 0,5$ . При этом для  $SAVI$  характерна более широкая вариация значений по сравнению с  $NDVI$  (рис. 3.21, в). Дальнейшее усовершенствование  $SAVI$  привело к введению вегетационного индекса, устойчивого к влиянию почвы и атмосферы —  $SARVI$  (Soil and Atmospherically Resistant Vegetation Index). Существуют десятки других вегетационных индексов. Часть из них — это модификация вышеперечисленных (в том числе с использованием других спектральных зон), а часть — более сложные индексы, основанные на биофизическом модели-

ровании и калибровке по наземным данным, например индекс листовой поверхности  $LAI$  (Leaf Area Index), показатель радиации, поглощенной растительностью при фотосинтезе  $FPAR$  (Fraction of Photosynthetically Active Radiation) и др.

**Цветовой индекс для картографирования содержания хлорофилла в океанических водах** вычисляется подобно вегетационным индексам:

$$Chl = a_{Chl} \left[ \frac{B_{\lambda_1}^*}{B_{\lambda_2}^*} \right]^{b_{Chl}},$$

где  $B_{\lambda_1}^*$ ,  $B_{\lambda_2}^*$  — значения энергетической яркости в избранных спектральных зонах;  $a_{Chl}$ ,  $b_{Chl}$  — эмпирически вычисляемые коэффициенты. Используют отношения между яркостями в различных спектральных зонах в голубой и зеленой части спектра, например при обработке данных SeaWiFS/SeaStar 0,443 и 0,555 мкм, 0,490 и 0,555 мкм, а для атмосферной коррекции привлекают также значения в красной и ближней инфракрасной частях спектра.

**Индексы для дешифрирования состава горных пород и почв** вычисляют по значениям спектральной яркости в различных зонах спектра от голубой до средней инфракрасной, например: индекс содержания оксидов железа  $B_{кр}^*/B_{гол}^*$ ; индекс содержания глинистых минералов  $B_{ср.ик1}^*/B_{ср.ик2}^*$ , индекс содержания железистых минералов  $B_{ср.ик1}^*/B_{ик}^*$ . Эти индексы наиболее часто рассчитывают по многозональным снимкам, полученным сканерами ЕТМ+ (Enhanced Thematic Mapper) и ТМ (Thematic Mapper) со спутников *Landsat*, где  $B_{гол}^* = 0,45 - 0,52$  мкм;  $B_{кр}^* = 0,63 - 0,69$ ;  $B_{ик}^* = 0,76 - 0,90$ ;  $B_{ср.ик1}^* = 1,55 - 1,75$ ;  $B_{ср.ик2}^* = 2,08 - 2,35$  мкм.

**Создание сложных производных изображений.** Данное преобразование требуется для выявления нескольких типов объектов или получения ряда характеристик объектов.

**Комбинирование изображений индексов** выполняют, создавая цветные синтезированные изображения с использованием индексных изображений вместо зональных снимков. Такие преобразования применяются для выявления нескольких типов растительного покрова или нескольких минералов в составе горных пород. Например, для выявления различных минералов синтезируют индекс содержания глинистых минералов, индекс содержания железистых минералов и индекс содержания оксидов железа, получая изображение, более ярко и контрастно выделяющее эти минералы по сравнению с исходным снимком.

**Преобразование в пространство характеристик растительности (преобразование Каута — Томаса)**<sup>1</sup> основано на подборе наклона

<sup>1</sup> В честь американских ученых Р. Каута и Г. Томаса (R. G. Kauth и G. S. Thomas), которые первыми в 1976 г. определили параметры этого преобразования для снимков *MSS/Landsat*.

осей координат пространства спектральных признаков, позволяющем оптимально отобразить различия растительности. Как было показано на рис. 3.20, значения спектральной яркости растительности разных типов, находящейся на различных стадиях роста, занимают треугольную область в двумерном пространстве спектральных признаков<sup>1</sup>. Эта область расположена с наклоном по отношению к осям графика соотношения спектральных яркостей, поэтому ни по одной из осей не отображается максимальный диапазон изменения спектральных свойств растительности. Если оси координат развернуть таким образом, чтобы одна из них шла параллельно линии почв, а вторая располагалась ортогонально, то вдоль каждой из осей диапазон значений будет максимальным, что увеличит возможности дешифрирования снимка.

Для определения положения линии почв первоначально использовались эталонные участки почв в США. По ним для сканерных снимков со спутников *Landsat* были рассчитаны и опубликованы коэффициенты разворота для перехода к новым осям. Причем использовали не две, а все спектральные зоны снимков в видимом, ближнем и среднем инфракрасном диапазоне, чтобы наиболее полно охарактеризовать отражательные свойства растительности. Выполняя преобразование Каута — Томаса, спектральные яркости умножают на зональные коэффициенты разворота и эти произведения складывают, получая новую спектральную характеристику. Так вначале рассчитывают новое изображение для оси, параллельной линии почв, затем с другими коэффициентами разворота — для ортогональной оси и т.п., формируя многослойное производное изображение.

Наиболее важными оказались первые три оси пространства характеристик растительности: для снимков ТМ/*Landsat* изображение для оси, параллельной линии почв, интерпретируют как «яркость», для оси, ортогональной к ней, — как «зеленость» (она соответствует контрасту между значениями в видимых и ближней инфракрасной зоне), а для третьей оси — как «влагосодержание» растительности. При синтезе этих характеристик получают цветное изображение, хорошо отображающее свойства растительного покрова (цв. вкл. I, 14). На преобразованном снимке района Мончегорска коричневыми и красно-оранжевыми тонами выделились каменистые тундры и сильно поврежденная растительность, красно-фиолетовыми — промзоны, карьеры, сильно загрязненная вода и техногенные пустоши, розовым — городская застройка, светло-желтыми и светло-зелеными — средне- и слабоповрежденная растительность, фиолетовым — средне- и слабозагрязненная вода.

---

<sup>1</sup> В иностранной литературе преобразование называют также Tasseled Cap transformation («шапочка с кисточкой») в связи с формой, образуемой значениями яркости растительности в многомерном спектральном пространстве.

Поскольку коэффициенты преобразования получены по почвам определенного района, для оценки возможности применения метода требуется сравнение с наземными данными по исследуемому району. С другой стороны, использование одних и тех же (для каждого типа снимков) коэффициентов, опубликованных в литературе и занесенных в базы данных профессиональных программ обработки снимков, позволяет сравнивать между собой преобразованные снимки разных территорий.

**Преобразование по методу главных компонент** имеет более универсальное назначение — это оптимизация изображения для дешифрирования всех типов объектов, изобразившихся на многозональном снимке. При этом, подобно преобразованию Каута — Томаса, осуществляется разворот осей в пространстве спектральных признаков, но не на основе опытных данных, а по параметрам, извлеченным из самого изображения. Для этого на компьютере предварительно строятся графики распределения значений яркости снимка в многомерном пространстве спектральных признаков. Первая из новых осей, или *главных компонент*, проводится в направлении наибольшего разброса значений яркости, вторая — ортогонально ей, третья — ортогонально первым двум и т. д. Если область, в которой на графике сконцентрированы значения яркости снимка, сильно вытянута в одном направлении (цв. вкл. I, 15), то первая главная компонента вберет в себя основную часть яркостных различий снимка, т. е. позволит более экономно описать имеющуюся в нем информацию. Такое расположение значений яркости характерно для большинства природных объектов: растительности, почв, горных пород. Оно означает, что значения яркости этих объектов согласованно меняются в разных спектральных зонах, например у почв последовательно растут с увеличением длины волны. В математике это соответствует понятиям ковариации и коэффициента корреляции.

Коэффициент корреляции значений яркости в двух спектральных зонах пропорционален степени вытянутости области значений яркости вдоль направления наибольшего разброса яркостей на графике; это и используется для расчета углов разворота главных компонент относительно исходных осей координат. У водных объектов яркости группируются компактно в области низких значений, формируя одну из крайних точек оси первой главной компоненты. Разнородная городская застройка может иметь самые разные спектральные яркости, и для нее характерна меньшая корреляция между спектральными зонами.

Если яркости объекта в спектральных зонах непреобразованного многозонального снимка сильно коррелируют, то при синтезировании цветного изображения им отводятся похожие яркости на экране в каналах RGB и снимок беден оттенками цвета: например, водные объекты всегда имеют темный цвет, разные

виды растительности изображаются оттенками похожего цвета, все облака — ярко-белыми. При преобразовании в пространство главных компонент первая компонента, отражающая основной разброс яркостей, ортогональна всем последующим, что соответствует отсутствию корреляции с ними. Поэтому синтез главных компонент снимка дает яркое, контрастное изображение с увеличенным количеством оттенков для прежде визуально однородных объектов. Особенно выразителен синтез первых трех компонент (цв. вкл. I, 15), так как они обычно содержат до 98—99 % вариаций значений яркости исходного снимка.

Преобразование по методу главных компонент имеет три основные области применения. Во-первых, если в снимке более трех спектральных зон, оно позволяет сжать почти всю их информацию в цветное синтезированное изображение первых трех главных компонент, пригодное для визуального дешифрирования и для классификации. Этот подход целесообразен в случае, когда близость спектральных яркостей в исходных спектральных зонах затрудняет различение похожих объектов, а также когда важно использовать минимум дискового пространства для хранения снимка. Во-вторых, некоторые объекты малого размера и низкого контраста, плохо дешифрируемые на исходных снимках, выявляются на изображениях отдельных спектральных компонент. Этот подход используют, например, в геологоразведке, пытаясь выявить по снимку необычные минеральные проявления. В-третьих, такое преобразование проводят для серии разновременных снимков, приведенных в единую систему координат, для выявления динамики, которая часто ярко проявляется в одной или двух компонентах.

При дешифрировании изображений главных компонент следует учитывать два их недостатка. Так, они рассчитываются на основе разброса значений яркости конкретных снимков, и результирующие производные изображения нельзя сравнивать с полученными тем же методом по другим снимкам. К тому же цвета на цветном синтезированном изображении главных компонент не сопоставимы с физическими характеристиками объектов и для их интерпретации надо использовать исходный многозональный снимок.

### **3.2.3. Основные способы компьютерной классификации объектов по снимкам**

**Общие подходы и способы классификации.** По индексным и другим производным изображениям успешно выделяются определенные типы объектов, однако такие изображения не позволяют одновременно дешифрировать все многообразие объектов, отображаемое на тематических (например, ландшафтных) картах. Эта задача *компьютерного дешифрирования* решается на основе более



трудоемкого, но универсального подхода — *классификации*, под которой понимают автоматизированное подразделение всех пикселей снимка на группы, соответствующие разным объектам (классы), обычно по спектральным признакам, т. е. на основе различий в значениях спектральной яркости.

Основополагающим в классификации является правильный выбор признаков. Недаром известный американский ученый Б. К. П. Хорн в своей книге «Зрение роботов» (1989) писал: «Никакие ухищрения в алгоритме решения не могут компенсировать неудачный выбор признаков. Когда возникают трудности с классификацией, не нужно искать экзотических математических хитростей, а лучше поискать подходящие признаки». Для успеха классификации в пространстве спектральных признаков каждому классу должна соответствовать своя область значений яркости, не пересекающаяся с областями других классов. Чтобы проверить, так ли это, строят двумерные графики пространства спектральных признаков и выбирают для классификации те сочетания спектральных зон, в которых изучаемые объекты различаются лучше всего.

*Способы классификации* зависят от того, как выделяют и ограничивают область значений яркости класса. Наиболее оптимальный (экономичный) способ классификации должен учитывать характер распределения значений яркости между классами и внутри каждого класса.

*Группы способов классификации по использованию распределения значений яркости* делятся на непараметрические и параметрические. В группе *непараметрических способов* распределение значений яркости внутри класса не учитывается и не описывается никакими параметрами. Это распределение может быть неоднородным, класс может включать произвольные скопления сочетаний спектральных яркостей. Например, так распределяются яркости крыш домов, сделанных из материалов с разной отражательной способностью, но отнесенных в единый класс «крыши». Для отделения этого класса от других нужно точно описать границу занимаемой им области. Если область отстоит далеко от областей других классов, то ее можно ограничить простой геометрической формой, например прямоугольником (рис. 3.22, а). Прямоугольник в двумерном пространстве спектральных признаков задается лишь минимальным и максимальным значением яркости класса в каждой спектральной зоне, поэтому классификация идет быстро. Если же область находится рядом с другими и ее границы имеют сложную геометрическую форму, то для классификации требуется много данных и машинного времени. Например, при многоугольной форме области нужно знать все значения яркости, задающие углы многоугольника (рис. 3.22, б).

У непараметрических способов два основных применения. Во-первых, их используют для крайне простых классификаций, ког-

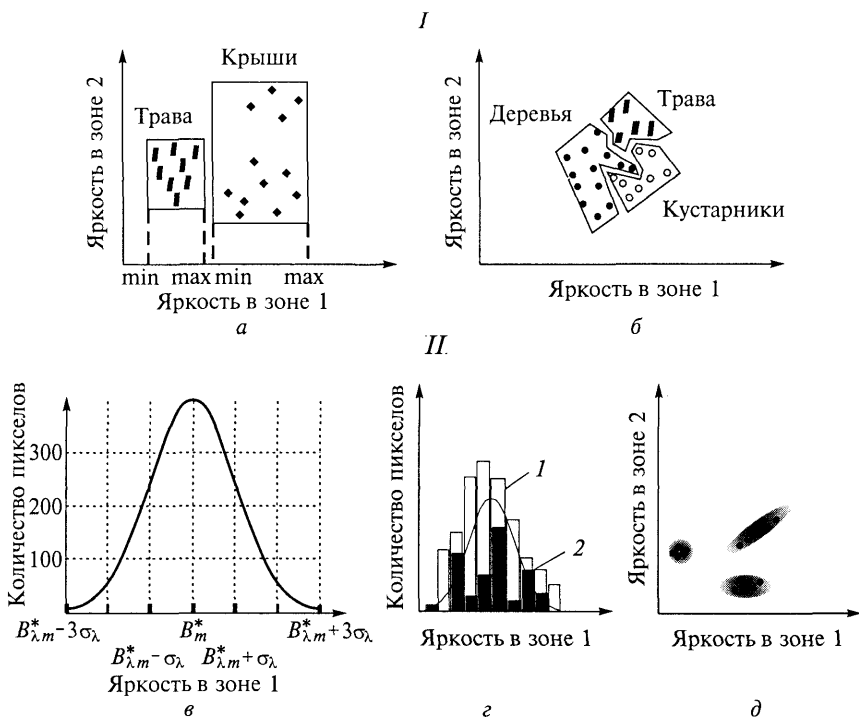


Рис. 3.22. Способы классификации:

*I* — непараметрический: *a* — с простыми границами между классами; *б* — со сложными границами между классами; *II* — параметрический: *в* — кривая нормального распределения значений яркости; *з* — оценка нормальности распределения по гистограмме значений яркости класса: 1 — близкое к нормальному; 2 — многомодальное, далекое от нормального; *д* — отображение классов с нормальным распределением яркостей в пространстве спектральных признаков

да надо различить всего 2—4 контрастных по яркости объекта (например, вода, суша, облака). Во-вторых, их применяют в наиболее сложных случаях, когда классы тесно соседствуют в пространстве спектральных признаков и внутренне неоднородны, из-за чего невозможно применение параметрических способов.

Вторая группа включает *параметрические способы* классификации, предполагающие, что распределение значений спектральной яркости внутри класса подчинено определенному закону. Тогда распределение моделируют с помощью стандартных расчетов на основе этого закона, что позволяет не тратить время на детальное определение границы области, занимаемой значениями яркости класса. Почти всегда используют закон *нормального (гауссова) распределения*, типичного для яркостей природных объектов. Для него характерны симметричное распределение значений яркости вокруг среднего значения, непрерывность и преобладание малых от-

клонений от среднего. Графически этому соответствует симметричная колоколообразная кривая (рис. 3.22, в). Нормальное распределение значений яркости класса в каждой спектральной зоне рассчитывается по двум основным параметрам: *среднему значению*  $B_{\lambda,m}^*$  и *стандартному отклонению*  $\sigma_\lambda$ .

Стандартное отклонение определяют по формуле

$$\sigma_\lambda = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (B_{\lambda,i}^* - B_{\lambda,m}^*)^2}{n-1}},$$

где  $n$  — количество значений яркости пикселей в пределах класса. Стандартное отклонение интерпретируется как отстояние значений яркости от среднего значения яркости всего класса. Чем меньше  $\sigma_\lambda$ , тем лучше среднее значение представляет класс в целом. Из математической статистики известно, что если распределение данных нормальное, то в пределах  $\pm 1\sigma_\lambda$  от среднего значения находится более 68 % общего числа значений, а в пределах  $\pm 3\sigma_\lambda$  — более 99 %. Таким образом, интервал  $B_{\lambda,m}^* \pm 3\sigma_\lambda$  содержит практически все значения яркости для нормально распределенного класса. Чтобы оценить, насколько близко распределение значений спектральной яркости класса к нормальному, строят гистограмму по значениям яркости пикселей в пределах класса и сравнивают ее с графиком кривой нормального распределения, имеющей те же  $B_{\lambda,m}^*$  и  $\sigma_\lambda$  (рис. 3.22, з).

Наиболее важно, чтобы гистограмма была *одноmodalной*, т.е. имела только один четко выраженный пик по яркости. Если на ней есть несколько пиков, то класс следует разбивать на несколько подклассов по яркости со своими  $B_{\lambda,m}^*$  и  $\sigma_\lambda$ . Симметричность и высота гистограммы по сравнению с теми же параметрами кривой нормального распределения имеют важное, но второстепенное значение.

При параметрической классификации по многозональному снимку предполагают, что распределение значений яркости в пределах каждого класса в каждой спектральной зоне нормальное. В двумерном пространстве признаков область класса с нормальным распределением значений яркости отобразится как круг, если  $\sigma_\lambda$  в двух зонах одинаковые, а при разных  $\sigma_\lambda$  — как эллипс. Если зональные значения яркости класса меняются взаимосвязанно, то эллипс имеет определенный наклон (рис. 3.22, д). Например, для открытых почв с увеличением значений в красной зоне растут значения в ближней инфракрасной, и на двумерном графике значений яркости в этих зонах эллипс будет вытянут по диагонали вдоль осей. В этом случае говорят, что существует *положительная ковариация* между значениями яркости почв в указанных зонах. Если же с повышением значений яркости в одной зоне значения

в другой падают, т.е. эллипс вытянут поперек осей координат, наблюдается отрицательная ковариация.

Вытянутость эллипса, ограничивающего область класса, пропорциональна ковариации. Этот важный факт позволяет использовать ковариацию для моделирования формы областей классов в пространстве спектральных признаков. Ковариацию рассчитывают по формуле:

$$Cov_{\lambda_1, \lambda_2} = \frac{\sum_{i=0}^n (B_{\lambda_1 i}^* - B_{\lambda_1 m}^*)(B_{\lambda_2 i}^* - B_{\lambda_2 m}^*)}{n - 1},$$

где  $B_{\lambda_1 i}^*$ ,  $B_{\lambda_2 i}^*$  — значения яркости пиксела  $i$  в двух сравниваемых спектральных зонах. Для  $n$  спектральных зон значения ковариации между яркостями во всех возможных парах зон записывают в виде двумерного массива, или *матрицы ковариации* размером  $n \times n$ . Эта матрица является компактной характеристикой взаимосвязей между спектральными яркостями в пределах класса.

Для оценки зависимости между значениями яркости в разных спектральных зонах часто используют другую статистическую меру — *коэффициент корреляции*  $k_{B^*}$ , который является стандартизованным вариантом ковариации. Для получения коэффициента корреляции ковариацию делят на произведение стандартных отклонений значений яркости в двух сравниваемых спектральных зонах:

$$k_{B_{\lambda_1, \lambda_2}^*} = \frac{Cov_{\lambda_1, \lambda_2}}{\sigma_{\lambda_1} \sigma_{\lambda_2}}.$$

Корреляцию используют вместо ковариации, когда зональные значения яркости не были взаимно откалиброваны, таким образом делая их сравнимыми. Значения коэффициента корреляции варьируют от +1 (полная положительная корреляция) до -1 (полная отрицательная корреляция), а значения ковариации — в произвольных пределах. Если ковариация или коэффициент корреляции близки к нулю, связи между зональными значениями яркости нет.

Таким образом, среди параметрических способов классификации есть простые способы, использующие только средние значения яркости классов, и сложные, использующие также стандартные отклонения и матрицу ковариации (либо матрицу коэффициентов корреляции). Чем больше параметров в классификации, тем лучше различаются классы, близкие по значениям яркости, однако тем больше машинного времени требуется для ее выполнения.

Параметрические методы применяют для классификаций средней и высокой сложности с умеренным количеством классов (обычно от 3 до 100), внутри которых значения яркости распределяются согласно нормальному закону.

**Группы способов классификации по характеру реализации.** Выделяют способы компьютерной классификации *с обучением (контролируемой)* и *без обучения (неконтролируемой)*. В способах классификации с обучением используются заранее определенные человеком эталонные значения спектральной яркости объектов. В интерактивном задании этих значений и состоит *обучение*. В процессе классификации значения яркости текущего пиксела сравниваются с эталонными и пиксел относится в наиболее подходящий класс объектов. Качество обучения можно оценить по правильности классификации эталонных участков — в этом заключается *контроль*.

Результатом работы алгоритмов с обучением является так называемая *карта классификации* — изображение, на котором пиксела вместо исходных значений яркости приданы значения классов объектов. Карта классификации имеет заранее определенную легенду. Алгоритмы с обучением используют, когда имеются достоверные наземные данные, не очень много классов объектов (обычно до 30) и они четко различаются на снимке.

В способах классификации без обучения (кластеризации) вначале проводится автоматическое разделение пикселов на группы. Исходная информация, задаваемая дешифровщиком, минимальна: количество классов, которые нужно получить; насколько сильно они должны различаться по значениям яркости между собой; параметры, определяющие длительность классификации. На первом этапе изображение разделяется на массивы сходных по спектральным характеристикам пикселов — кластеры. Затем дешифровщик анализирует характеристики кластеров, сопоставляет их с характеристиками реальных географических объектов и определяет, к каким объектам относится кластер.

Полученная карта классификации более объективно отражает близкие по значениям дешифровочных признаков группы объектов, чем при классификации с обучением, поскольку кластеры определяются автоматически. Но ее легенда, первоначально не указывающая объектного содержания кластеров, даже после определения объектов дешифровщиком обычно требует дальнейшего редактирования (объединения или разбиения классов). Одни и те же объекты могут попасть в разные кластеры, например из-за условий освещения (горные леса на склонах разной экспозиции), а разные объекты — оказаться в одном кластере из-за одинаковой яркости (скальные участки и бетонное покрытие дорог). В первом случае необходимо объединить кластеры в единый класс, а во втором — привлечь дополнительные дешифровочные признаки для различения объектов.

Способы классификации с обучением и без обучения взаимно дополняют друг друга и часто их сочетают в той или иной последовательности в рамках *гибридной* классификации.

**Классификация с обучением по спектральным признакам.** Для выделения объектов по значениям спектральной яркости используют различные способы. Охарактеризуем наиболее распространенные.

**Способ параллелепипеда для классификации четко различающихся объектов** применяют, когда значения спектральной яркости разных объектов практически не перекрываются, а классов объектов немного. Как следует из названия, при классификации в пространстве спектральных признаков выделяются области в форме параллелепипедов (а в двумерном пространстве — прямоугольников), ограничивающих значения яркости объектов данного класса. Граничные (минимальные и максимальные) значения яркости определяют визуально по двумерным графикам спектральных признаков (см. рис. 3.22, а). Затем значения спектральных признаков в каждом пикселе сравниваются с граничными для каждого класса. Если пиксел по своим значениям яркости попадает в один из выделенных диапазонов, его относят к соответствующему классу. Если значения яркости пиксела не попали ни в один диапазон, его относят к неклассифицированным объектам. Если значения яркости попадают в несколько диапазонов, возможно несколько вариантов классификации объекта.

На цв. вкл. I, 16 показаны результаты классификации небольшого числа сельскохозяйственных культур, хорошо различимых по яркости, что обеспечивает успешную работу способа параллелепипеда. Преимущества способа — простота, отсутствие требований к распределению значений яркости (способ непараметрический), быстрота выполнения классификации.

Этот способ часто применяют в сочетании с более сложными, чтобы быстро отделить объекты, не пересекающиеся по диапазонам характерных значений яркости с другими, а уже затем обрабатывать оставшиеся участки с помощью более сложных способов. Например, по сочетанию значений яркости в красной и ближней инфракрасной зоне снимка можно отделить растительность от открытых почв перед компьютерным дешифрированием типов растительности.

**Способ минимального расстояния для классификации объектов с похожими спектральными признаками** используют, когда спектральные признаки разных классов довольно похожи и диапазоны значений их яркости перекрываются. Идея способа в том, что предварительно определенные средние значения яркости классов служат как бы центрами гравитации, к которым притягиваются пиксели с наиболее близкими значениями яркости. Близость по яркости рассчитывается совокупно по всем спектральным зонам. Для этого складываются квадраты разностей между значением яркости пиксела и средним значением яркости класса во всех спектральных зонах. Извлекая квадратный корень из этой суммы, полу-

чают так называемое *спектральное расстояние*  $D_{ic}$  от значений спектральной яркости  $B_i^*$  пиксела  $i$  до совокупности средних значений яркости  $B_{mc}^*$  класса  $c$  в  $n$  спектральных зонах:

$$D_{ic} = \sqrt{\sum_{i=1}^n (B_i^* - B_{mc}^*)^2}.$$

Пиксел относят в тот класс, расстояние до совокупности средних значений яркости которого оказалось минимальным. В результате классификации пространство спектральных признаков разбивается на полигональные области, соответствующие классам (рис. 3.23). Неклассифицированных пикселов при использовании данного способа не остается. Поэтому он наиболее применим для определения непрерывно и плавно меняющихся характеристик, например уровня повреждения лесной растительности промышленными выбросами. Способ является параметрическим. Скорость вычислений ниже, чем в способе параллелепипеда, но выше, чем в более сложных способах, использующих большее количество параметров. Способ удобен для выделения до 20—30 классов, поскольку почти все операции, в том числе определение границ между классами, выполняются автоматически. Необходимо лишь задать средние значения яркости для классов — обычно они рассчитываются по эталонным обучающим участкам, границы которых в пределах класса оцифровываются дешифровщиком на снимке.

Способ минимального расстояния используют часто для классификации самых разнообразных объектов как на суше, так и в акваториях. Для успешной классификации необходимо, чтобы значения спектральной яркости объектов компактно группировались вокруг средних значений соответствующих классов. Однако нередки ситуации, когда область значений яркости класса так вытянута в пространстве спектральных признаков, что часть попадающих в нее пикселов ближе по яркости к средним значениям других классов. В этом случае способ даст ошибочную классификацию. Поэтому чаще применяют более сложный способ, учитывающий особенности взаимосвязи между спектральными зонами, т. е. особенности спектрального образа объекта.

*Способ максимального правдоподобия для классификации с учетом спектрального образа объектов* предполагает нормальное распределение значений яркости в пределах каждого класса во всех спектральных зонах и использует ковариации между значениями

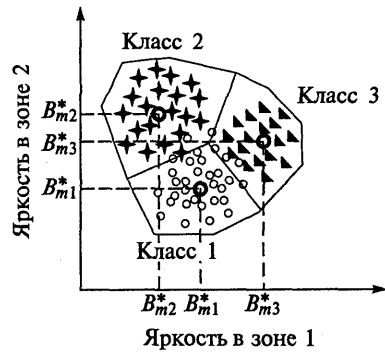


Рис. 3.23. Классификация способом минимального расстояния

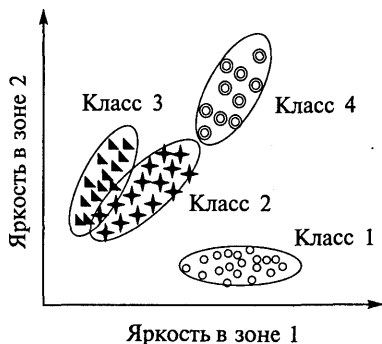


Рис. 3.24. Классификация способом максимального правдоподобия

спектральной яркости. Напомним, что в этом случае моделируют области, занимаемые классами в двумерном пространстве спектральных признаков как эллипсы, ориентированные в направлении наибольшего разброса значений (см. рис. 3.22, д), и с центром в точке со средними значениями признаков для данного объекта. Чем ближе значения яркости пиксела к центру определенного эллипса, тем выше вероятность принадлежности пиксела к соответствующему классу. При классификации удовлетворяется условие максимальной

вероятности отнесения пиксела к данному классу (максимального правдоподобия) — отсюда название способа. Поскольку этот способ применяется в наиболее сложных случаях, когда значения яркости разных классов весьма близки, эталонные участки выбирают особенно тщательно, контролируя распределение значений яркости в пределах класса по гистограммам. Это распределение должно быть близким к нормальному или, как минимум, одно-модальным с резко выраженным пиком. По крайней мере в одной спектральной зоне не должно быть значительных перекрытий текущего класса с другими (рис. 3.24). По эталонным участкам для каждого класса рассчитываются минимальные, максимальные и средние значения спектральных яркостей и матрица ковариации, характеризующая взаимосвязи между значениями яркости класса в разных спектральных зонах. С учетом всех этих параметров вычисляют особое спектральное расстояние, называемое *расстоянием Махаланобиса*<sup>1</sup>,  $DM_{ic}$ . Математически это обычно записывают так:

$$DM_{ic} = (X_{B_i^*} - M_{B_c^*})^T \cdot Cov_{B_c^*}^{-1} \cdot (X_{B_i^*} - M_{B_c^*}),$$

где  $Cov_{B_c^*}$  — матрица ковариации значений спектральной яркости для класса  $c$ ;  $X_{B_i^*}$  и  $M_{B_c^*}$  — значения яркости пиксела  $i$  и эталонные средние значения яркости класса  $c$ . Для удобства компьютерных вычислений  $X_{B_i^*}$  и  $M_{B_c^*}$  тоже представляют в матричной форме (обозначение  $^{-1}$  означает математическую операцию обращения матрицы, а  $^T$  — транспонирования матрицы). Совершенно очевидно, что малое расстояние Махаланобиса означает близость пиксела к данному классу по своему спектральному образу.

<sup>1</sup> Махаланобис Пресанта Чандра (1893—1972) — индийский экономист-статистик.



Пиксел относится к тому классу, расстояние Махаланобиса до эталонных средних значений которого минимально (при равенстве значений устанавливают определенную последовательность классификации, и классы, обрабатываемые первыми, имеют преимущество). Если значения яркости пикселей вообще не соответствуют эталонным диапазонам яркости классов или расстояния Махаланобиса для них больше заданного порога, то их оставляют неклассифицированными. Это позволяет оценить, какой процент площади снимка не определяется спектральными признаками, полученными по эталонным участкам.

Существует усовершенствованный вариант способа, основанный на так называемом правиле Байеса<sup>1</sup>, которое позволяет дополнительно учитывать информацию об относительной площади снимка, занимаемой каким-то классом. Например, известно, что в лесном массиве, изобразившемся на снимке, 2/3 елей и 1/3 берез. По эталонным участкам в густых еловых посадках и в березовой роще получены значения яркости этих пород, которые хорошо различаются в ближней инфракрасной зоне, что позволяет правильно классифицировать участки леса, где встречается только одна порода. Однако допустим, что в массиве много смешанного леса, который отображается промежуточными значениями яркости на снимке. Классический вариант способа будет с равной вероятностью относить такие значения к классу берез или елей, что может привести к завышению процента берез в лесном массиве по сравнению с реальным. Байесовский вариант способа позволяет ввести весовые коэффициенты, пропорциональные вероятности встречаемости пород, и в этом случае при классификации пиксели с промежуточными значениями яркости будут чаще относиться к елям, чем к березам.

Оба варианта способа используются для картографирования большого количества разнородных типов объектов, имеющих различную площадь и характер размещения, например равнинного и горного растительного покрова в районах промышленного воздействия (цв. вкл. I, 17). Для этого параметрического способа классификации требуется наибольший объем вычислений, и он самый медленный из уже перечисленных.

**Основные этапы классификации с обучением.** Процесс классификации можно разделить на четыре основных этапа:

планирование классификации;

выбор эталонных участков;

процесс классификации;

оценка качества классификации и оформление ее результатов.

На этапе *планирования классификации* формулируют конкретную задачу компьютерной обработки снимков, определяют спи-

---

<sup>1</sup> Байес Томас (1702—1761) — английский математик.

сок дешифрируемых объектов, анализируют характер распределения их значений яркости на снимке и в пространстве спектральных признаков, выбирают способ классификации.

Этап *выбора эталонных участков* включает создание *обучающих выборок* для каждого класса по эталонным участкам и оценку их качества. Напомним, что эталонные участки получают цифрованием границ однородных по яркости фрагментов изображения, типичных для данного класса по значениям яркости и расположению. Обучающие выборки — это совокупности значений спектральной яркости в пределах эталонного участка, по которым получают эталонные значения яркости классов, например диапазоны значений яркости классов для классификации способом параллелепипеда или средние значения яркости для классификации способом минимального расстояния. Чтобы надежно оценить характер распределения значений по гистограмме яркостей для способа максимального правдоподобия, создают обучающие выборки большого размера: эмпирическое правило рекомендует для каждого класса использовать в 10—100 раз больше пикселей, чем число спектральных зон снимка.

Высокое качество обучающих выборок — ключ к успеху классификации. Его оценивают по следующим критериям:

1. *Репрезентативность*: представительность совокупности значений яркости в выборке для данного класса; оценивается по результатам пробной классификации в пределах специально выбранных контрольных участков.

2. *Однородность*: отсутствие не характерных для класса значений яркости; оценивается по величине стандартного отклонения значений яркости по обучающей выборке от среднего и результатам пробной классификации. Очевидно, что эталонные участки должны классифицироваться так же, как объект, для которого они служат эталоном.

3. *Различимость*: достаточное различие спектральных яркостей классов. Если диапазоны их значений яркости пересекаются, то оценивают, насколько в целом перекрываются гистограммы яркости классов. Это перекрытие можно оценить как визуально, так и статистически. Например, для оценки классов, характеризующихся нормальным распределением, гистограммы которых перекрываются, используют известный в математике показатель *дивергенции*, который учитывает как средние значения яркости классов, так и присущий каждому классу характер взаимосвязи между спектральными яркостями. Чем выше показатель дивергенции, тем более различимы классы.

4. *Характер распределения значений яркости* (для способа минимального расстояния, и особенно максимального правдоподобия): требуется максимальное сходство с нормальным распределением и одномодальность гистограммы значений яркости по выборке;



Рис. 3.25. Оценка качества эталонных выборок по их гистограммам яркости для классификации параметрическими способами:

1, 2 — классы с одномодальным распределением значений яркости, отличающиеся от остальных классов в большинстве спектральных зон (классифицируются правильно); 3 — класс с одномодальным распределением, перекрывающийся с другими во всех спектральных зонах; 4 — класс с многомодальным распределением, частично перекрывающийся с другими (3, 4 — классифицируются с большой долей ошибок); 5 — класс с многомодальным распределением, перекрывающийся с другими классами (классифицируется ошибочно)

обычно оценивается визуально по гистограммам значений яркости выборки (рис. 3.25).

Необходимо одновременное выполнение всех требований. Напомним, что тематический класс может состоять из нескольких подклассов по яркости. Например, уже упоминавшиеся «горные леса» могут включать «леса на затененных склонах» с более низкими значениями яркости и «леса на освещенных склонах» с более высокими значениями (это типичная ситуация для снимков расчлененных горных районов, особенно при малой высоте Солнца в момент съемки). Если применяется параметрический способ, то для соблюдения условия нормального распределения яркостей создание обучающих выборок и классификация ведутся отдельно по подклассам, и подклассы объединяются в единый тематический класс уже после классификации.

После проверки качества обучающих выборок приступают к третьему этапу — собственно *процессу классификации*, в ходе которого значения яркости пикселей сравниваются с эталонными на основе выбранного способа классификации и принимается решение о принадлежности пиксела к определенному классу либо к категории неклассифицированных. В результате получают карту классификации, на которой каждый класс изображается своим цветом и которая имеет элементарную легенду, соответствующую списку выявленных классов.

Затем следует заключительный, четвертый, этап — *оценка достоверности классификации и оформление ее результатов*. Достоверность классификации вначале оценивают визуально, выявляя грубые ошибки, если они имеются. Затем переходят к количествен-

ной оценке по набору контрольных участков, в пределах которых классифицированное изображение сравнивается с независимыми данными — результатами наземных наблюдений, картами и снимками крупного масштаба, литературными и фондовыми материалами. Это позволяет выявить второстепенные ошибки и неточности. Если количество ошибок классификации превышает установленные для конкретной задачи пределы, возвращаются к третьему этапу и обучающие выборки улучшают, затем повторяют классификацию и оценку ее качества. Этот процесс часто проходит через несколько повторов (итераций), прежде чем достигается результат требуемой достоверности. Практический опыт показывает, что можно добиться достоверности классификации в 90—95 % для 2—3 классов и 70—85 % для 20—30 классов. С увеличением количества классов происходит дальнейшее падение достоверности.

Оформление результатов классификации включает следующие операции:

- подбор оптимальной цветовой палитры для отображения классов;

- редактирование легенды — перестройка ее в логическом порядке, соответствующем характеру объектов, а не их яркостным признакам, иерархическое структурирование категорий легенды;

- выполнение различных операций, направленных на улучшение визуального восприятия изображения, его генерализацию (обобщение легенды, фильтрация изображения для исключения объектов малой площади);

- включение в итоговую карту классификации элементов картографической основы (координатной сетки, масштабной линейки, картографического изображения гидрографической и дорожной сети, застройки, подписей гидрографии и населенных пунктов и т. п.).

**Классификация без обучения (кластеризация) по спектральным признакам** позволяет автоматически разделить все изображение снимка на участки с одинаковыми объектами (на основе близких значений дешифровочных признаков), которые затем дешифровщик относит к конкретным классам.

Способы кластеризации с использованием спектральных признаков делятся на одношаговые и многошаговые (итерационные).

**Способ быстрого выделения кластеров** пригоден для быстрого разделения многозонального снимка на пространственно и спектрально однородные области. Центр (средние значения) первого кластера задается значениями яркости первого пиксела кластеризуемого изображения. Далее все изображение последовательно анализируется пиксел за пикселом по строкам или по столбцам и при необходимости образуются новые кластеры. В процессе анализа рассчитывается спектральное расстояние  $d$  от значений спек-

тральной яркости текущего пиксела до средних значений яркости по кластеру. Решение, присоединить ли пиксел к кластеру или образовать новый, принимается в результате сопоставления вычисленного спектрального расстояния и специально заданного порога яркости. После образования второго кластера значения каждого последующего пиксела сравниваются уже с двумя наборами средних значений и т.п. После обработки всего снимка получают *предварительную карту кластеризации*, в легенде которой указаны порядковые номера кластеров. Далее дешифровщик определяет соответствие этих кластеров тематическим классам.

Преимущество способа — высокая скорость вычислений, а недостаток — влияние значений яркости первых нескольких пикселов на результат кластеризации. Усовершенствованный вариант алгоритма быстрого выделения кластеров предполагает определение яркостных порогов в процессе кластеризации. Способ является параметрическим в том смысле, что предполагает группировку пикселов вокруг средних значений яркости кластеров.

**Самоорганизующийся способ кластеризации ISODATA** (от Iterative Self-Organising Data Analysis Technique — итеративный самоорганизующийся способ анализа данных) используют для более точной, многошаговой обработки снимков. Основным параметром, задаваемым перед вычислениями, — число кластеров  $n$ , которое необходимо получить. Перед первой итерацией рассчитывают статистические параметры распределения яркости всего снимка в каждой спектральной зоне: минимальное, максимальное и среднее значения, стандартное отклонение. Далее все пространство спектральных признаков делят на  $n$  равных диапазонов и назначают средние значения кластеров в центре каждой из образованных областей (рис. 3.26, *а*). Затем проводят первую итерацию кластеризации: для значений яркости всех пикселов рассчитывают спектральные расстояния  $d_{ic}$  до средних значений и каждый пиксел



Рис. 3.26. Последовательность работы алгоритма ISODATA:

*а* — назначение центров кластеров перед 1-й итерацией; *б* — определение границ кластеров в результате 1-й итерации; *в* — уточнение положения центров и границ кластеров в результате 2-й итерации

относят в определенный кластер по принципу минимального расстояния (рис. 3.26, б). После первой итерации рассчитывают реальные средние значения спектральных признаков по полученным кластерам. На второй итерации повторяют кластеризацию с новыми средними значениями и уточняют границы кластеров (рис. 3.26, в). По уточненным кластерам рассчитывают новые средние значения, проводят следующую итерацию и т. п. Итерации повторяют до тех пор, пока границы кластеров не стабилизируются, т. е. пиксели не перестанут переходить из кластера в кластер. Обычно задают этот параметр, так называемый *порог сходимости*, равным от 95 до 99 % всех пикселей. При определенном распределении значений яркости на снимке такой стабилизации не происходит, поэтому одновременно используют второй ограничивающий параметр — максимальное число итераций.

Способ ISODATA требует значительных вычислительных ресурсов. Например, кластеризация 6-зонального снимка общим объемом 100 Мбайт на 50 классов может идти на компьютере Pentium II с частотой процессора 400 МГц в течение 1 ч. Скорость обработки зависит от заданного количества классов, объема снимка, процессора, размера оперативной памяти, программного обеспечения. Однако в результате обработки снимка по этому способу объективно выявляется распределение объектов с разными спектральными образами. В отличие от алгоритма быстрого выделения кластеров результат кластеризации не зависит от того, с какого пиксела начинается обработка. Способ ISODATA также является параметрическим, так как значения яркости группируются вокруг среднего значения яркости кластера.

Для сравнения обоих способов на цв. вкл. I, 18 приведены результаты кластеризации типов почвенно-растительного покрова алгоритмами быстрого выделения кластеров и ISODATA.

**Классификация на основе спектральных признаков: выбор способа.** Выбор способа классификации зависит от распределения яркостей объектов в многомерном пространстве спектральных признаков. Проиллюстрируем процесс выбора оптимального способа — наиболее простого и быстрого, но при этом достаточного для решения задачи, используя для простоты двумерное пространство спектральных признаков.

В наиболее простом случае области, ограничивающие значения яркостей для разных объектов, не пересекаются (рис. 3.27, а), что позволяет однозначно дешифровать объекты и ограничить поле яркостей каждого объекта прямоугольником. На практике это осуществимо, если самих объектов немного (2—4). В этом случае используют способ *параллелепипеда*.

Чаще области, соответствующие разным объектам, пересекаются. Если при этом корреляции между значениями спектральной яркости в разных зонах нет (т. е. области, соответствующие объек-

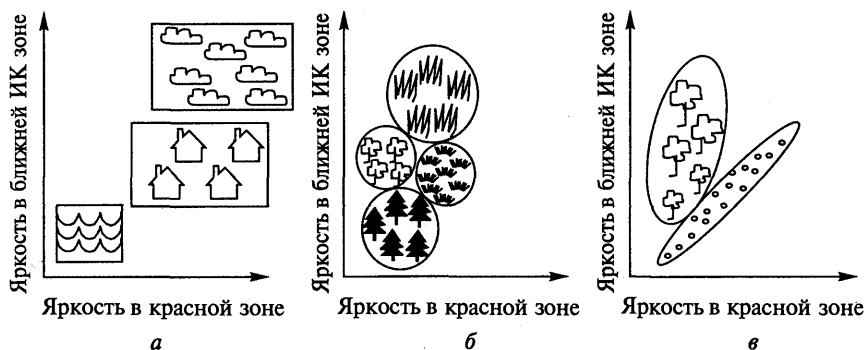


Рис. 3.27. Выбор способов классификации объектов в зависимости от распределения значений яркости объектов в пространстве спектральных признаков:

*а* — области значений яркости разных объектов не пересекаются (способ параллелепипеда); *б* — области значений яркости разных объектов пересекаются и корреляция между зональными значениями яркости отсутствует (способы: максимального расстояния, быстрого выделения кластеров, ISODATA); *в* — области значений яркости разных объектов пересекаются и корреляция между зональными значениями яркости есть (способ максимального правдоподобия)

там, имеют округлую форму) и известны эталонные средние значения яркости класса (например, в результате определения по эталонным участкам на снимке), то применяют способ *минимального расстояния*, учитывающий только отстояние значений яркости от среднего, для каждого объекта. Если эталонные значения неизвестны, применяют способы классификации без обучения: быстрого выделения кластеров или способ ISODATA (рис. 3.27, б).

Если же корреляция между значениями спектральной яркости в различных зонах есть, то ее используют для более достоверного различения объектов, применяя способ *максимального правдоподобия*. Как указывалось выше, в случаях, когда спектральные яркости объекта имеют приблизительно нормальное (гауссово) распределение (что характерно для естественных и сельскохозяйственных ландшафтов), в двумерном спектральном пространстве они отобразятся в пределах эллипса (рис. 3.27, в). Размеры эллипса задаются размахом значений яркости на снимке, а его форма и ориентировка осей — коэффициентами корреляции между значениями в разных спектральных зонах. При классификации учитывается не только отстояние значений яркости от среднего для объекта, но и их нахождение в пределах эллипса.

Заметим, что опытный специалист по обработке снимков иногда интуитивно определяет особенности распределения яркости объектов и наилучший способ классификации, глядя на снимок. Однако в процессе обучения искусству компьютерного дешифрирования, а также при детальном анализе и использовании большого

количества классов сопоставление изображения объектов на снимке и их положения на графике пространства спектральных признаков (см. цв. вкл. I, 8) необходимо.

Рациональный выбор способа позволяет значительно уменьшить время компьютерной обработки. Для снимка большого объема (например, 200 Мбайт) способ параллелепипеда выделит заданное количество классов объектов в несколько раз быстрее, чем при использовании способа минимального расстояния.

В сложных случаях целесообразно сочетать несколько способов классификации: например, объекты, резко отличающиеся от всех остальных по яркости, классифицировать способом параллелепипеда, а остальные — более сложным способом. Это одна из разновидностей гибридной классификации, о которой говорится ниже.

Необходимо ограничиваться минимально достаточным количеством дешифровочных признаков. Например, если при составлении карты растительности по снимку выявлено, что все типы растительности хорошо идентифицируются с помощью значений яркости в двух спектральных зонах, не нужно использовать остальные зоны. Наличие излишней информации замедлит компьютерную обработку и может даже ухудшить ее результаты, если в дополнительно используемых спектральных зонах типы растительности не разделяются.

**Оценка достоверности результатов классификации** — заключительный этап классификации, который вне зависимости от примененного способа определяет возможность использования ее результатов. Оценка может осуществляться различными способами.

**Полевые и камеральные методики оценки достоверности** — это проверка карты классификации в отдельных точках, по маршрутам или на контрольных участках, положение которых на местности точно определяется, например, с помощью спутниковых приемников ГЛОНАСС, GPS. Соответствие результатов классификации объектам на местности проверяют наблюдениями на земле или с воздуха. Для оценки достоверности классификации необходимо, чтобы каждый контрольный участок изображался несколькими пикселями на снимке. Следует проверить в пределах каждого класса хотя бы несколько участков, случайно распределенных на местности. В связи с дороговизной такой проверки чаще используют камеральные или комбинированные методы. Камеральная оценка достоверности включает: а) визуальную оценку достоверности классификации на основе знания местности дешифровщиком; б) количественную оценку на основе данных, не использованных в классификации: карт, снимков более высокого разрешения, материалов наземных наблюдений, предоставленных другими исследователями.

При комбинированной оценке камеральные исследования дополняются выборочной полевой проверкой. К наземным и каме-



ральным данным, используемым для оценки достоверности, предъявляется ряд требований: они должны быть получены в близкие со съемкой сроки; если это требование не выполняется, необходимо учитывать возможные изменения; данные не должны использоваться при самой классификации — в этом случае объективная оценка достоверности становится невозможной.

**Показатели, характеризующие достоверность классификации**, наглядно представляют в виде *матрицы ошибок*, которую рассчитывают по контрольным участкам (не совпадающим с эталонными участками, использовавшимися для создания обучающих выборок). По одному входу матрицы указывают классы, установленные по наземным или иным эталонным данным, а по другому — полученные в результате классификации по снимку. На пересечении строк и столбцов записывают количество пикселей (табл. 3.2). Таким образом, на диагонали матрицы оказывается количество пикселей, классифицированных корректно, а вне диагонали — количество пикселей, попавших в ошибочные классы.

Путем построения матрицы ошибок рассчитывают ряд показателей достоверности классификации: *ошибки оmissии* (количество пикселей, ошибочно не попавших в данный класс); *ошибки комиссии* (количество пикселей, ошибочно присоединенных к данному классу); достоверность классификации (% правильно классифицированных пикселей от общего количества проверяемых пикселей). В табл. 3.2 общее количество пикселей на диагонали матрицы равно 350, поэтому достоверность классификации в целом составляет  $(350/410) \cdot 100 = 85,4\%$ .

Таблица 3.2

**Матрица ошибок для шести классов**

Классы, полученные по наземным данным	Классы, полученные при классификации, и количество отнесенных к ним пикселей						Количество контрольных пикселей	Достоверность выделения класса, %	Ошибка оmissии (пропуска), пиксел	Ошибка комиссии (присоединения), пиксел
	1	2	3	4	5	6				
<b>1</b>	50	3	0	0	2	5	60	83,3	10	21
<b>2</b>	4	62	3	0	0	1	70	88,5	8	10
<b>3</b>	4	4	70	0	8	3	89	81,4	19	6
<b>4</b>	0	0	0	64	0	0	64	100,0	0	3
<b>5</b>	3	0	2	0	71	1	77	92,2	6	10
<b>6</b>	10	3	1	3	0	33	50	66,0	17	10
Всего по столбцу	71	72	76	67	81	43	410		60	60

Для оценки общей достоверности классификации часто используют так называемый коэффициент «каппа»,  $\kappa$ :

$$\kappa = \frac{N \sum_{i=1}^n x_{ii} - \sum_{i=1}^r x_{i+} \cdot x_{+i}}{N^2 - \sum_{i=1}^r x_{i+} \cdot x_{+i}},$$

где  $x_{ii}$  — диагональные элементы матрицы ошибок;  $x_{i+}$  — суммарное количество пикселей по строке  $i$ ;  $x_{+i}$  — суммарное количество пикселей по столбцу  $i$ ;  $N$  — общее количество пикселей в матрице;  $n$  — количество классов.

Для табл. 3.2 сумма элементов  $x_{ii}$  равна 350, а сумма произведений  $x_{i+}$  и  $x_{+i}$  — 28 820. Таким образом,  $\kappa = (410 \cdot 350 - 28\,820) / (168\,100 - 28\,820) = 114\,680 / 139\,280 = 0,82$ . Нулевое значение коэффициента означает нулевое соответствие, а значение 1,0 — полное соответствие между результатами классификации и эталонными данными. Обычно считают качество классификации хорошим, если  $\kappa > 0,75$ , и неприемлемым, если  $\kappa < 0,4$ . Однако это лишь приблизительные оценки. Полученные значения показателей зависят от метода выбора контрольных участков на снимке и качества наземных данных. Для повышения точности оценки целесообразно испробовать несколько разных наборов участков. По значению  $\kappa$  можно напрямую сравнивать результаты работы разных алгоритмов для одного и того же набора контрольных участков на снимке.

### 3.2.4. Дополнительные способы компьютерной классификации

Выше были охарактеризованы основные способы классификации, однако во многих ситуациях использование какого-либо из них недостаточно для полной и достоверной классификации объектов. В таких случаях применяют ряд дополнительных способов и подходов. Среди них — различные гибридные и нечеткие классификации, новые способы обработки (например, на основе алгоритмов нейронных сетей), обработка гиперспектральных снимков.

**Гибридная классификация** — это классификация объектов на снимке, выполняемая при сочетании двух или более способов классификации.

**Сочетание способов без обучения и с обучением** наиболее полезно при большом количестве классов. Один из распространенных вариантов такого сочетания следующий. На первом этапе проводят объективное выделение классов (кластеризацию) по спектральным признакам, например, используя итерационный способ

ISODATA без обучения (при этом для более полного учета спектральной неоднородности тематических классов задают заведомо большее количество выделяемых спектральных кластеров). Затем анализируют полученные классы: определяют, какие из них нужно впоследствии объединить в один тематический, а какие повторно классифицировать другим способом. Обычно требуется повторная классификация объектов, распределение яркостей которых далеко от нормального, например городской застройки. Для ее классификации можно использовать способ параллелепипеда. На втором этапе проводят классификацию методом минимального расстояния или максимального правдоподобия, используя гибридный набор дешифровочных признаков: граничные значения, заданные для способа параллелепипеда, и средние значения яркости кластеров, полученных в результате работы способа ISODATA. Таким образом, разные объекты классифицируются разными способами. При перекрытии спектральных признаков разных объектов определенному классу объектов может отдаваться предпочтение на основе дополнительных решающих правил.

На третьем этапе проводят заключительное редактирование полученной карты классификации: объединяют спектральные классы, входящие в один тематический, сглаживают изображение, исключая одиночные классифицированные пиксели, и т. п.

**Использование текстуры, контекста изображения и дополнительных данных.** Кроме спектральных признаков для гибридной классификации привлекают и иные.

Многие десятилетия разрабатываются способы классификации, направленные на использование пространственного рисунка изображения на снимке. Рисунок содержит огромную дополнительную информацию об объекте, которая легко интерпретируется человеком, но с трудом формализуется для компьютерной обработки. Успехи в компьютерном дешифрировании рисунка изображения пока скромны. Тем не менее существует понятие «*текстура цифрового снимка*», которое может быть определено в первом приближении как пространственная изменчивость значений яркости пикселей (что лишь частично соотносится с более многосторонним понятием текстуры в визуальном дешифрировании).

Существуют различные *показатели текстуры*, которые в компьютерном варианте рассчитываются по определенной окрестности пиксела — «окну» заданного размера, последовательно перемещаемому по изображению («скользящее окно»). Таких показателей предложено много. Например, однородность значений яркости в пределах «скользящего окна» характеризуют с помощью средней разности значений яркости между центральным пикселем окна и остальными пикселями и с помощью стандартного отклонения от среднего значения яркости по окну. Используют коэффициент асимметрии значений яркости в пределах «скользя-

щего окна», который характеризует степень смещения максимума гистограммы значений яркости относительно максимума нормального распределения. Другие показатели характеризуют форму объектов, попавших в пределы окна, вытянутость рисунка в определенном направлении и т. п.

При использовании показателей текстуры основным является выбор показателя, позволяющего различить дешифрируемые объекты, и выбор оптимального размера «скользящего окна», в пределах которого определяют показатели текстуры. Размер окна должен соответствовать размеру объектов. Максимальный размер окна ограничен только размером снимка и машинными ресурсами. Используют как небольшие скользящие окна ( $2 \times 2$ ,  $3 \times 3$  пиксела) так и большие ( $60 \times 60$  пикселов и более) при исследовании больших по размеру объектов. С увеличением размера окна резко возрастает объем вычислений, например, если по окну размером  $3 \times 3$  пиксела при вычислении используется 9 значений яркости, то по окну размером  $60 \times 60$  уже 3600.

В результате вычисления любого показателя текстуры получают новое производное изображение. Для быстрого выделения на нем однородных областей чаще всего используют *способы кластеризации*, например ISODATA, поскольку на изображении со сложным рисунком затруднительно получить однородные и репрезентативные эталонные участки для классификации с обучением. Затем кластеры изображения соотносятся дешифровщиком с изучаемыми классами объектов. Обычно проводят кластеризацию сразу по нескольким показателям текстуры, рассчитанным для одного и того же снимка, чтобы полнее отразить характеристики рисунка объектов. Часто производные изображения, получаемые в результате вычисления одного или нескольких показателей текстуры, используются как дополнительные «зоны» в кластеризации многозонального изображения, т. е. проводится гибридная классификация по спектральным и текстурным признакам.

Алгоритмы с использованием текстуры иногда позволяют повысить подробность и достоверность классификации, когда спектральных признаков для различения классов недостаточно. Однако наличие связи текстуры изображения на снимке с рисунком, присущим объектам на земной поверхности, зависит от пространственного разрешения снимка. Обычно оказывается, что текстура является характерным дешифровочным признаком только для части объектов, изобразившихся на снимке. К тому же черты рисунка, легко распознаваемые глазом, бывает трудно описать относительно примитивными формализованными показателями текстуры. Поэтому в компьютерной обработке снимков текстурные дешифровочные признаки пока используются слабо и чаще совместно со спектральными. К гибридной классификации следует отнести и кластеризацию других совмещенных изображений, напри-

мер, состоящих из радиолокационного снимка и снимка в видимом диапазоне.

При классификации используют также *контекст* — значения яркости или классов в окрестности каждого пиксела, что позволяет оценить, насколько правомерно отнесение пиксела в тот или иной класс объектов. Контекстную обработку проводят с помощью «скользящего окна». Используют логические правила: например, устанавливают, что появление пикселов, классифицированных как лес, невозможно в окружении пикселов, классифицированных как море. Обработка снимка проводится итерационно и требует больших вычислительных ресурсов. Контекст привлекают также для исключения одиночных пикселов из карты классификации, присваивая центральному пикселу окна преобладающее значение класса в пределах окна.

Наконец, используют дополнительные геоинформационные продукты, такие как цифровые модели местности и карты в составе ГИС, для уточнения принадлежности пиксела к определенному классу. Например, если участок классифицируется как озеро, он не может соответствовать склону на цифровой модели местности. В последнее время развиваются объектно-ориентированные способы классификации, позволяющие путем многоуровневой обработки автоматически выделять на снимке объекты, а не просто определять принадлежность пикселов к объектам.

**Использование алгоритмов нейронных сетей при разнородных источниках информации** позволяет выполнять одновременную обработку нескольких типов информации. В этом случае в отличие от способов, основанных на параметрических подходах, не требуется нормальное распределение значений данных для каждого класса. Алгоритм нейронной сети имитирует работу человеческого мозга в том отношении, что обработка осуществляется с помощью многочисленных простых элементов сети — так называемых *нейронов*, дублирующих друг друга и работающих одновременно.

В одном из наиболее распространенных типов нейронных сетей — многослойном перцептроне (рис. 3.28, *а*) содержится минимум три слоя нейронов: для ввода входных данных (например, значений яркости пикселов); для обработки; для вывода результатов (значений классов). При обработке каждый отдельный нейрон осуществляет простую функцию — умножает входные данные на устанавливаемые в процессе работы для этого нейрона весовые коэффициенты, суммирует их, затем сравнивает результат с заданным пороговым значением  $T$  (рис. 3.28, *б*): если он больше  $T$ , то выходной результат передается далее к другим нейронам и влияет на их работу. На этапе *обучения* нейронной сети во входной слой помещают исходные данные для каждого пиксела (значения спектральной яркости, высоты и т. д.), а в выходной — класс, в который следует отнести пиксел. Затем путем итерационной обработ-

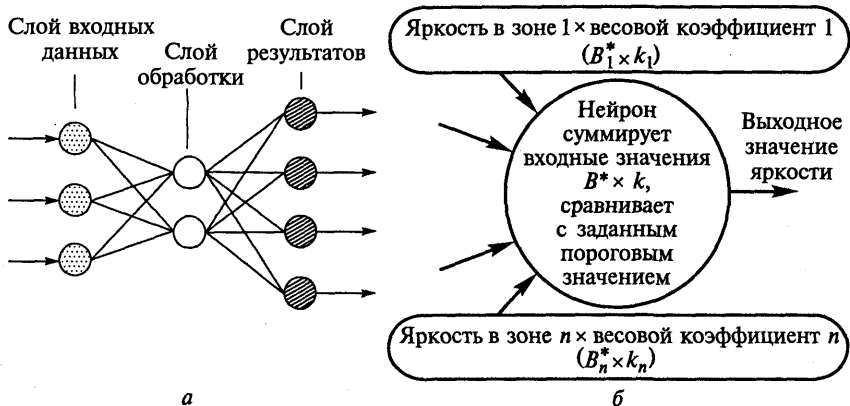


Рис. 3.28. Нейронные сети:

а — строение простейшей сети; б — обрабатывающие функции нейрона

ки подбираются такие параметры (весовые коэффициенты и пороговые значения) для каждого нейрона, чтобы для всех пикселей эталонного участка достигалась правильная классификация. Обучение идет медленно (часто требуются десятки тысяч итераций). Далее на этапе *классификации* во входной слой помещают пиксели классифицируемого снимка и, используя полученные при обучении параметры нейронов, получают карту классификации.

Алгоритмы нейронных сетей требуют в несколько раз больших вычислительных ресурсов по сравнению с традиционными способами классификации, при этом увеличение достоверности классификации небольшое. Результат обработки очень сильно зависит от репрезентативности обучающих данных. Однако показано, что эти алгоритмы работают лучше традиционных, если обучающие выборки малы, и, кроме того, они хорошо адаптируются к любому распределению данных. Ведутся исследования возможностей создания полностью автоматических дешифровочных систем распознавания относительно простых объектов (например, облачного покрова, морских льдов) на основе нейронных сетей.

**Проблема смешанных пикселей и применение подхода нечеткой классификации.** Иногда пиксел снимка нельзя отнести в один конкретный класс, например если он находится на границе двух классов (опушка леса, обочина дороги) или если четких границ между классами нет (участки с разным соотношением пород в смешанном лесу). В этом случае пиксел называют «смешанным». Для определения тематической принадлежности смешанных пикселей применяют так называемую нечеткую классификацию: относят пиксел сразу к нескольким классам, названия которых хранят в виде упорядоченного списка. Первым в списке стоит наиболее вероятный для пиксела класс объектов с минимальным спек-

тральным расстоянием (вычисляемым по простой разности значений яркости, или по формуле Махаланобиса) от средних значений яркости класса до значений яркости пиксела. Вторым ставится следующий по вероятности класс и т.п. Сравнивая спектральные расстояния, можно оценить примерное процентное соотношение площадей объектов в пределах пиксела. Несмотря на то что границы объектов в пределах пиксела провести нельзя, становится возможным более точный подсчет площадей объектов на снимке и уменьшается количество ошибочно классифицированных пикселов.

Нечеткую классификацию можно выполнить как с помощью традиционных способов минимального расстояния и максимального правдоподобия, так и с помощью алгоритмов нейронных сетей.

**Особенности обработки гиперспектральных снимков.** В отличие от обычных многозональных снимков гиперспектральные позволяют получить детальные, почти непрерывные кривые значений спектральной яркости объектов. Поэтому потенциально информация, заключенная в гиперспектральных снимках, позволяет не только классифицировать объекты, образовавшиеся на них, но и определять многие биогеофизические характеристики объектов. Однако гиперспектральные снимки чрезвычайно велики по объему занимаемой компьютерной памяти, имеют пониженную радиометрическую точность и в их значениях яркости велик вклад атмосферного рассеяния и отражения. Для их обработки используют специальные способы, а обычные параметрические способы классификации неэффективны.

**Понятие о гиперспектральном кубе данных.** Сотни спектральных зон гиперспектрального снимка чрезвычайно трудно визуализировать, поскольку при традиционном цветовом синтезировании используются только три спектральные зоны. Поэтому прибегают к отображению данных в виде гиперспектрального «куба» (см. цв. вкл. I, 3), на верхней грани которого отображают снимок, синтезированный по выбранным зонам или главным компонентам, а на боковых — значения спектральной яркости крайних пикселов снимка во всех спектральных диапазонах. Специальные программы обработки снимков позволяют рассматривать такой куб с разной степенью детальности, анализировать значения всего диапазона спектральной яркости для отдельных участков и точек снимка, а также пространственное распределение яркостей для любых спектральных срезов.

**Способы обработки гиперспектральных снимков** развиваются на основе методов спектроскопии, определяющей молекулярное строение вещества по величине поглощения и отражения света в конкретных диапазонах волн. Появляется возможность определять характерные полосы поглощения для разных объектов, например

разделять близкие виды растительности. Спектральные яркости регистрируются на гиперспектральном снимке с такой большой подробностью, что можно сравнивать совокупность спектральных яркостей пиксела с кривой спектрального образа объекта, получаемой путем лабораторной спектрометрии. Сравнение проводят для избранных длин волн либо по всему спектру и, если различия между лабораторными и полученными при съемке значениями меньше заданной величины (с учетом систематического влияния атмосферы), пиксел идентифицируется как отображающий данный объект. Другой метод основан на измерении так называемых «спектральных углов». Для этого набор значений спектральной яркости каждого пиксела в пространстве признаков представляют как многомерный вектор, идущий из начала координат в точку с данными значениями яркости. При общем изменении освещенности объекта (например, между освещенными и затененными склонами) меняется только длина соответствующего вектора, а при изменении характера материала изменится также его угловая ориентация (рис. 3.29). Если угол  $\alpha$  между двумя векторами меньше заданной величины, считается, что оба пиксела изображают один и тот же объект.

Использование гиперспектральных снимков расширило возможности *спектральной декомпозиции*, позволяющей определять соотношение площадей различных объектов в пределах участка, изобразившегося одним пикселом. В основе метода лежит известное предположение о том, что значение интегральной спектральной яркости пиксела является суммой значений спектральной яркости всех объектов в пределах участка местности, соответствующего пикселу. Чтобы определить соотношение площадей, занимаемых разными объектами (компонентами), для значений яркости пиксела в каждой спектральной зоне составляют уравнения коэффициента интегральной яркости (см. гл. 2) и решают систему этих

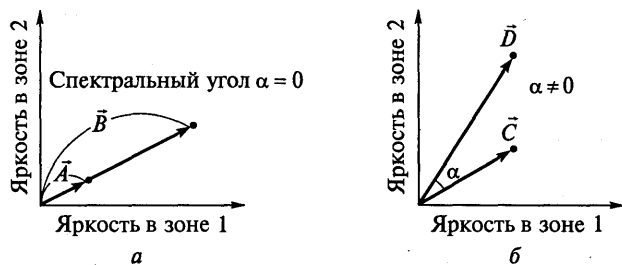


Рис. 3.29. Измерение «спектральных углов» по гиперспектральным снимкам: *a* — переход спектрального вектора  $\vec{A}$  в вектор  $\vec{B}$ , обусловленный изменением освещенности; *b* — спектральный вектор  $\vec{C}$  определяемого пиксела и вектор  $\vec{D}$  эталонного образца, спектральные характеристики которого измерены в наземных условиях



уравнений, получая доли площади, занимаемые каждым объектом. Данную систему можно решить для  $n + 1$  объектов в пределах пиксела, где  $n$  — количество спектральных зон. Для гиперспектрального снимка с сотнями спектральных зон это позволяет точно идентифицировать большое количество объектов, отображаемых «смешанными» пикселями.

### 3.2.5. Компьютерная обработка разновременных снимков

При изучении изменений, происходящих на местности, используют снимки, полученные в разное время. Предварительно следует привести снимки к геометрически единому виду, т. е. трансформировать и представить в единой системе координат.

Различают раздельную обработку разновременных снимков для их последующего сравнения и совместную обработку совокупности снимков за разные даты, которые геометрически совмещаются и обрабатываются вместе, подобно многозональному снимку. Имеется много способов обработки разновременных снимков, которые объединяют в три основные группы: *преобразование снимков*, *графическое представление изменений* и *классификация объектов по разновременным снимкам для изучения изменений*.

**Преобразование разновременных снимков.** В группу преобразований снимков, выполняемых для выявления изменений, входят следующие способы.

**Вычитание разновременных снимков** применяют, когда снимки получены одной и той же или похожими съёмочными системами, после проведения радиометрической калибровки и коррекции за различие атмосферных условий. На неизменившихся участках разность значений яркости близка к нулю, а на изменившихся — имеет положительные или отрицательные значения (в зависимости от направленности изменений). Результат вычитания представляют в виде изображения в определенной цветовой гамме. Например, если оценивается изменение состояния растительности по ближней инфракрасной зоне, можно закодировать участки уменьшения яркости красными оттенками (ухудшение состояния растительности), а ее увеличения — зелеными (улучшение состояния растительности). Достоинство способа — простота и наглядность, недостаток — необходимость тщательной предварительной взаимной коррекции снимков, требующей значительных затрат времени.

**Получение многовременных индексов** — отношений значений спектральной яркости идентичных пикселей разновременных снимков. При отсутствии изменений простое отношение значений яркости в двух одинаковых спектральных зонах за две даты будет близко к единице, а для изменившихся участков будет отличаться от единицы. Преимущество способа в простоте расчетов. Однако,

как и при вычитании снимков, необходима их предварительная радиометрическая коррекция. Иногда проводят взаимную калибровку снимков по значениям яркости неизменившихся участков. По результатам расчета индексов может быть построено индексное изображение с четким выделением участков изменений исследуемых объектов.

**Цветовой синтез разновременных снимков** предполагает совмещение снимков за три даты в сочетании RGB. В случаях, когда меняются не границы распространения, а спектральные характеристики объектов, такой синтез позволяет выделить участки с разным характером изменений (высыхание, обводнение, развитие растительности, сход снежного покрова и т. п.). При изменении пространственного положения объектов можно получить цветное синтезированное изображение, на котором одновременно отобразится положение исследуемого объекта на разные даты.

Для успеха этого подхода необходимо, чтобы исследуемые динамичные объекты четко выделялись на окружающем фоне. Тогда получают яркое, контрастное изображение, на котором присутствует изображение изменившегося объекта за все три даты, имеющее для каждой даты свой цвет. Изменения оцениваются по полученному изображению визуально, а геометрические параметры, например площадь объекта на разные даты, определяются с помощью компьютерных программ.

**Графическое представление изменений.** Другой подход основан на графическом представлении значений яркости исследуемых объектов в одной и той же спектральной зоне на осях, отражающих разные даты съемки, т. е. в пространстве временных признаков (рис. 3.30). При этом значения яркости неизменившихся участков группируются вдоль линии, идущей из начала координат графика вправо под углом  $45^\circ$ . Объекты, ставшие темнее, размещаются ниже, а объекты, ставшие светлее, — выше этой линии. Можно задать новую систему координат в пространстве спектральных признаков. Одна из осей системы будет совмещена с линией, идущей под углом  $45^\circ$  на исходном графике (ось отсутствия изменений), а вторая будет направлена перпендикулярно (ось изменений). Такой разворот осей называют *дельта-преобразованием*<sup>1</sup> и его применение для преобразования снимков позволяет получить наглядное изображение динамических изменений (рис. 3.31).

**Многомерный анализ изменений** основан на материалах вычитания разновременных снимков. Обычно анализ проводят графически, откладывая значения яркости объекта (в разных спектральных зонах) за несколько дат на одном или нескольких двумерных графиках. Линия, соединяющая значения за конкретные даты, ха-

---

<sup>1</sup> Буква  $\Delta$  (дельта) традиционно используется для обозначения изменения какой-либо величины.

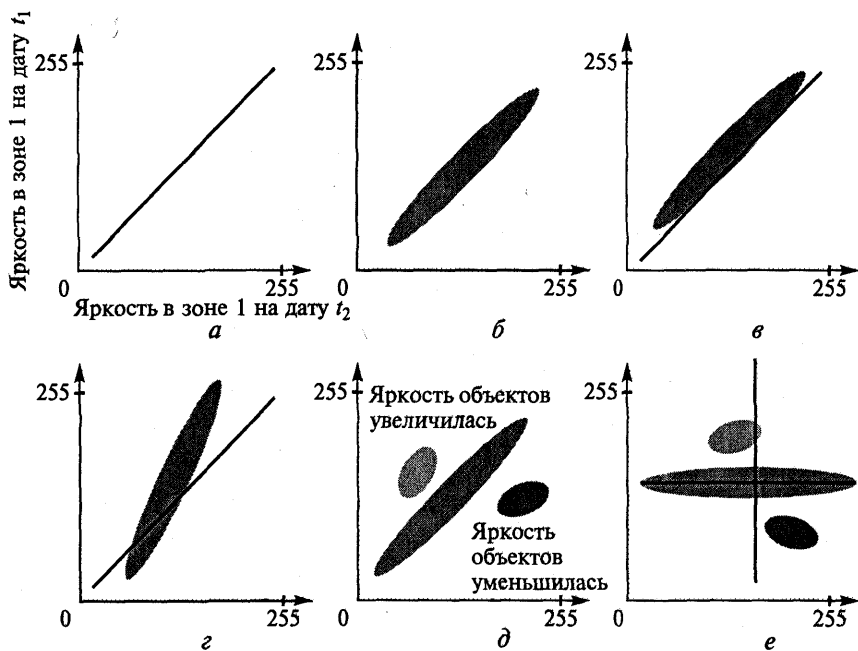


Рис. 3.30. Понятие о дельта-преобразовании. Графики значений яркости в одной спектральной зоне в разное время  $t$ :

$a$  — изменений нет;  $b$  — разброс значений яркости в пределах естественной изменчивости;  $c, z$  — искажение яркости, вызванное атмосферной дымкой ( $c$ ) и изменением параметров съемки ( $z$ );  $d$  — изменения яркости объектов местности;  $e$  — разворот осей (для более наглядного отображения изменений)

рактически характеризует ход и величину динамических изменений яркости. Такие графические приемы используют, например, для наглядного представления динамики созревания сельскохозяйственных культур (см. рис. 2.8), восстановления растительности на вырубках. Способ нагляден и наиболее часто применяется при анализе серии из нескольких разновременных снимков.

**Классификация объектов для изучения изменений.** При одновременном изучении изменения многих типов объектов применяют более сложные способы, основанные на классификации объектов.

**Сравнение результатов классификаций объектов по снимкам за разные сроки** проводят путем наложения границ распространения определенных классов на двух разновременных классифицированных изображениях. В результате составляется карта изменений, показывающая пространственное распределение изменений (замещений), а также матрица изменений, в ячейках которой указано количество пикселей (площади) для всех имеющихся на карте сочетаний классов. При числе классов  $n$  количество их сочетаний

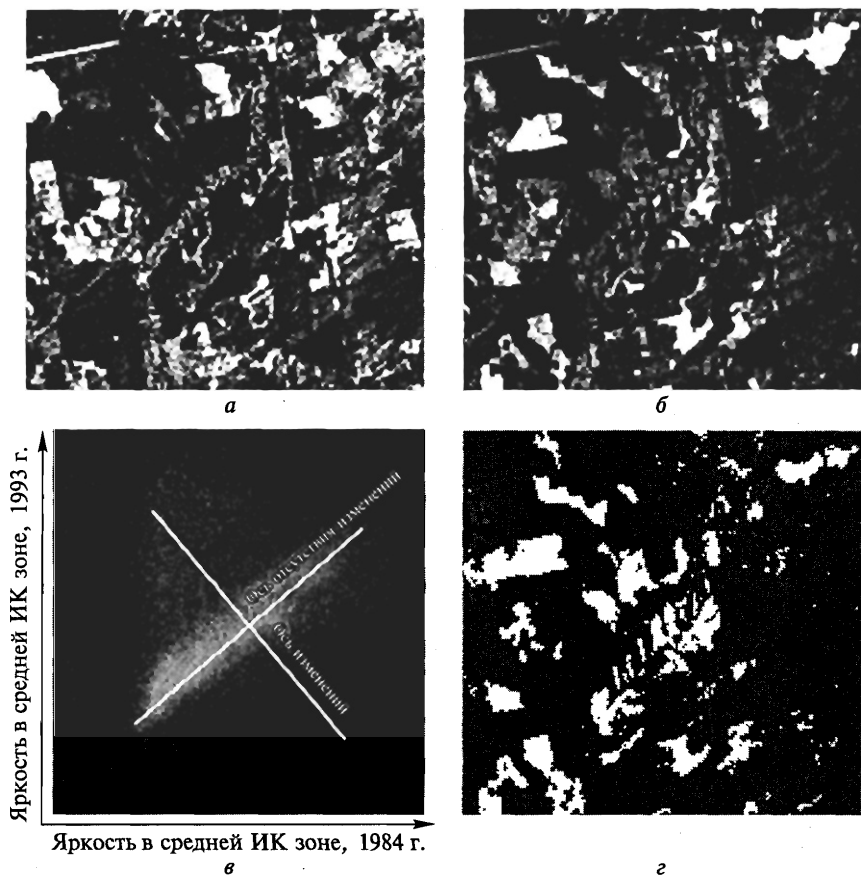


Рис. 3.31. Применение дельта-преобразования:

*а* — снимок TM/Landsat, 1984 г.; *б* — снимок TM/Landsat, 1993 г., *в* — график изменения значений спектральной яркости; *г* — участки вырубок (светлые) и возобновления (темные) леса на изображении, полученном дельта-преобразованием

может достигать  $n^2$ , при  $n > 4$  карта изменений становится трудной для восприятия. Поэтому в случае большого числа классов на сравниваемых картах выделяют смысловые группы сочетаний и генерализуют матрицу изменений, и соответственно карту изменений (рис. 3.32). Качество карт изменений зависит от достоверности классификации каждого из исходных снимков и точности их совмещения. Этот способ целесообразно применять, когда снимки значительно различаются по радиометрическим свойствам и их нельзя обрабатывать как многозональный снимок, составленный из разновременных изображений.

Определение классов	Год	1992						
		№ класса	1	2	3	4	5	6
1986	1	1 60,8 3,2%						14 90,7 4,8%
	2		2 18,8 1,0%					
	3	7 17,6 0,9%		3 10,6 0,6%				
	4			9		4 23,2 1,2%		
	5						5 239,8 12,8%	
	6	8 37,8 2,0%	10 17,3 0,9%			11 70,3 3,7%	12 278,5 14,9%	6 573,8 30,6%

Рис. 3.32 Генерализованная матрица изменений классов состояния растительности в районе Мончегорска, составленная по результатам анализа разновременных снимков MSS/Landsat (в ячейках матрицы указаны номер класса на карте изменений, его площадь (км<sup>2</sup>) и процент от общей площади)

**Классификация объектов по разновременным снимкам** проводится по совмещенному изображению, включающему спектральные зоны снимков за разные даты. Используют алгоритмы классификации как с обучением, так и без обучения. Успех такого подхода зависит от того, насколько четко изменившиеся участки отличаются от неизменившихся по спектральным признакам на снимках. Если различия достаточно велики, то такой подход проще, чем сравнение классификаций объектов, выполненных по разновременным снимкам. Снимки должны быть сравнимы радиометрически (т.е. пройти взаимную калибровку) для исключения ложных изменений, вызванных различиями в условиях съемки, разносезонностью снимков и т.п.

При одновременном использовании всех спектральных зон разновременных снимков классификация осложняется в связи с большим объемом и избыточностью информации, поэтому требуется использование иных, более сложных методов.

**Дешифрирование объектов по динамическим признакам.** Кроме выявления изменений (динамики) объектов выявляют и тип объектов по их временному образу. Этот подход используют, например, для различения озимых и яровых культур на серии снимков. Для этого применяют способ сравнения результатов классификации объектов по разновременным снимкам либо создают из разновременных снимков совмещенное изображение и анализируют его подобно многозональному снимку.

### 3.3. Геометрические свойства и фотограмметрическая обработка снимков

Фотограмметрическая обработка позволяет определять по снимкам пространственное положение объектов, получать их геометрические характеристики, создавать топографические карты. Ее теоретической основой служат математические зависимости между координатами точки на местности и координатами ее изображения на снимке, которые имеют разный вид для фотографических, сканерных и радиолокационных снимков. Кроме того, в формулы, устанавливающие связь между координатами, входит ряд параметров, характеризующих съемочную аппаратуру, вид и условия съемки, которые не всегда заранее известны. Для определения съемочных параметров разработаны специальные, нередко достаточно сложные приемы и методики, составляющие необходимый элемент фотограмметрической обработки.

Традиционные и компьютерные технологии фотограмметрической обработки снимков обеспечивают:

- преобразование изображений первичного снимка в новое изображение, представленное в требуемой проекции и масштабе;

- определение пространственных координат точек местности, в частности для последующего построения цифровой модели рельефа;

- определение плановых размеров объектов (длин, площадей) и их относительных высот;

- изготовление графического оригинала карты, включающего контурную часть и горизонтали, а также других геоинформационных материалов;

- изучение динамики объектов — определение геометрических показателей изменений их пространственного состояния.

Все практические способы фотограмметрической обработки основаны на геометрических свойствах снимков, которые в учебных целях целесообразно рассматривать отдельно для одиночного снимка, для стереоскопической пары снимков и для разновременных снимков.

#### 3.3.1. Одиночный снимок

Ради ясности изложения существа геометрических свойств снимков и наиболее простого получения необходимых математических зависимостей придется схематизировать условия аэрокосмической съемки и рассматривать не реальные, а идеальные снимки, которые строго соответствуют принятым теоретическим условиям.

**Идеальный кадровый снимок.** Рассмотрим идеальный случай получения снимка на примере аэрофотосъемки, когда оптическая ось кадровой аэрофотокамеры направлена строго по отвесной ли-

нии вниз, а снимаемая местность представляет собою горизонтальную плоскость. В этом случае получают идеальный горизонтальный снимок, численный масштаб которого равен

$$\frac{1}{M} = \frac{1}{H} = \frac{f}{H},$$

т. е. он зависит только от высоты съемки  $H$  и от фокусного расстояния камеры  $f$  и одинаков во всех частях снимка. Все контуры на таком идеальном снимке и на местности подобны, а геометрические соотношения между объектом и его изображением имеют простейший вид. Координаты одних и тех же точек на местности  $X_0, Y_0$  и на снимке  $x_0, y_0$  связаны так:

$$X_0 = x_0 \frac{H}{f} = x_0 M,$$

$$Y_0 = y_0 \frac{H}{f} = y_0 M.$$

Аналогично соотношение между площадью контура на местности  $\bar{S}_0$  и на снимке  $\bar{s}_0$ :

$$\bar{S}_0 = \bar{s}_0 \frac{H^2}{f^2} = \bar{s}_0 M^2.$$

Линейный размер или расстояние между точками на местности  $\bar{L}_0$  и на снимке  $\bar{l}_0$  выражается такой же зависимостью:

$$\bar{L}_0 = \bar{l}_0 \frac{H}{f} = \bar{l}_0 M.$$

Если масштаб используемого снимка неизвестен, то его можно определить путем сравнения длины идентичных отрезков, измеренных на снимке  $\bar{l}_0$  и топографической карте  $\bar{l}_K$ :

$$\frac{1}{M} = \frac{1}{M_K} \frac{\bar{l}_0}{\bar{l}_K}.$$

Значение масштаба будет получено тем точнее, чем длиннее отрезок, взятый на снимке.

**Геометрические свойства реального кадрового снимка. Источники искажений.** Приведенные строгие формулы справедливы только для идеальных снимков, которые хотя и получены путем центрального проектирования, но по своим геометрическим свойствам соответствуют плану в ортогональной проекции. Для реальных снимков из-за несовершенства съемочной аппаратуры, условий выполнения съемки, неровностей рельефа местности соответствующие зависимости, в которые дополнительно входят еще

и другие съемочные параметры, имеют очень сложный вид. Поэтому в фотограмметрии геометрические свойства реальных плановых снимков, обычно имеющих углы наклона не более  $3^\circ$ , часто оценивают путем сравнения их с идеальными снимками. Расхождения между ними называют *геометрическими* (фотограмметрическими) *искажениями* снимков. Рассмотрим наиболее распространенные геометрические искажения кадрового планового снимка, обусловленные его наклоном, рельефом местности и кривизной Земли.

**Наклон снимка.** Если снимок не строго горизонтален, то контуры на нем имеют перспективные искажения. Например, параллельные на местности линии изображаются на наклонном (перспективном) снимке сходящимися. В отличие от строго горизонтального снимка у перспективного снимка масштаб неодинаков в разных его частях и по разным направлениям, он зависит не только от  $H$  и  $f$ , но и от угла наклона снимка  $\alpha$  и положения точки на снимке. На рис. 3.33 изображены горизонтальный и наклонный снимки, полученные из одного центра проекции  $S$ . Очевидно, что по линии пересечения плоскостей снимков масштаб их будет одинаков. Эта линия  $h_c h_c$  называется *линией неискаженных масштабов*. Она делит перспективный снимок на две части: на одной из них (верхней) масштаб мельче, на другой (нижней) крупнее, чем на горизонтальном снимке.

Углы, измеренные по перспективному снимку, не будут равны соответствующим горизонтальным углам на местности. Не искажены будут только углы с вершиной в единственной точке, лежащей на линии неискаженных масштабов — *точке нулевых искажений*, обозначаемой буквой  $c$ . Она находится от главной точки  $o$  на расстоянии  $oc = f \operatorname{tg} \frac{\alpha}{2}$ . У плановых снимков, имеющих небольшие

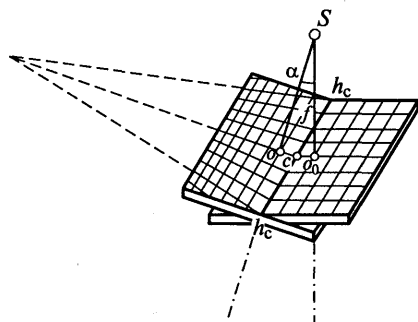


Рис. 3.33. Схема горизонтального и наклонного (перспективного) снимков

углы наклона (до  $3^\circ$ ), точка нулевых искажений расположена в центре снимка, рядом с главной точкой.

Допустим, что по идеальному и реальному снимкам измерено расстояние  $r_0$  и  $r$  от центра снимка до какой-либо одной и той же точки. Из-за перспективных искажений эти расстояния не совпадут, а будут различаться на величину  $\delta_\alpha = r_0 - r \neq 0$ . Чем больше угол наклона аэроснимка, тем больше это расхождение. Величину искажения в положении точки на



снимке  $\delta_\alpha$  из-за перспективы можно оценить по приближенной формуле

$$\delta_\alpha = \frac{r^2}{f} \sin \alpha.$$

Искажение вследствие наклона снимка  $\delta_\alpha$  в зависимости от того, где находится точка — выше или ниже линии неискаженных масштабов, — уменьшает, либо увеличивает длину радиального отрезка  $r$ . Отсюда вытекает практический вывод: длина отрезка, проходящего через центр кадрового снимка и симметричного относительно центра, не искажается под влиянием наклона снимка. Расчеты по приведенной формуле показывают, что искажение из-за угла наклона плановых снимков достигает нескольких миллиметров, что значительно превосходит погрешности измерений по снимкам даже простейшими средствами.

**Рельеф местности.** Если сфотографированная местность не плоская, а расчлененная, то положительные формы рельефа, расположенные ближе к съемочной камере, изобразятся на снимке в более крупном масштабе, чем отрицательные. Таким образом, рельеф влияет на масштаб снимка. Для вычисления масштаба  $\frac{1}{M_h}$  изображения на снимке участков местности, имеющих положительное превышение  $h$  относительно плоскости, выбранной за начальную, применяют формулу

$$\frac{1}{M_h} = \frac{1}{M} \frac{H}{H - h},$$

где  $\frac{1}{M}$  — масштаб изображения в начальной плоскости.

Влияние рельефа вызывает смещение точек  $1$  и  $2$  на реальном снимке относительно их положения  $I_0$  и  $2_0$  на идеальном снимке (рис. 3.34). За величину искажения, обусловленного рельефом местности  $\delta_n$ , принимают отрезки  $1 - I_0$  и  $2 - 2_0$ , которые радиально направлены в одну точку снимка — *точку надира*  $n$ .

Точка надира (третья основная точка снимка) является точкой пересечения снимка отвесной линией, проходящей через центр проекции. Точка надира находится от главной точки на расстоянии  $on = ftg\alpha$ , которое для планового снимка может быть несколько миллиметров. Как это наглядно видно на рис. 3.34, при положительном превышении ( $II_0 = +h$ ), т. е. когда точка расположена выше начальной плоскости, искажение, вызываемое рельефом, будет направлено от точки надира, при отрицательном ( $III_0 = -h$ ) — к точке надира. Следовательно, изображения более высоких точек на местности будут смещены по направлению от центра, а более низких — к центру снимка (рис. 3.35).

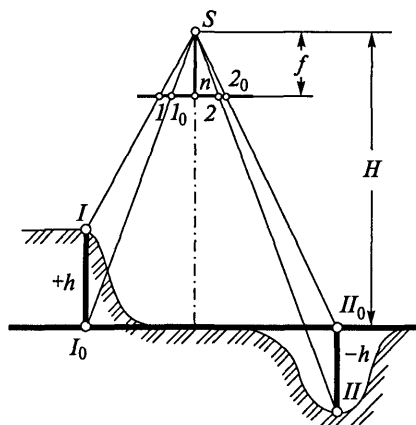


Рис. 3.34. Смещение точек на снимке, обусловленное рельефом местности

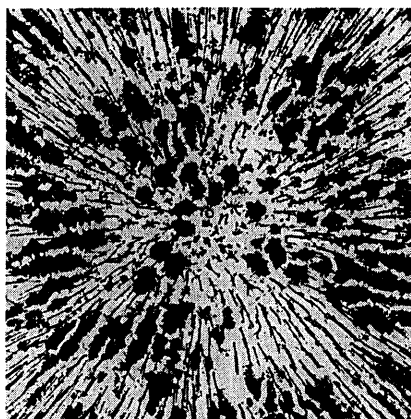


Рис. 3.35. Точка надира на снимке. Изображения крон деревьев на зимнем крупномасштабном горизонтальном аэрофотоснимке направлены радиально от точки надира n

Величину искажения вследствие рельефа местности вычисляют по формуле

$$\delta_h = \pm h \frac{r}{H} = \pm h \frac{r}{fM}.$$

Например, если местность с относительными превышениями  $\pm 50$  м сфотографирована с высоты 3 км, то искажение из-за рельефа на краях аэрофотоснимка характеризуется величиной

$$\delta_h = \pm 50\ 000 \frac{70}{3\ 000\ 000} \approx \pm 1,2 \text{ мм.}$$

Искажения возрастают от центра к краю снимка. Для снимков, полученных одной и той же камерой, они пропорциональны масштабу, а при одинаковом масштабе — больше у снимков, полученных короткофокусной камерой. Из формулы следует, что, если две точки с равными по величине, но противоположными по знаку превышениями относительно начальной плоскости находятся на прямой, проходящей через центр снимка и на равном расстоянии от него, то длина отрезка между этими точками не изменится из-за рельефа. К такому же выводу можно прийти относительно искажения площади замкнутого контура, расположенного вокруг центра снимка.

Искажение длины и азимута наклонного отрезка зависят от его положения на снимке. У отрезков, по направлению совпадающих с направлением на точку надира, изменится только длина. Если отрезок наклонен к центру снимка, то он изобразится удлинен-

ным, если от центра — укороченным. В результате влияния рельефа прямые линии на местности могут на снимке изобразиться кривыми линиями, например точки прямолинейного профиля, проложенного поперек горной долины.

Искажения, вызываемые рельефом местности, наиболее ощутимы у аэроснимков. У космических снимков, получаемых с больших высот, эти искажения незначительны, их приходится учитывать только для высокогорных районов.

**Кривизна Земли.** Влияние кривизны Земли на положение точки на снимке схоже с влиянием рельефа — оно вызвано тем, что точки местности вследствие сферичности Земли не лежат в одной плоскости (рис. 3.36). Смещение точки на снимке из-за кривизны Земли равно:

$$\delta_R = r^3 \frac{H}{2R_3 f^2},$$

где  $r$  — расстояние от центра снимка до точки;  $H$  — высота съемки;  $f$  — фокусное расстояние камеры;  $R_3$  — радиус Земли.

Величины искажений из-за кривизны Земли у аэроснимков малы и ими можно пренебречь, но у космических снимков они значительны и их приходится учитывать при фотограмметрической обработке.

Влияние наклона снимка, рельефа местности и кривизны Земли на положение точки на снимке рассмотрено раздельно. На самом деле они действуют совместно, компенсируясь или усиливаясь. Эти искажения минимальны в центральной части снимка и увеличиваются к его краям. Поэтому наиболее пригодна для измерений центральная часть аэрокосмического снимка, так называемая *рабочая площадь*, которая характеризуется также и лучшим качеством изображения.

**Геометрические свойства сканерного снимка.** Сравним геометрию кадрового (фотографического) и сканерного снимков. Рассмотрим случай, когда первый снимок получен кадровой фотокамерой, а второй — оптико-механическим сканером с линейной разверткой. Изображение кадрового снимка, построенное объективом на плоскости, представляет собою центральную проекцию, которая, как уже отмечалось, для горизонтального снимка и плоской местности совпадает с ортогональной. Изображение сканерного снимка по направлению полета и направлению сканирова-

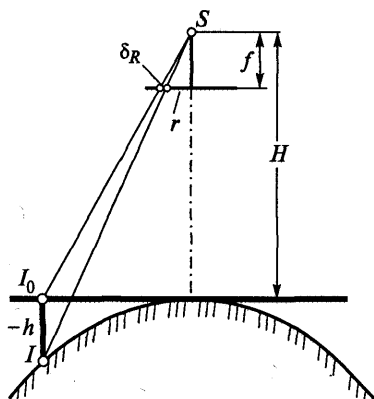


Рис. 3.36. Влияние кривизны Земли на положение точки на снимке

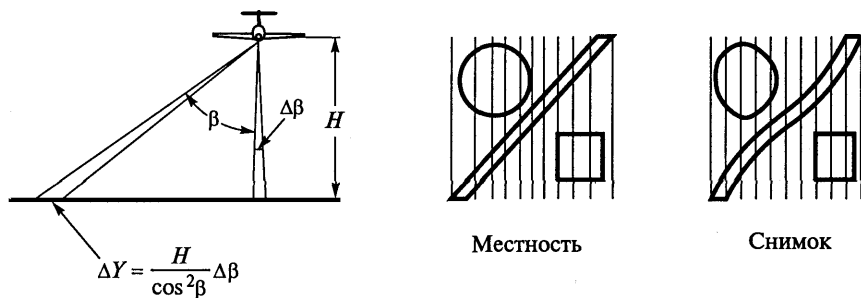


Рис. 3.37. Геометрические искажения сканерного снимка при оптико-механическом сканировании

ния строится в различных проекциях. В направлении полета изображение получается в ортогональной проекции. В перпендикулярном направлении, вдоль строки, проекция сканерного снимка перспективная. При оптико-механическом сканировании с постоянной угловой скоростью с увеличением угла визирования  $\beta$  масштаб изображения вдоль строки становится более мелким:

$$\frac{1}{M_\beta} = \frac{1}{M_N} \cos^2 \beta,$$

где  $\frac{1}{M_N}$  — масштаб изображения в надире;  $\frac{1}{M_\beta}$  — масштаб изображения при угле визирования  $\beta$ ; следовательно, размер площадки на местности  $\Delta Y$ , соответствующей мгновенному углу зрения сканера  $\Delta \beta$ , увеличивается к краям снимка (рис. 3.37). Перспективность изображения вдоль строки приводит к геометрическим искажениям сканерного снимка: круг на плоской местности изображается на нем неправильным овалом, прямая — кривой, квадрат — прямоугольником и т.д. Геометрические искажения на сканерном снимке растут с увеличением угла визирования (рис. 3.38). Только когда угол обзора невелик, как, например, у сканера MSS/Landsat  $\beta = \pm 5,8^\circ$ , искажениями можно пренебречь и так называемую сканерную проекцию можно принять за ортогональную.

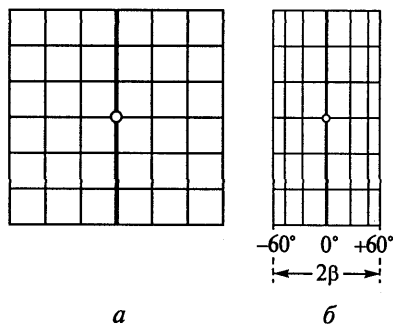


Рис. 3.38. Изображение сетки квадратов местности (а) на снимке, полученном оптико-механическим сканером (б)

Смещение из-за рельефа местности на сканерных снимках направлено по перпендикулярно к линии полета.

Геометрия сканерного снимка, полученного оптико-электронным сканером с линейкой ПЗС (ПЗС-снимка), более проста, чем рассмотренного выше снимка, полученного оптико-механическим сканером. Его проекция вдоль полета также ортогональна, а вдоль строки, как и у кадрового снимка, является центральной. Таким образом, масштаб вдоль строки идеального ПЗС-снимка, как и у кадрового, не зависит от угла визирования и одинаков в центре и на краю снимка.

Геометрические свойства снимков, полученных другими типами сканеров, несколько отличаются от рассмотренных. Однако, поскольку формирование любого сканерного изображения происходит не мгновенно, а в течение некоторого времени, на геометрию сканерного снимка влияет больше факторов, чем на геометрию кадрового снимка. Например, это неизбежные углы тангажа, крена, рыскания самолета, летящего по аэросъемочному маршруту, а при космической съемке — вращение Земли, вследствие которого прямоугольный участок земной поверхности (одна сторона которого параллельна линии полета) изобразится на сканерном снимке деформированным параллелограммом.

**Геометрические свойства радиолокационного снимка.** Снимок, получаемый радиолокатором бокового обзора, по своей геометрии отличается от фотографического и сканерного. В направлении полета проекцию радиолокационного снимка, как и сканерного, можно считать ортогональной. Особенности геометрии радиолокационного снимка в направлении, перпендикулярном линии полета, т.е. вдоль строки (с которой совмещена ось  $y$  снимка) поясняет рис. 3.39. Рассмотрим отображение на радиолокационном снимке горизонтальной местности, на которой выделены точки:  $A$  — в ближнем плане полосы обзора,  $I_0$  — в среднем и  $B$  — в дальнем плане. Допустим, что в точке  $I_0$  находится вертикальный объект  $I_0I$  высотой  $h$ . Поскольку основой для построения радиолокационного изображения вдоль строки служат измеряемые наклонные дальности  $D$ , то спроектируем точки  $A$ ,  $I_0$ ,  $I$  и  $B$  на рис. 3.39. В результате высо-

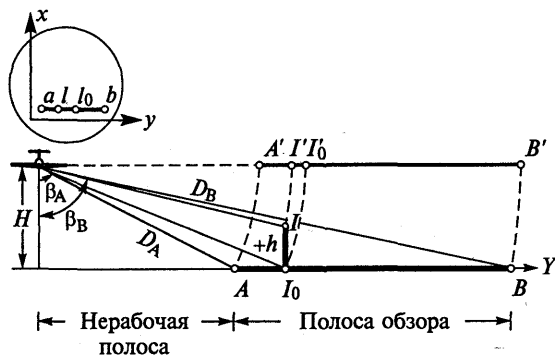


Рис. 3.39. Построение изображения вдоль строки радиолокационного снимка (объяснение в тексте)

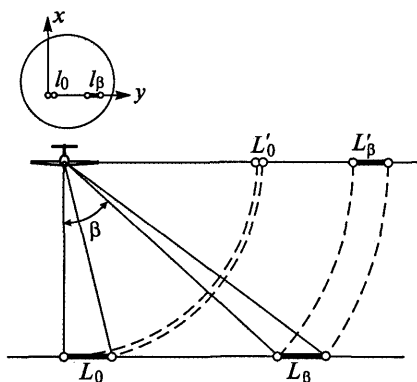


Рис. 3.40. Особенности радиолокационного изображения одинаковых горизонтальных отрезков под носителем ( $L_0$ ) и в полосе бокового обзора ( $L_\beta$ )

горных территорий к перспективному сокращению длины обращенных к радиолокатору склонов и даже к таким явлениям, как «опрокидывание вершин гор».

Другую особенность геометрии радиолокационного снимка иллюстрирует рис. 3.40, где показано, как с уменьшением угла визирования  $\beta$  одинаковые на местности горизонтальные отрезки  $L$  на снимке уменьшаются и изображение получается в очень мелком масштабе с низким разрешением. Именно по этой причине, как уже отмечалось в гл. 2, радиолокационная съемка непосредственно под носителем не производится. Таким образом, масштаб радиолокационного снимка рассмотренного вида неодинаков в разных его частях. Он мельче в ближнем плане полосы обзора и крупнее в дальнем. С увеличением угла визирования проекция радиолокационного изображения плоской горизонтальной местности приближается к ортогональной, но радиолокационные тени в горной местности становятся длиннее.

**Трансформирование снимков.** Первичным аэрокосмическим снимкам присущи геометрические искажения и непостоянство масштаба в разных частях снимка. Искажения растут с увеличением амплитуд рельефа местности и охвата съемкой, а также с уменьшением высоты полета; у фотографических (одномоментных) снимков они меньше, чем у сканерных и радиолокационных. При одинаковом охвате космические снимки искажены меньше, чем аэроснимки.

Для устранения искажений из-за угла наклона снимка, рельефа местности и кривизны Земли, а также для приведения снимков к заданному масштабу и проекции, выполняют их трансфор-

мая точка  $I$  расположится на проекции ближе к точке  $A$ , чем  $I_0$ . Такое взаимное положение точек, находящихся на разной высоте, сохранится и на радиолокационном снимке, который изображен в верхней части рисунка. Следовательно, высокие точки местности смещаются на радиолокационном снимке вдоль строки, т. е. перпендикулярно к линии направления полета. Однако на радиолокационном снимке в отличие от сканерного точка с положительным превышением смещается вдоль строки *ближе* к линии полета. Это (см. разд. 3.1) приводит при изображении

мирование. Применительно к сканерным и радиолокационным снимкам часто употребляют также термин *геометрическая коррекция*. Ранее широко применялось графическое, оптическое и особенно фотомеханическое трансформирование снимков, которые сейчас вытесняются компьютерными технологиями.

**Фотомеханическое трансформирование** кадровых фотоснимков производят на полуавтоматическом увеличителе — *фототрансформаторе*, в который устанавливается оригинальный негатив кадрового снимка (рис. 3.41). Для правильного трансформирования необходимо наклонить экран фототрансформатора и установить расстояние между объективом и экраном на величины, зависящие от угла наклона снимка при съемке и высоты фотографирования. Для этого на экране фототрансформатора путем его наклона совмещают изображение не менее чем четырех опорных точек — четких контурных точек (например, развилки дорог, слияния рек и т.д.), выбранных примерно по углам снимка, с соответствующими точками карты (основы), расположенной на экране. В результате образуется трансформированное изображение точно в масштабе карты, у которого устранены перспективные искажения. Его экспонируют на фотобумагу и получают трансформированный фотоотпечаток. Однако такой способ трансформирования не исключает искажений из-за рельефа местности, которые на снимках горного района весьма существенны. Для устранения этих искажений применяли специальные оптико-механические приборы — *щелевые трансформаторы*. При щелевом трансформировании изображение снимка проецируется на экран не целиком, а по частям, которая перемещается относительно снимка. Одновременно с перемещением масштаб проецируемой через щель части изображения снимка с помощью специального устройства меняется в зависимости от высоты рельефа местности. В результате получают ор-

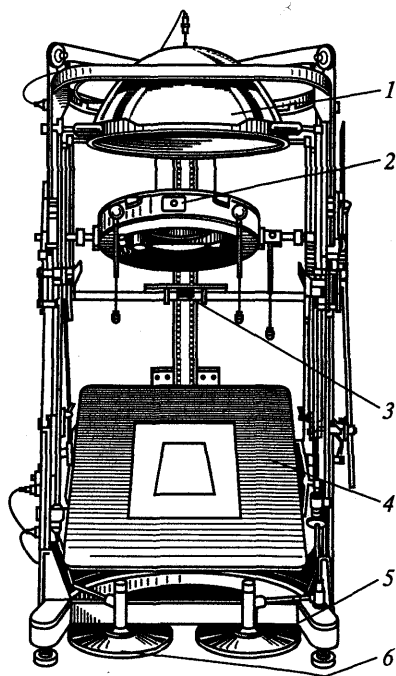


Рис. 3.41. Оптико-механический фототрансформатор, широко использовавшийся для трансформирования аэрофотоснимков:

- 1 — осветительное устройство; 2 —
- кассета для негативов; 3 — объектив;
- 4 — экран; 5 — диск перемещения
- объектива; 6 — диск наклона экрана

*тофотоснимок*, изображение которого не имеет искажений, обусловленных рельефом местности.

При *компьютерном трансформировании* цифровой снимок преобразуется в новый, для которого задана определенная проекция. Это преобразование основано на теоретической зависимости между координатами  $x_0, y_0$  трансформированного снимка и координатами  $x, y$  исходного:

$$x_0 = F_1(x, y, \Omega),$$

$$y_0 = F_2(x, y, \Omega),$$

где  $\Omega$  — совокупность съемочных параметров (характеристика съемочной аппаратуры, элементы ориентирования снимков, атмосферная рефракция и т.д.), влияющих на геометрию снимка. При космической съемке к этим параметрам относят и так называемые орбитальные данные.

С математической точки зрения трансформирование сводится к определению новых координат  $x_0, y_0$  каждого пиксела трансформированного снимка. Для необходимых вычислений используют два подхода. Если известны съемочные параметры, то координаты  $x_0, y_0$  прямо вычисляют по соответствующим формулам, которые в общем виде приведены выше. Если же съемочные параметры неизвестны, то приходится прибегать к приближенным вычислениям — аппроксимациям. Для этого применяют степенные полиномы (многочлены). В общем виде степенной полином имеет, например для абсциссы, вид:

$$x_0 = A_0 + A_1x + A_2x^2 + \dots + A_nx^n.$$

Чем выше степень  $n$  полинома, тем более сложную функциональную зависимость между исходными и трансформированными координатами он может аппроксимировать. Но в полином входят неизвестные коэффициенты  $A$ , которые обычно определяют по опорным точкам с известными координатами, получаемыми либо по карте, либо в поле геодезическими способами.

Алгоритмы, по которым выполняется компьютерное трансформирование, решают по существу две задачи: геометрическую и яркостную. Геометрическая задача трансформирования заключается в установлении новых положений центров пикселей трансформированного снимка и в выборе нового размера пиксела (передискретизация). В результате же решения яркостной задачи пикселям трансформированного снимка присваивается новое значение яркости.

Алгоритмы трансформирования кадровых, сканерных, радиолокационных снимков, а также снимков равнинной и горной местности различаются. В качестве примера рассмотрим наиболее часто используемые полиномы первого порядка, которые применяют-



ся, когда для кадрового снимка равнинной местности достаточно только его поворота, сдвига и масштабирования:

$$x_0 = A_0 + A_1x + A_2y,$$

$$y_0 = B_0 + B_1x + B_2y,$$

где  $A_0, A_1, A_2, B_0, B_1, B_2$  — неизвестные коэффициенты полиномов.

Теоретически для определения шести неизвестных необходимо решить шесть уравнений, в которых известны независимые величины  $x_0, y_0$ . Каждая опорная точка с известными координатами  $x_0$  и  $y_0$  позволяет составить два таких уравнения. Следовательно, для определения всех неизвестных необходимы три опорные точки, рационально размещенные на снимке.

Для трансформирования снимков, имеющих перспективные искажения, а также искажения, вызванные кривизной и вращением Земли, погрешностями съемочных систем, используют полиномы второго порядка, для определения коэффициентов которых требуется минимум шесть опорных точек. В более сложных случаях, например, при трансформировании радиолокационных снимков, применяют уравнения третьего порядка, для решения которых теоретически необходимы по крайней мере уже 10 опорных точек. Однако на практике используют значительно больше опорных точек. Это позволяет повысить точность и найти вероятнейшее значение неизвестных коэффициентов.

После определения величин коэффициентов полиномов вычисляют новые координаты углов трансформированного снимка и устанавливают в зависимости от решаемой задачи оптимальный размер пиксела. Таким образом, при компьютерном трансформировании есть возможность изменить не только геометрию исходного снимка, но формально и его пространственное разрешение. Следует иметь в виду, что хотя полиномиальные аппроксимации удобны для реализации, их недостатком является то, что даже при хорошем совпадении координат опорных точек реальное положение других пикселов может отличаться от вычисленного.

В результате перечисленных операций решается геометрическая задача трансформирования. Теперь необходимо установить яркость каждого нового пиксела, т. е. решить яркостную задачу трансформирования. Для этого по координатам пикселов трансформированного снимка с помощью компьютерной программы определяют соответствующие им пикселы на исходном снимке. Как правило, однозначного соответствия пикселов не будет — в пределы одного нового пиксела попадут части нескольких исходных. Для установления искомого значения яркости можно воспользоваться несколькими вариантами, например, для яркости нового пиксела можно принять яркость ближайшего пиксела на исходном снимке или взять среднее из яркостей окружающих пикселов и т. д.

Космические сканерные снимки перед их распространением обычно проходят предварительную геометрическую коррекцию, в процессе которой устраняются их основные искажения. Для приведения откорректированных снимков в проекцию топографической карты бывает достаточно полиномиальной аппроксимации первого порядка. Иногда поставщики снимков заранее приводят их в одну из картографических проекций по орбитальным данным, но получаемая при этом точность обычно ниже, чем при использовании опорных точек.

Для снимков горных районов применяют компьютерное *ортотрансформирование* в целях устранения искажений вследствие рельефа местности. Для ортотрансформирования, которое выполняется по более сложным алгоритмам, необходима кроме опорных точек еще и цифровая модель рельефа.

Таковы некоторые из возможных схем построения алгоритмов для компьютерного трансформирования аэрокосмических снимков. Необходимо учитывать, что в процессе трансформирования улучшаются геометрические, но ухудшаются изобразительные и радиометрические (фотометрические) свойства снимков. Поэтому всегда надо помнить, что трансформированный снимок менее пригоден для дешифрирования и особенно для компьютерной классификации.

**Фотосхема, фотоплан, фотокарта.** При изучении обширных территорий разрозненные снимки соединяются воедино в фотосхемы, фотопланы и фотокарты, которые используют в качестве картографической основы (фотоосновы, дистанционной основы) при тематическом дешифрировании и картографировании.

Перед началом работы с комплектом аэрофотоснимков обычно собирают так называемый *накидной монтаж*, в котором контактные отпечатки совмещены друг с другом по перекрывающимся частям как вдоль одного маршрута, так и между соседними маршрутами.

В отличие от накидного монтажа *фотосхему* обычно монтируют из плановых аэроснимков, используя только ограниченную средними линиями перекрытий рабочую площадь и обрезая их перекрывающиеся края. Фотосхемы изготавливают для районов с равнинным рельефом. Фотосхему — одномаршрутную и многомаршрутную — можно рассматривать как схематический приближенный план местности.

Точные *фотопланы* монтируют из трансформированных (горизонтальных) аэроснимков. Проекция горизонтального аэроснимка плоской местности по своим измерительным свойствам близка к ортогональной проекции, поэтому смонтированные из снимков фотопланы соответствуют топографическим картам того же масштаба. Однако отдельные снимки фотоплана или даже участки одного снимка не удастся сделать одинаковыми по фотографиче-

ским характеристикам. Например, изображение однообразной монотонной поверхности, имеющей асимметричную индикатрису отражения, в разных частях снимка будет не одинаковым по тону (плотности). Поэтому у мелкомасштабных фотопланов, составленных из большого числа уменьшенных крупномасштабных снимков, изображение получается неоднородным и весьма пестрым, что нашло отражение в специальном термине — мозаичный фотоплан. Для горной территории используют ортофотоснимки, из которых монтируют *ортофотопланы*.

*Фотокарты* создаются по космическим снимкам. При компьютерном изготовлении фотокарт по космическим снимкам все они вначале трансформируются в одну и ту же проекцию. Затем проводится монтаж единого изображения по так называемым линиям шивки путем безразрывной стыковки снимков. Компьютер представляет большие возможности для согласования яркостей и контрастности соседних снимков. Для этого получают гистограммы яркостей перекрывающихся участков снимков и подбирают кривые воспроизведения яркостей, позволяющие сделать изображения на этих снимках идентичными. После создания единого изображения его нередко совмещают с отмывкой рельефа местности (цв. вкл. I, 19), наносят дороги, населенные пункты, делают надписи географических названий, что облегчает дальнейшее использование фотокарты.

### 3.3.2. Стереоскопическая пара снимков

Два снимка одного и того же участка, полученные с разных точек, имеют по сравнению с одним снимком принципиально новое качество: они позволяют получить объемную модель местности. По паре снимков можно определять не только плановые размеры объектов, но также их высоты и превышения точек. Иначе говоря, стереоскопическая пара снимков дает трехмерную характеристику местности. Измерительные стереопары снимков получают в результате стереофотограмметрических съемок, выполняемых непосредственно в поле, с самолета или со спутника.

**Определение высот местности по стереоскопической паре плановых снимков. Рабочие формулы.** Обращаясь к способам определения пространственного положения и размеров объектов по стереоскопической паре снимков, необходимо усвоить суть одного из основных понятий в области фотограмметрии, а именно понятия о *параллаксе*. Поясним его на простейшем примере — стереоскопической паре, составленной из идеальных кадровых аэрофотоснимков. Если попытаться совместить два снимка стереопары, полученных с различных точек съемочного базиса, то их изображения не совпадут и тем больше, чем расчлененнее рельеф местности. Под параллаксом понимается относительное смещение со-

ответственных точек изображения при совмещении по координатным меткам снимков, образующих стереопару. Величину смещения выражают через плоские координаты снимка. *Продольным параллаксом*  $p$  называется разность абсцисс изображения одной и той же точки местности на левом  $x_{\text{л}}$  и правом  $x_{\text{п}}$  снимках стереопары, т. е.

$$p = x_{\text{л}} - x_{\text{п}}$$

По величине продольного параллакса определяют высоты точек местности фотограмметрическим способом. Установим необходимые зависимости. На рис. 3.42 изображен идеальный случай аэрофотографической стереосъемки: базис и снимки горизонтальны, а направления съемки — параллельны. Непосредственно из чертежа (построив дополнительную прямую  $S_{\text{л}}I'_0$ , параллельную лучу  $S_{\text{п}}I_0$ ) можно установить простую, но важную зависимость между удалением  $H$  объекта на местности (точка  $I_0$ ) от центра проектирования  $S_{\text{л}}$ , величиной базиса фотографирования  $B$ , фокусным расстоянием аэрофотоаппарата  $f$  и продольным параллаксом  $p = o_{\text{л}}I_{0\text{л}} - o_{\text{п}}I_{0\text{п}} = x_{\text{л}} - x_{\text{п}}$ :

$$\frac{H}{f} = \frac{B}{p}$$

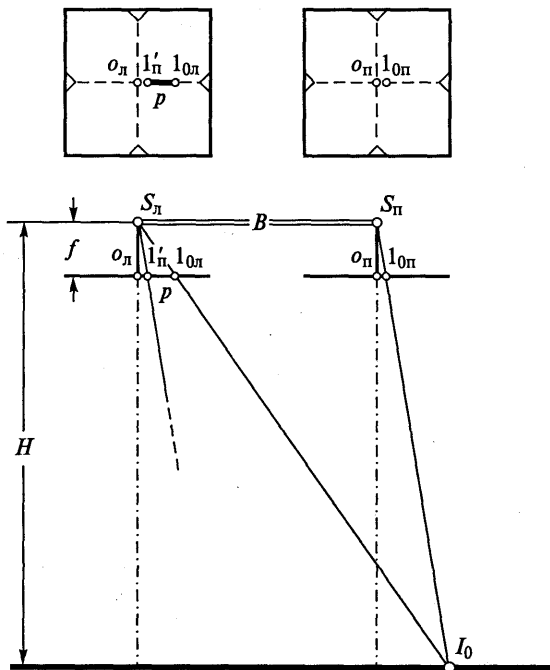


Рис. 3.42. Идеальный случай аэрофотографической стереосъемки (к выводу рабочих формул)

Эту зависимость можно написать в следующем виде:

$$p = B \frac{f}{H} = \frac{B}{M}.$$

Итак, продольный параллакс численно равен базису фотографирования, выраженному в масштабе снимка или, точнее говоря, в масштабе изображения горизонтальной плоскости, в которой лежит данная точка местности. Из полученной зависимости следует, что точки с одинаковыми продольными параллаксами имеют одну и ту же высоту; меньший параллакс соответствует более низкой точке, больший — более высокой. Если известны величины  $B$ ,  $p$ ,  $f$ , можно вычислить высоту фотографирования  $H$  над данной точкой, т. е. по существу определить *третью* координату (*аппликату*), характеризующую высоту точки. Итак, одиночный снимок позволяет определить только плоские координаты  $X$  и  $Y$ , а стереоскопическая пара снимков дает возможность получить три пространственные координаты (при начале координат в точке  $S_n$ ):

$$\begin{aligned} X &= x_n \frac{B}{p}; \\ Y &= y_n \frac{B}{p}; \\ H &= f \frac{B}{p}. \end{aligned} \quad (3.1)$$

Приведенные формулы устанавливают зависимость между координатами точки местности и ее изображений на стереоскопической паре горизонтальных снимков. Зная пространственные координаты точек, можно найти другие геометрические характеристики снятой местности, т. е. дать ее полное трехмерное описание. В таких случаях принято говорить, что по паре перекрывающихся снимков построена *пространственная фотограмметрическая модель* местности.

На практике часто требуется определить не абсолютную отметку, а превышение  $h$  между двумя точками местности или высоту какого-либо объекта. Для этого используют *разность продольных параллаксов*, которую принято обозначать  $\Delta p$ . Математическая зависимость между высотой объекта или превышением  $h$  между точками  $I$  и  $I_0$  и разностью продольных параллаксов  $\Delta p = p_I - p_{I_0}$ , которую можно получить из геометрических построений на рис. 3.43, имеет вид:

$$h = \Delta p \frac{H}{p + \Delta p}.$$

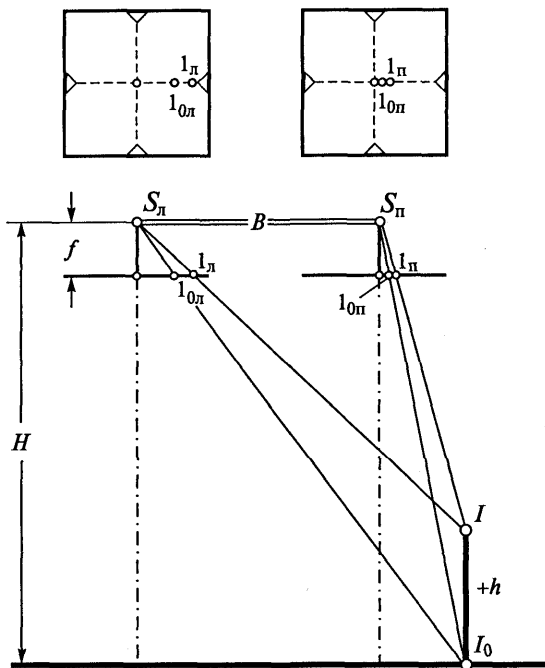


Рис. 3.43. К выводу математической зависимости между разностью продольных параллаксов  $\Delta p$  и относительной высотой (превышением)  $h$

Для практических расчетов эту важную фотограмметрическую формулу записывают упрощенно в нескольких видах:

$$h \approx \Delta p \frac{H}{b} = \Delta p \frac{Mf}{b} = \Delta p \frac{H^2}{Bf}, \quad (3.2)$$

где  $b$  — базис фотографирования, выраженный в масштабе снимка.

Следовательно, превышение между двумя точками  $h$  в натуре можно определить по значению разности продольных параллаксов  $\Delta p$  этих точек, но для этого необходимо знать значение остальных величин, входящих в формулы (3.2). Для их определения в фотограмметрии разработано несколько практических приемов. Не останавливаясь на них, отметим, что разность продольных параллаксов  $\Delta p$  измеряют с помощью специальных приборов по стереоскопическим снимкам, высоту съемки  $H$  определяют с помощью радиовысотомера, а длину съемочного базиса  $B$  вычисляют по пространственным координатам носителя, которые получают приемниками спутникового позиционирования ГЛОНАСС/GPS одновременно со съемкой местности; за базис же в масштабе снимка  $b$  при фотографической плановой съемке нередко принимают расстояние между главными точками снимков.

**Точность стереофотограмметрического определения высот.** Для идеального случая съемки погрешность высот, получаемых по стереоскопической паре снимков, в основном определяется точностью измерения продольных параллаксов, которую принято характеризовать средними квадратическими погрешностями  $m_p$ . Для вычисления ожидаемых погрешностей определения по снимкам высот (аппликат)  $m_H$  можно воспользоваться следующими формулами, которые вытекают из приведенных выше зависимостей:

$$m_H = m_p \frac{Mf}{b} = m_p \frac{H^2}{Bf}.$$

Так, например, для аэрофотоснимков масштаба 1 : 10 000 при  $f = 200$  мм,  $b = 70$  мм и  $m_p = 0,01$  мм получим  $m_H = 0,3$  м, а по космическим кадровым фотоснимкам масштаба 1 : 600 000 при  $f = 350$  мм,  $b = 180$  мм,  $m_p = 0,01$  мм отметки точек на местности удастся определить значительно грубее —  $m_H = 12$  м. Такая точность определения высот точек на местности по космическим фотоснимкам часто оказывается недостаточной. Уменьшить ошибку определения высоты при достигнутой точности измерения продольных параллаксов и установленной высоте полета спутника можно, как это следует из приведенных формул, путем увеличения длины съёмочного базиса  $B$  или фокусного расстояния съёмочной аппаратуры  $f$ . Это требование удастся практически реализовать при конвергентной оптико-электронной сканерной съемке «вперед — назад». По сравнению с плановой конвергентная съемка позволяет получать перекрывающиеся снимки стереопары с большего базиса, длина которого может приближаться к высоте съемки. Кроме того, в оптико-электронном сканере можно использовать зеркальные объективы со значительно более длинными фокусными расстояниями, чем у линзовых объективов, которыми снабжаются кадровые фотоаппараты.

Ориентировочный расчет показывает, что при космической стереосъемке оптико-электронным сканером, снабженным объективом с фокусным расстоянием  $f = 10$  м, с орбиты высотой  $H = 500$  км при съёмочном базисе  $B = H$  высотные отметки точек на местности можно получить с погрешностью  $m_H = 0,5$  м, что приближается к точности, достигаемой по аэрофотоснимкам.

Приведенные выше расчетные величины погрешностей стереофотограмметрического определения высот на местности характеризуют теоретически достижимую точность; на практике она обычно ниже.

**Деформация пространственной модели местности. Задача ориентирования снимков.** Приведенные в предыдущем разделе формулы для определения пространственных координат и превышений справедливы только для идеального случая аэрофотосъемки, когда снимки и базис строго горизонтальны. Однако реальные кадро-

вые снимки стереопары имеют продольный ( $\alpha_x$ ), поперечный ( $\alpha_y$ ) углы наклона и развернуты в своей плоскости (угол  $\kappa$ ), а высоты точек съемки не одинаковы и отличаются на некоторую величину  $\Delta H$ . Оказывается, что это приводит к деформации пространственной модели, полученной по таким плановым снимкам, — к ее наклону и искривлению. Если сравнить координаты одной и той же точки местности на идеальном ( $x_0, y_0$ ) и реальном ( $x, y$ ) плановых снимках, то они не совпадут. В курсах стереофотограмметрии выводятся формулы поправок в координаты планового снимка для перехода к координатам идеального снимка, полученного с определенной высоты

$$\begin{aligned}\delta_x &= \left( f + \frac{x^2}{f} \right) \alpha_x + \frac{xy}{f} \alpha_y - y\kappa + x \frac{\Delta H}{H}, \\ \delta_y &= \frac{xy}{f} \alpha_x + \left( f + \frac{x^2}{f} \right) \alpha_y + x\kappa + y \frac{\Delta H}{H}.\end{aligned}\tag{3.3}$$

Величины поправок  $\delta_x$  и  $\delta_y$  позволяют перевести измеренные на плановом снимке искаженные координаты  $x, y$  в координаты строго горизонтального идеального снимка

$$x_0 = x + \delta_x,$$

$$y_0 = y + \delta_y,$$

по которым затем вычисляют пространственные координаты и превышения по формулам (3.1) и (3.2). Но для этого необходимо определить углы наклона и разворота снимков, высоту съемки, которые входят в формулы для вычисления поправок. Эти неизвестные угловые и линейные величины, определяющие взаимное положение снимков в момент съемки и их положение в пространстве, в геодезической системе координат необходимы для восстановления неискаженной пространственной модели местности. Они получили название *элементов ориентирования* снимков, которые разделяют на элементы *внутреннего* и *внешнего (взаимного и геодезического)* ориентирования. Линейные элементы внутреннего ориентирования относятся к съемочному аппарату и определяют положение снимка относительно центра проектирования (см. гл. 2). Угловые элементы взаимного ориентирования характеризуют относительное положение снимков стереопары во время съемки. Элементы геодезического ориентирования определяют масштаб модели и ее положение относительно геодезической системы координат на местности.

Из теории фотограмметрии известно, что для восстановления по паре кадровых снимков неискаженной и правильно ориентированной в пространстве модели местности в точно заданном масштабе, т.е. такой модели, по которой возможно определить три



пространственные координаты точек местности в геодезической системе координат, необходимо знание пятнадцати угловых и линейных элементов ориентирования. Для сканерных же снимков, состоящих из многих строк, каждая из которых формируется плоским пучком лучей из своего центра проекции, число элементов ориентирования значительно больше. Определение элементов ориентирования снимков — важнейшая задача фотограмметрии, для решения которой прилагается много усилий. Наиболее сложно определить элементы внешнего ориентирования. На практике используют два основных пути. Один из них — непосредственные измерения в полете, когда, как уже отмечалось, с помощью систем спутникового позиционирования определяют положение носителя в момент съемки, а посредством радиовысотомера — высоту съемки и т. д. Другой путь, который также уже рассматривался в разделе о трансформировании снимков, основан на сравнении координат нескольких рационально расположенных на снимке опорных точек с их геодезическими координатами, которые предварительно необходимо определить при полевых работах на местности или по точной карте.

Таким образом, располагая стереопарой снимков, всегда можно наблюдать объемную стереоскопическую модель, но для точных измерений пространственной модели необходимо решить задачу ориентирования снимков, что обычно требует довольно сложных способов и приемов. Только в ряде частных случаев возможно относительно просто получить точные результаты. Например, для определения превышений между точками местности, которые на стереопаре аэрофотоснимков расположены рядом (например, высоты террасы, дерева и т. д.), из 15 элементов ориентирования достаточно знать лишь два: фокусное расстояние камеры (элемент внутреннего ориентирования) и длину съемочного базиса или высоту съемки (элемент внешнего ориентирования).

**Принцип стереоскопических измерений снимков.** Основная измерительная операция при обработке пары снимков — *стереоскопическое визирование* — наведение специальной марки измерительного прибора на стереоскопическую модель местности. Эта операция, при которой регистрируются измеряемые координаты и параллаксы, может выполняться визуально или автоматически.

Визуальное стереоскопическое визирование осуществляется так называемым *способом двух марок*. Сущность этого широко используемого способа заключается в следующем. Две совершенно одинаковые марки стереоизмерительного прибора геометрически правильной, например Т-образной, формы совмещают с идентичными точками изображения на левом и правом снимках (рис. 3.44). При стереоскопическом рассматривании снимков наблюдатель увидит только одну, но мнимую пространственную марку, совмещенную с точкой модели.

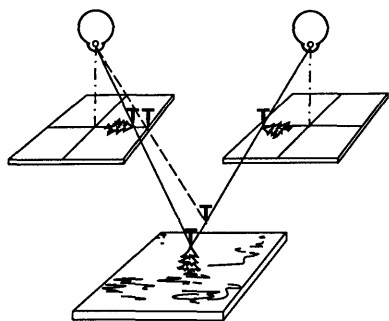


Рис. 3.44. Принцип стереофотограмметрических измерений снимков способом двух марок

специальных устройств (измерительных шкал, винтов и др.) и, следовательно, определить по снимку необходимые для последующих вычислений координаты  $x$ ,  $y$  и параллаксы  $p$  точек наведения.

Модифицированный способ двух марок с успехом применяется для стереоизмерений экранных снимков на компьютере. Измерительными марками в этом случае служат два идентичных курсора, вычленяемых из изображений и высвечиваемых ярким цветом на экране. Курсоры могут перемещаться как одновременно, так и относительно друг друга. Эти реализованные программно возможности позволяют наблюдателю с помощью мыши или клавиатуры навести пространственно воспринимаемую марку-курсор (стереокурсор) на любую точку стереомодели и зарегистрировать ее координаты и параллаксы в пикселах.

**Автоматические стереоизмерения** основаны на выполнении компьютером нескольких процедур, основная из которых заключается в отождествлении идентичных точек на левом и правом цифровом снимках стереопары путем оценки корреляции изображений. Эта задача решается так. При наведении марки-курсора на выбранную точку (пиксел) левого снимка для ее окрестности установленного размера (например,  $11 \times 11$  пикселей) и для фрагмента такого же размера правого снимка с помощью несложной программы вычисляется коэффициент взаимной корреляции  $k_r$ :

$$k_r = \frac{\sum (l_i - \bar{l})(\pi_i - \bar{\pi})}{\sqrt{\sum (l_i - \bar{l})^2 \sum (\pi_i - \bar{\pi})^2}},$$

где  $l_i$ ,  $\pi_i$  — значения яркости соответствующих пикселей левого и правого снимков стереопары;  $\bar{l}$ ,  $\bar{\pi}$  — средние значения яркости пикселей в пределах участков.

Затем сопоставляемый фрагмент правого снимка смещают на один пиксел и снова вычисляют  $k_r$ . Эта процедура шаг за шагом

Перемещение одной из реальных марок по направлению глазного базиса воспримется как движение пространственной марки по глубине (высоте). Перемещая реальные марки в плоскости снимков, совмещают стереоскопическую марку с точками модели, находящимися на разной высоте. Не обязательно, чтобы эти точки были контурными. Ими могут быть вершины холма, бровки террас и т.д.

Величины перемещений реальных марок в плоскости снимков можно измерить с помощью

повторяется (метод скользящего окна) в пределах зоны поиска, размер которой устанавливается исполнителем. Если размер зоны поиска вдвое больше, чем сопоставляемые фрагменты снимков, то для рассматриваемого случая будет вычислен 121 коэффициент корреляции.

Отождествление соответственных центральных точек участков на левом и правом снимках производится по максимальному значению коэффициента взаимной корреляции, быстро определяемому с помощью компьютера. Одновременно фиксируется взаимное положение сравниваемых участков путем регистрации пиксельных координат их центров. По такому принципу действует простейший цифровой стереокоррелятор, работа которого соответствует наведению человеком измерительной марки на поверхность стереомодели в определяемой точке. Наиболее точные результаты стереокоррелятор дает при обработке снимков местности с плавными формами рельефа, но при насыщенности изображения контрастными деталями; при сильно расчлененном рельефе и малой контурности стереокоррелятор работает не очень надежно.

**Стереофотограмметрическая обработка снимков.** Геометрические характеристики объектов получают в результате стереофотограмметрической обработки снимков, главное предназначение которой — определение высот точек местности с представлением их в виде числа (высотная отметка, превышение) или линии (горизонталь, профиль). Стереофотограмметрическая обработка снимков включает целый ряд технологических процессов: подготовительные работы, ориентирование снимков, собственно обработку (измерения) и регистрацию результатов. Основу стереофотограмметрической обработки составляют стереоскопические измерения пары снимков, которые сводятся к измерению плоских координат точек снимка и параллаксов. Обычно измерения выполняют с погрешностью 0,01—0,02 мм, которая при высокоточной обработке уменьшается до 0,001 мм, а при работах малой точности увеличивается до 0,1 мм. Для стереообработки используют стереофотограмметрические приборы и специализированные компьютерные комплексы, так называемые цифровые фотограмметрические системы.

Стереофотограмметрические приборы, исключая немногие простейшие, представляют собой сложные оптико-механические устройства. Для работы на таких приборах необходимо определенное профессиональное мастерство. Однако, когда инструмент подготовлен к работе, географ, обладающий даже небольшими навыками, может вести обработку самостоятельно.

Рассмотрим основные типы традиционных стереообработывающих приборов: измерительные стереоскопы, стереокомпараторы и универсальные приборы.

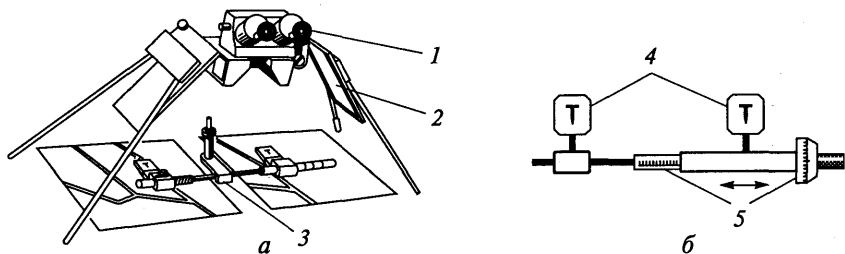


Рис. 3.45. Зеркальный стереоскоп с параллаксометром (а) и схема параллаксометра (б):

1 — бинокляр для стереонаблюдения; 2 — зеркала; 3 — параллаксометр; 4 — измерительные марки; 5 — шкалы микрометричного винта

**Стереоскопы** предназначены для стереоскопического рассматривания и проведения простейших измерений пары снимков. Для этого их дополняют несложными устройствами для измерения продольных параллаксов. Так, в комплект зеркального стереоскопа входит *параллаксометр* (рис. 3.45). Визирные (измерительные) марки параллаксометра награвированы на двух стеклянных пластинах, расстояние между которыми может изменяться и измеряться с помощью микрометричного винта со шкалой для отсчетов. Инструментальная точность таких измерений разности продольных параллаксов относительно невелика и только при весьма тщательной работе можно добиться, чтобы погрешности не превышали  $\pm 0,05$  мм.

**Стереокомпаратор** принадлежит к числу давно используемых стереофотограмметрических приборов (рис. 3.46). С его помощью выполняют измерения плоских координат точек снимка и парал-

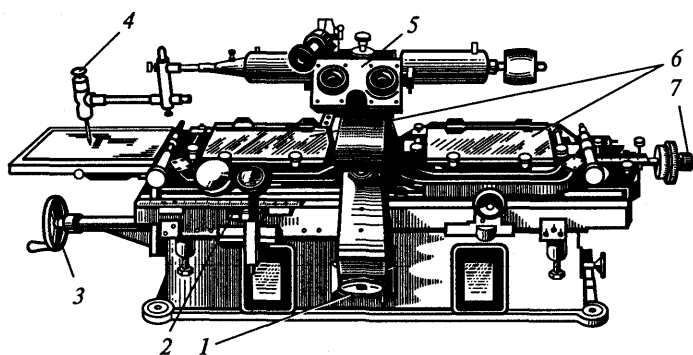


Рис. 3.46. Стереокомпаратор:

1 — штурвал для перемещения бинокляра; 2 — измерительная шкала; 3 — штурвал для перемещения снимков; 4 — чертежное устройство; 5 — бинокляра с измерительными марками для стереонаблюдения; 6 — кассеты для снимков; 7 — микрометричный винт для измерения продольных параллаксов

лаксов, обычно с точностью не ниже 0,01 мм. Для стереоскопических измерений цифровых снимков предназначен компьютерный стереокомпаратор, включающий стереоскопические очки и программы, обеспечивающие наведение измерительной марки курсора на стереоскопическую модель и регистрацию получаемых координат. Результаты измерений снимков на стереокомпараторах имеют промежуточное значение и используются для последующих вычислений пространственных координат точек местности по соответствующим формулам.

**Универсальные стереофотограмметрические приборы** предназначены для выполнения всего комплекса фотограмметрических работ, необходимых для составления топографических карт по аэроснимкам, включая взаимное, внешнее ориентирование снимков, отображение рельефа местности горизонталями, рисовку различных контуров и определение пространственных координат отдельных точек (рис. 3.47). Существует много конструкций универсальных приборов, масса некоторых из них достигает сотен килограммов. В зависимости от конструкции приборы имеют особые названия — стереопроектор, стереограф, стереопланиграф и т.д. Главной частью универсального прибора, который может быть аналоговым или аналитическим, является специальное решающее устройство, соответственно механическое или электронно-вычислительное, для решения уравнений связи между координатами точек на снимке и местности. При стереоскопическом наведении измерительной марки на какую-либо точку стереопары решающее устройство определяет три пространственные координаты этой точки в масштабе модели. При изготовлении карты с помощью универсального прибора измерительной

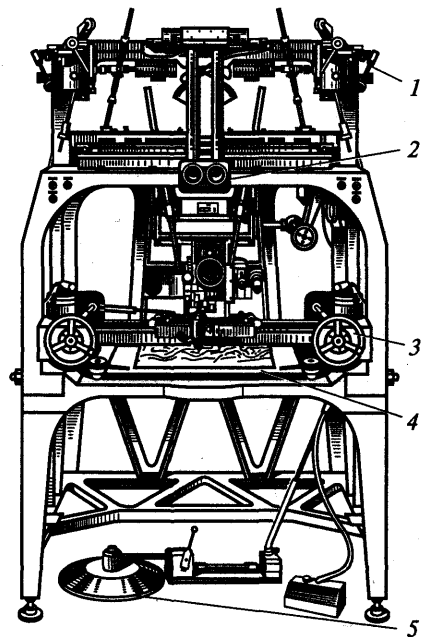


Рис. 3.47. Стереопроектор Г. В. Романовского — универсальный стереофотограмметрический оптикомеханический прибор, широко применявшийся для создания топографических карт по аэрофотоснимкам:

1 — механическое решающее устройство; 2 — бинокляр для стереонаблюдения; 3 — ручные штурвалы для планового перемещения чертежного устройства; 4 — чертежный стол; 5 — ножной диск, используемый при определении высот

маркой обводят контуры по стереомодели и трассируют линии равных высот — горизонтали, которые сразу же вычерчиваются с помощью чертежного устройства, предназначенного для создания графического оригинала карты.

Итак, обработка стереопар на универсальных приборах позволяет получить трехмерную геометрическую характеристику местности в графической форме — в виде карты с плановым положением контуров и рельефом в горизонталях, а также в виде профиля или цифровой модели рельефа, нередко дополняемых ортофотопланом.

Оптико-механические стереофотограмметрические приборы применяются для обработки снимков более века. В результате непрерывного совершенствования они стали прецизионными измерительными устройствами. В нашей стране с помощью стереофотограмметрических приборов по аэрофотоснимкам составлены сотни тысяч листов государственных топографических карт масштаба 1 : 100 000 и 1 : 25 000, которые без преувеличения являются национальным достоянием. Однако на рубеже веков в соответствии с общей прогрессивной тенденцией происходит замена стереофотограмметрических приборов компьютерными комплексами.

**Цифровые фотограмметрические системы.** Универсальную обработку стереопар снимков начинают выполнять с помощью цифровых фотограмметрических систем, представляющих собой обрабатывающие компьютерные программно-аппаратные комплексы, которые в простейшей конфигурации, помимо персонального компьютера и монитора, включают стереоочки, многокнопочную мышь, точный сканер для цифрования фотографических снимков и принтер для вывода результатов обработки. Основой компьютерного комплекса является мощное программное обеспечение, включающее целую серию специализированных программ. Для работы на таком комплексе требуется определенный уровень компьютерной подготовки исполнителя.

Один из первых отечественных комплексов — цифровая фотограмметрическая система PHOTOMOD компании «Ракурс». Система модифицируется по мере совершенствования персональных компьютеров. Она имеет модульную структуру, допускающую обработку наземных, воздушных и космических снимков, включая радиолокационные. Тематические модули позволяют автоматически выполнять взаимное и внешнее ориентирование снимков по опорным точкам; производить визуальные (с помощью анаглифических или светозатворных стереоочков) и автоматические стереоизмерения снимков; автоматически строить цифровую модель рельефа и трассировать горизонтали; создавать ортофотопланы; изготавливать графические оригиналы карт и другую геоинформационную продукцию.

На рис. 3.48 представлена другая цифровая фотограмметрическая система, предназначенная для производственного изготов-

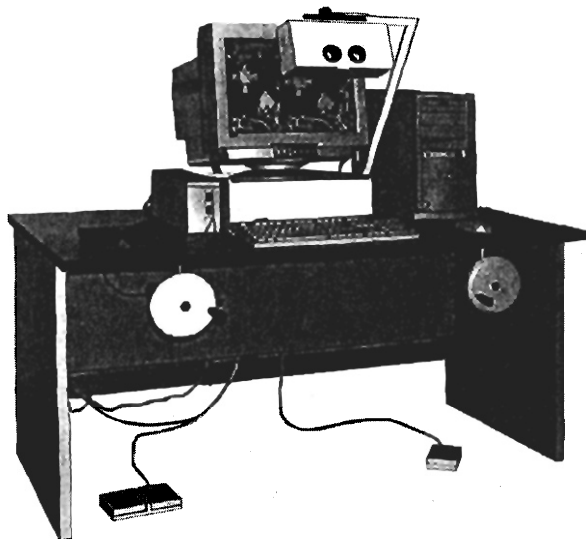
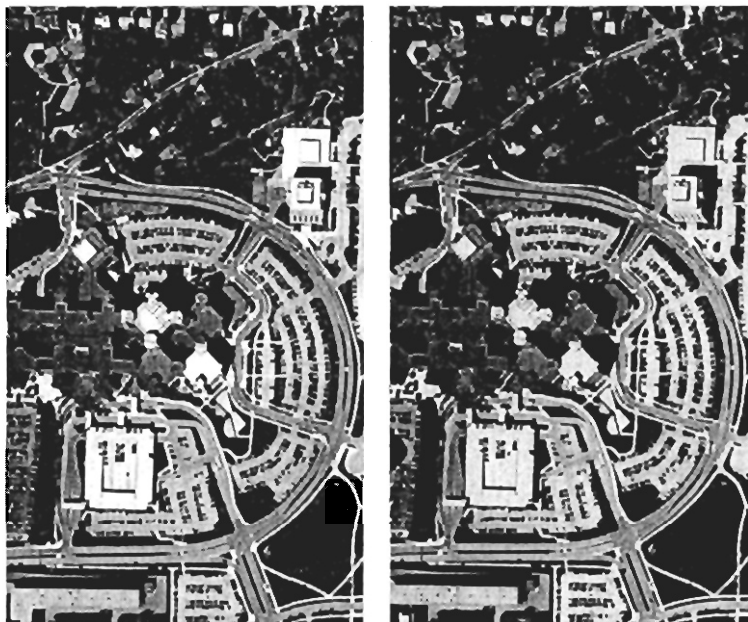


Рис. 3.48. Аппаратные средства цифровой фотограмметрической системы ЦНИИГАиК, выпускаемые экспериментальным оптико-механическим заводом (ЭОМЗ) Роскартографии

ления топографических планов и карт масштаба 1 : 500 — 1 : 200 000. Как и в традиционных стереообрабатывающих приборах стереонаблюдения производятся с помощью бинокля, а относительное перемещение изображений снимков и марок-курсоров на дисплее осуществляется посредством привычных для фотограмметристов ручных штурвалов.

**Виртуальная (3D) модель местности.** С помощью специализированного программного обеспечения пространственная геоинформация может быть представлена не только в виде карт, но и в виде трехмерных *виртуальных моделей* местности или 3D- (3-Dimensional) *визуализаций*, которые получают путем совмещения изображения снимка с цифровой моделью рельефа. На экране монитора воспроизводится естественное изображение местности в перспективной проекции, т. е. как видел бы ее наблюдатель при различных точках наблюдения (цв. вкл. I, 20). Важной характеристикой технологии является экранная частота обновления изображения при изменении его ракурса и масштаба, которая должна быть тем выше, чем быстрее изменяется изображение. При высокой детальности и частоте обновления визуализированная трехмерная модель — компьютерная виртуальная реальность, создает ощущение присутствия на моделируемой местности. Виртуальное моделирование применяется для первоначального знакомства с местностью, в ландшафтном и городском планировании, при размещении строящихся зданий и инженерных сооружений. Виртуаль-

ные изображения городских районов пока создаются в упрощенном виде для их быстрого вывода на экран: здания изображаются лишь как параллелепипеды заданной высоты и закрашиваются подготовленными текстурными заливками (рис. 3.49). Виртуальные модели с добавлением анимационных эффектов становятся популярным видом изображения местности, в том числе для широко-



*a*



*б*

Рис. 3.49. Виртуальная модель местности:

*a* — стереопара плановых аэроснимков городского микрорайона; *б* — 3D-визуализация того же микрорайона в привычной перспективе



го потребителя, благодаря своей наглядности, интерактивности, возможности осмотра с любой точки.

**Определение высот по радиолокационным снимкам.** Для определения высот точек местности по снимкам, полученным радиолокатором с синтезированной длиной антенны, применяют два способа: стереофотограмметрический и интерферометрический.

**Стереоскопические радиолокационные снимки** получают с двух параллельных съемочных маршрутов, выполняя съемку местности с противоположных сторон или с одной стороны. Применяют также перекрещивающиеся съемочные маршруты. На паре перекрывающихся снимков односторонней съемки радиотени направлены одинаково, поэтому по ним удастся получить стереоэффект приемлемого качества. Стереопары радиолокационных аэроснимков можно обрабатывать на стереокомпараторе, когда измеряют плоские координаты и радиолокационные параллаксы, а также на аналитических универсальных приборах и цифровых фотограмметрических системах с целью изготовления карты в горизонталях. Стереофотограмметрическая обработка радиолокационных снимков используется для топографического картографирования полярных районов, а также районов с постоянным облачным покровом, таких, как бассейн Амазонки, которые практически недоступны для съемок в оптическом диапазоне.

**Радиолокационная интерферометрия** — способ точного определения высот на местности, основанный на физическом явлении интерференции радиоволн, которые для этого, как известно, должны быть когерентными. Принципиально радиолокационный интерферометр в отличие от обычного радиолокатора должен иметь не одну, а две антенны, разнесенные на базисное расстояние  $B$ . При съемке местность освещается радиоволнами, посылаемыми одной антенной, которые после отражения принимаются обеими антеннами. Из принятых эхо-сигналов образуется путем их сложения результирующий сигнал. Если разность расстояний  $D$ , которые проходят радиоволны, принимаемые разными антеннами, составляет целую длину волны радиолокатора (разность фаз принятых радиоволн  $2\pi$  радиан), то результирующий сигнал максимально усиливается, если же половину длины волны (разность фаз  $\pi$  радиан), то сигнал полностью гасится. В результате съемки получают *интерферограмму*, состоящую из параллельных светлых и темных полос, густота которых зависит от геометрии съемки (величин базиса  $B$ , высоты съемки  $H$ , угла визирования  $\beta$ , длины радиоволны  $\lambda$ ). Чем длиннее базис, тем реже следуют интерференционные полосы, что повышает точность измерений по интерферограмме. При съемке плоской горизонтальной местности полосы интерферограммы прямолинейны. Если на плоской местности имеется неровность с относительной высотой  $h$ , то разность расстояний от разных антенн до разновысотных

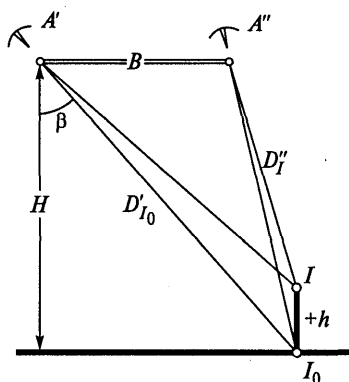


Рис. 3.50. Геометрия радиолокационной интерферометрии:

$A'$ ,  $A''$  — антенны радиоинтерферометра

точек изменится на величину  $\delta_\lambda$ , а интерференционные полосы получат соответствующее искривление, которое принципиально можно измерить. Таким образом, интерферометрический способ определения высот точек местности основан на функциональной зависимости между положением (формой) полос на интерферограмме и высотами точек на местности.

Для пояснения принципа создания цифровой модели рельефа местности по интерферограмме воспользуемся упрощенными зависимостями радиолокационной интерферометрии:

$$\delta_\lambda = (D'_I - D''_I) - (D'_{I_0} - D''_{I_0}),$$

$$h = \delta_\lambda \frac{H \sin \beta}{B},$$

которые схематически иллюстрируются геометрическими построениями на рис. 3.50. В качестве примера на рис. 3.51, *а* приведен радиолокационный снимок вулкана Этна, а на рис. 3.51, *б* показана его интерферограмма. Полный цикл смены тонов от белого до черного соответствует целой длине волны, т.е. разности фаз, равной  $2\pi$  радиан. Большая часть разности фаз возникает за счет базиса  $B$ . После вычитания этой систематической составляющей получают картину, соответствующую рельефу вулканического конуса — вместо линейных интерференционных полос воспроизводятся концентрические (рис. 3.51, *в*). Далее по опорным точкам, у которых известны пространственные координаты, определяют интервал высот, которому соответствует один тон на интерферограмме, и затем абсолютные высоты каждого пиксела. В результате получают цифровую модель рельефа местности. Для осуществления приведенной схемы обработки, в которой используются сложные алгоритмы, требуются значительные вычислительные мощности.

Реализовать радиоинтерферометрические измерения высот можно и посредством одного или нескольких спутников с радиолокаторами, последовательно пролетающих над одной и той же местностью, но с минимальным временным интервалом (часы, дни, в отдельных случаях недели). Это требование объясняется тем, что со временем характеристики атмосферы и земной поверхности, такие, как влажность, высота и состояние растительного покрова, меняются, что нарушает необходимую когерентность

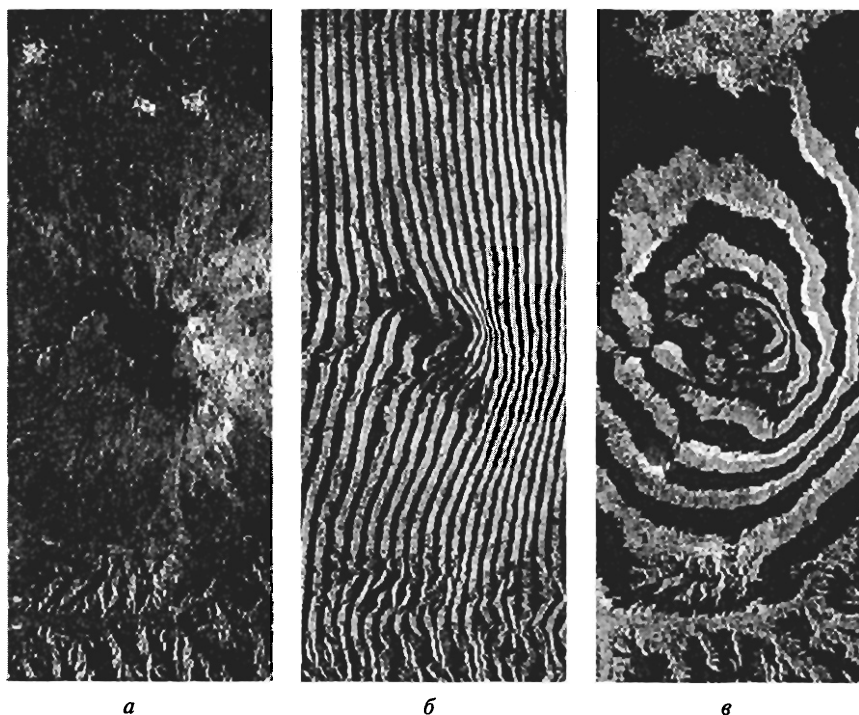


Рис. 3.51. Радиолокационный снимок вулкана Этна, Сицилия с возвращаемого корабля *Shuttle* (а) и интерферограммы: исходная (б) и после коррекции (в)

радиолокационных сигналов. Таким образом, точность измерения высот способом радиолокационной интерферометрии зависит не только от геометрии съемки и различных погрешностей ее выполнения, но и от географических условий, существенно влияющих на когерентность разновременных радиолокационных сигналов.

Для определения горизонтальных перемещений объектов находит применение *дифференциальная радиолокационная интерферометрия*, которая базируется на разновременных радиолокационных съемках местности с одной и той же точки орбиты. Основная проблема при реализации этого способа заключается в необходимости разделения на суммарной интерферограмме влияний высоты и горизонтальных перемещений объектов. Для определения величин горизонтальных перемещений необходимо из цифровой деформированной модели рельефа местности, полученной по такой суммарной интерферограмме, вычлест действительную цифровую модель рельефа, построенную по другим данным. Если же между съемками произошли не только горизонтальные,

но и вертикальные перемещения (изменились высоты), то необходима еще дополнительная априорная информация для их разделения. Для дифференциальной интерферометрии теоретически достижима сантиметровая точность определения горизонтальных и вертикальных движений земной поверхности, что соответствует доле длины волны радиолокационного сигнала.

При всех своих достоинствах радиолокационная интерферометрия — это сложный и не всегда стабильный способ, поэтому пока рано говорить о вытеснении им традиционной стереофотограмметрии.

### 3.3.3. Разновременные снимки

Фотограмметрическая обработка одиночных и стереоскопических пар снимков позволяет определить форму, размер и пространственное положение объектов местности с представлением результатов, например в виде карты. Разновременные снимки предназначены для изучения изменений, динамики географических объектов и явлений. Фотограмметрические исследования динамики основаны на многократных аэрокосмических съемках, которые выполняются через определенные интервалы времени. В результате получают серию разновременных снимков с определенным временным разрешением, по которым определяют ряд количественных показателей, характеризующих геометрические изменения объекта. Среди них наиболее распространены: линейная величина перемещения объекта, изменение его площади, высоты и объема. Средняя точность фотограмметрического определения показателей динамики — 5—10 %.

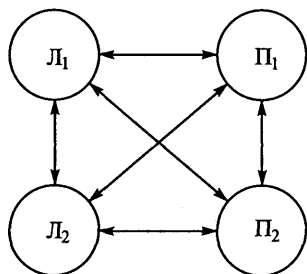


Рис. 3.52. Схема возможных сочетаний левых (Л) и правых (П) снимков, полученных при начальной и повторной съемке, для образования разновременных стереопар

**Разновременные стереоскопические модели.** Обозначим разновременные снимки изменяющегося объекта, полученные с одного и того же базиса и имеющие одинаковые элементы ориентирования, при начальной съемке через  $L_1$  (левая точка базиса) и  $P_1$  (правая точка базиса), а при повторной через  $L_2$  и  $P_2$  (рис. 3.52). Стереопары снимков  $L_1P_1$  и  $L_2P_2$  позволяют воспроизвести обычные стереоскопические модели, которые фиксируют пространственное состояние объекта на моменты съемок. Стереопары снимков  $L_1L_2$  или  $P_1P_2$ , полученные с одной точки — стереопары перемещения — позволяют наблюдать *псевдостереоскопический эффект (стереозффект смещения)*, при котором, как уже отме-

чалось, неподвижные предметы воспринимаются в одной плоскости, а переместившиеся — вне ее. В образовании стереоскопического эффекта по суммарным стереопарам  $L_1\Pi_2$  или  $L_2\Pi_1$  участвуют как обычные параллаксы, так и параллаксы перемещения. Поэтому при стереоскопическом рассматривании таких снимков переместившиеся вдоль базиса наблюдения разрозненные предметы воспринимаются вне объемной модели объекта, а сплошное движение деформирует ее.

В настоящее время имеют практическое значение два способа обработки материалов повторных съемок: 1) последовательного измерения разновременных обычных стереоскопических пар и 2) измерения стереопар перемещения (*способ псевдопараллаксов*). Более сложный первый способ позволяет изучать различные виды пространственных изменений и определять все показатели динамики — перемещение отдельных точек, изменение высоты поверхности, площади какого-либо контура, оценивать объем вынесенного (отложенного) материала и т. д.; второй — характеризует лишь движение и перемещение объекта, но прост в практическом исполнении.

**Способ псевдопараллаксов.** Этот способ применяется для качественного и количественного изучения движения осыпей, горных оползней, курумов и ледников и других динамичных явлений. Рассмотрим этот способ на примере изучения движения горных ледников. Разработано три основных варианта способа, предусматривающих использование фототеодолитных, воздушных и космических снимков.

Наиболее простой, фототеодолитный, вариант способа определения скорости движения льда в долинном леднике состоит в следующем. С базиса известной длины  $B$ , расположенного на горном склоне, производится фототеодолитная съемка ледника в направлении, перпендикулярном его движению (рис. 3.53). Через несколько дней с одной из точек базиса, которые тщательно закрепляются на местности, например левой, фотографирование повторяют, сохраняя положение и ориентирование

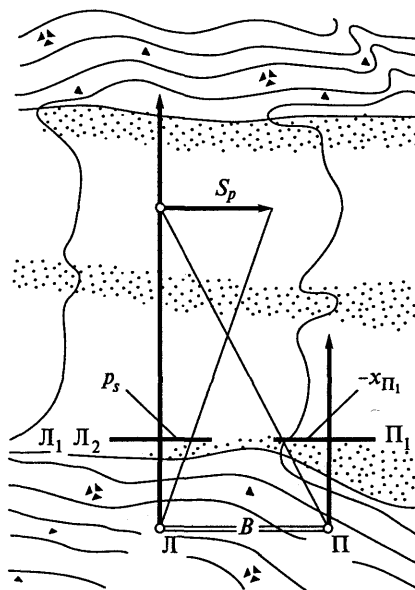


Рис. 3.53. Схема фототеодолитной съемки для определения поверхностной скорости движения льда в горном леднике способом псевдопараллаксов.

фототеодолита. В результате в обработку поступают три снимка  $L_1$ ,  $\Pi_1$  и  $L_2$ , образующие стереопару перемещения  $L_1L_2$  и обычную стереопару  $L_1\Pi_1$ . При стереоскопическом рассматривании снимков  $L_1L_2$ , полученных с одной точки с временным интервалом, поверхность ледника вследствие его перемещения воспринимается рельефной, объемной, а неподвижное скальное обрамление — плоским. Измерив на стереокомпараторе параллаксы перемещения  $p_s$  характерных точек по стереопаре перемещения

$$p_s = x_{L_1} - x_{L_2},$$

а по обычной стереопаре  $L_1\Pi_1$  обычные параллаксы тех же точек

$$p = x_{L_1} - x_{\Pi_1},$$

вычисляют величину перемещения льда в натуре:

$$S_p = p_s \frac{B}{p} = p_s M.$$

Зная интервал времени между повторными съемками, переходят к скорости движения льда в леднике, в рассматриваемом случае — суточной. Обычно скорости этим способом определяют по поперечным скоростным створам, которых на языке ледника выбирают несколько.

В *аэросъемочном* варианте способа псевдопараллаксов повторная маршрутная плановая аэрофотосъемка выполняется в период абляции вдоль оси ледника с одной и той же высоты. При повторной аэросъемке, которая производится через 2—3 недели, не удастся получить снимки точно с тех же точек маршрута, что и при начальной съемке. Поэтому приходится обрабатывать суммарные стереопары, применяя более сложные фотограмметрические способы, или предварительно выполнять ортотрансформирование снимков. Достоинство аэрофотограмметрического способа псевдопараллаксов заключается в возможности визуализировать скоростное поле ледника в виде плановой стереоскопической модели перемещения, пригодной как для детального визуального анализа, так и для измерений (рис. 3.54).

Для *космического* варианта способа наиболее подходят снимки, полученные в конце периода абляции с годовым интервалом. Поскольку у космических снимков влияние рельефа на положение точек невелико, то удастся наблюдать почти неискаженную из-за рельефа местности стереомодель перемещения. Обзорные космические снимки наиболее пригодны для сравнительного изучения особенностей движения различных ледников в ледниковом массиве (рис. 3.55).

**Стереофотограмметрические определения изменений высоты поверхности объектов.** Для характеристики изменения высоты поверхности объектов применяется ряд способов, обеспечивающих

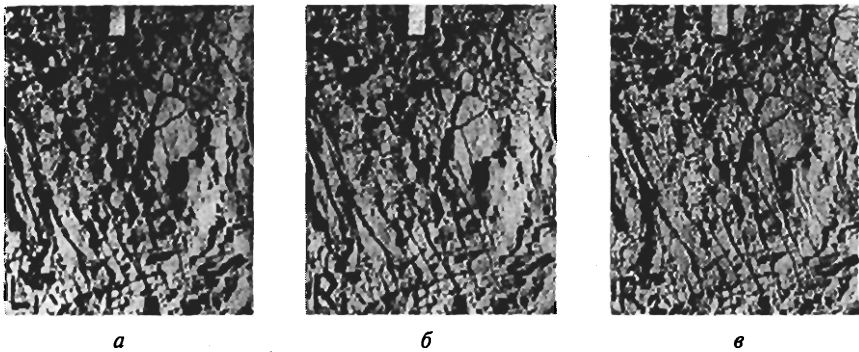


Рис. 3.54. Триплет фрагментов аэрофотоснимков участка ледопада пульсирующего ледника Медвежий (Памир):

*a, б* — обычная стереопара Л<sub>1</sub>П<sub>1</sub>; *в* — аэрофотоснимок (П<sub>2</sub>), полученный через неделю. Три аэрофотоснимка позволяют наблюдать *одновременно* две стереомодели: обычную (воспринимается слева), форма которой определяется рельефом ледниковой поверхности и перемещения (воспринимается справа), форма которой зависит от горизонтальных подвижек блоков льда

определение величин изменений в отдельных точках, в узлах регулярной или нерегулярной сетки, по профилям или по горизонталям.

Эти определения базируются на последовательной стереофотограмметрической обработке обычных разновременных стереопар с использованием традиционных или компьютерных технологий. Широко применяется способ *сетки*, в узлах которой определяются разности высот. Еще лучше, если точки наблюдения выбираются с учетом характера изменений. Для дальнейшего проведения изолиний, характеризующих изменение высоты поверхности, исполнитель должен ясно понимать природный механизм высотных изменений объектов. Для получения количественных

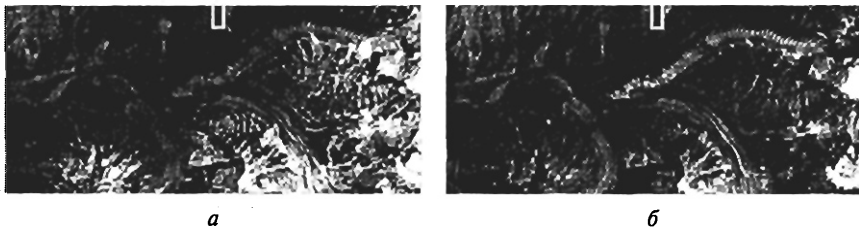


Рис. 3.55. Разногодичные космические снимки Памирских ледников Петра Первого (КФА-1000/Ресурс-Ф):

*a* — 03.09.1972; *б* — 12.09.1973. Стереоскопическое наблюдение снимков по способу псевдопараллакс позволяет выявить активизировавшиеся ледники и прогнозировать пульсирующую подвижку правого верхнего ледника

данных об изменении высоты по заданному створу используется способ *разновременных профилей*, которые позволяют судить также об изменении формы объекта. Фотограмметрическое профилирование — это результативный способ анализа изменения высоты поверхности объектов. Наглядную и достоверную картину изменения высоты поверхности дают также *разновременные горизонталы*, полученные стереофотограмметрическим способом.

Наибольшие возможности для определения изменения высоты поверхности географических объектов предоставляют разновременные цифровые модели рельефа.

**Фотограмметрическая обработка для определения изменений площадей и объемов.** Практическая потребность в измерении площадей по снимкам возросла в связи с аэрокосмическим мониторингом, при котором величина изменения площади различных ареалов представляет один из основных показателей антропогенного воздействия на окружающую среду.

Главная задача при определении изменений площади объекта фотограмметрическим методом сводится к получению по разновременным снимкам планового положения его контура или координат точек, аппроксимирующих линию контура. Для этого применяют трансформирование снимков или их стереофотограмметрическую обработку. Следующий этап — планиметрирование или вычисление площади по координатам поворотных точек. Наиболее просто определить площадь выделенных контуров по цифровым снимкам — большинство коммерческих программ обеспечивают ее получение как по растровым, так и по векторным данным. Однако следует помнить, что основной источник погрешностей при измерении площадей состоит в геометрических искажениях снимков, обусловленных их наклоном и рельефом местности, поэтому качество трансформирования снимков играет первостепенную роль.

Изменение объемов исследуемых объектов можно определить, зная форму и положение ограничивающих их поверхностей. В общем случае изменение объема  $\Delta V$  объекта, имеющего площадь основания  $\bar{S}_0$  и среднюю высоту  $H$ , зависит от изменений как площади основания  $\Delta \bar{S}_0$ , так и средней высоты  $\Delta H$ :

$$\Delta V = \Delta \bar{S}_0 H + \Delta H \bar{S}_0.$$

Исходными величинами для определения объема и его изменений являются площади и высоты объектов. Поэтому фотограмметрические методы направлены в конечном счете на наиболее рациональное определение этих величин.

При исследованиях общего изменения пространственного состояния объекта с учетом совокупности рассмотренных выше показателей наиболее часто применяется стереофотограмметрический способ последовательной обработки разновременных сним-



ков с представлением результатов измерений в наглядной и удобной для визуального анализа форме — в виде специальных карт динамики.

### 3.4. Аэрокосмическое картографирование при географических исследованиях

**Составление карт по снимкам.** В аэрокосмическом тематическом картографировании, выполняемом при географических исследованиях, снимки используют: 1) для подготовки топографической основы будущей карты и 2) в качестве источника ее содержания. Для решения первой задачи космические снимки необходимо привести к определенному масштабу и проекции. Это достигается путем трансформирования снимков, которые затем монтируются в фотопланы и фотокарты.

Содержание карты получают по снимкам в процессе дешифрирования, используя все доступные методы извлечения информации, в том числе компьютерную обработку. Очевидно, что для дешифрирования следует выбирать снимки таких масштабов и разрешения, чтобы обобщенность изображения соответствовала требуемой обобщенности содержания карты. Здесь полезна опора на географическое разрешение снимков, что помогает определить оптимальный тип снимков для решения конкретной задачи.

В зависимости от темы, масштаба и назначения карты кроме основного снимка можно использовать также набор аэрокосмических снимков разных масштабов, обеспечивающих изучение природных и социально-экономических объектов на нескольких иерархических уровнях. Масштаб основного оригинального космического снимка (как правило используются снимки высокого разрешения) обычно в несколько раз мельче масштаба составляемой карты, и работа при визуальном дешифрировании ведется по снимкам с большим (в 5—10 крат) увеличением, что обеспечивает более полное извлечение информации.

Технологическая схема создания карты по аэрокосмическим снимкам, определяемая программой карты, может изменяться в зависимости от конкретных условий, но она всегда предусматривает выполнение таких работ, как пространственная (географическая) привязка снимков и подготовка основы; дешифрирование; перенос результатов дешифрирования на основу и составление оригинала карты.

**Картографическая генерализация при переходе от снимка к карте.** Изображение аэрокосмических снимков насыщено существенно большим количеством деталей, чем возможно передать графическими способами при составлении по снимку карты. Поэтому неизбежен процесс генерализации при переходе от снимка к карте.

В топографическом картографировании, где создание топографических карт по аэрофотоснимкам представляет массовый производственный процесс, правила обобщения и цензы отбора при переходе от снимка к карте сформулированы в соответствующих наставлениях и руководствах. Принципы и правила такой генерализации близки к хорошо разработанным в картографии и нацелены на отбрасывание несущественных деталей при сохранении наиболее важных элементов и отображение типичных черт строения территории.

Исключается масса деталей изображения, представляющих ненужную для решения основной задачи дешифрирования информацию. Отходят на задний план объекты, служившие индикаторами, но сами по себе объектами исследования не являющиеся. Например, геоморфолог, выявляя линеаменты, не рисует по снимку реку со всеми ее излучинами, а выделяет спрямленные участки, подчеркивающие дешифрируемый им разлом. Он опускает при дешифрировании сетку полей, контуры лесов, не помогающие выявлению основных для него геологических объектов.

Таким образом, целевой отбор дешифрируемых элементов — главная сторона генерализации при дешифрировании. Другая функция генерализации определяется избыточной детальностью изображения дешифрируемых элементов на снимке, которую невозможно передать графически, обеспечив читаемость карты. При неизбежном упрощении важно сохранить в рисунке отдешифрированных контуров естественный природный рисунок, не утрачивать его при схематизации. Этот рисунок своеобразен для различных ландшафтов. Например, в тундровых ландшафтах важно передать пятнистый рисунок, созданный системой округлых мелких озер в термокарстовом рельефе, а в эрозионных районах Центральной черноземной области — сложную систему древовидного расчленения рельефа овражно-балочной сетью, что определяет пространственный образ этих территорий.

Достаточно жесткие цензы отбора, приводимые в производственных документах по созданию карт, должны модифицироваться в зависимости от целей исследования. Например, чтобы передать фазы развития мерзлотно-термокарстового рельефа от молодых к зрелым и дряхлым (термокарстовые озера — озера с каймой аласов — аласы с остаточными озерами — сухие аласы), важно во второй стадии сохранить даже узкую кайму аласов вокруг озер, а в третьей — даже очень мелкие озера, так как именно их наличие разделяет эти стадии.

Таким образом, правильная генерализация основывается на детальном изучении географического ландшафта, его типичных и характерных черт, на выявлении по снимкам региональных особенностей территории, индивидуальных черт рисунка различных объектов. Она решается путем отбора отдельных объектов, пока-

зателей и характеристик, обобщения очертаний, утрирования изображения (преднамеренного преувеличения размеров его элементов) с учетом целей исследования и региональных особенностей территории.

**Требования к карте**, создаваемой по снимкам, предъявляются такие же, как и ко всем картам: она должна иметь математическую основу в виде координатной сетки или подписанных выходов сетки, указание масштаба. При широко распространенных сейчас компьютерных методах подготовки оригинала карты необходимо иметь на карте обозначение линейного масштаба. Оформление, способы изображения извлеченного из снимков содержания могут варьировать. Результаты представляют в разной форме — в виде тематической фотокарты, когда изображение снимка дополняется границами отдешифрированных контуров или отдельных объектов с цифровыми индексами; в виде «классифицированного изображения» — результатов компьютерной классификации и, наконец, в виде традиционной карты с выделенными контурами объектов и их раскраской с использованием способа качественного фона. Совершенно необходимым элементом карты является легенда, отвечающая картографическим правилам — построенная при строгом соблюдении логики классификации изображаемых явлений и их иерархической соподчиненности. Об этом нередко забывают при компьютерном оформлении карт, пользуясь программными модулями построения легенды, как правило, не отвечающими этим профессиональным требованиям.

Карты, составленные по снимкам, как правило, более подробны, лучше отображают пространственные закономерности распределения исследуемых объектов, но полнота и достоверность их содержания обеспечиваются привлечением дополнительных источников, совместно с которыми и используют снимки при аэрокосмическом картографировании.

**Виды картографической продукции, создаваемой по снимкам.** Наглядное, выразительное отображение местности на аэрокосмических снимках вызывает естественное стремление использовать аэрокосмическое изображение в дополнение к карте, а иногда и вместо нее. Это привело к созданию по многим снимкам нового вида картографической продукции — *фотокарт*, которые представляют собой трансформированные в картографическую проекцию аэрокосмические изображения, как правило, оснащенные элементами математической основы и иногда имеющие минимальную картографическую нагрузку. Фотокарты средних масштабов создают в нарезке и номенклатуре обзорно-топографических и общегеографических карт. Составлены также многочисленные фотокарты отдельных стран, континентов. Набор фотокарт на весь мир, созданных по обзорным снимкам AVHRR/NOAA, содержится в атласе мира «Миллениум» (2001).

*Топографические карты.* Топографическая изученность мира даже в наше время остается далеко не полной. Космические снимки представляют теперь реальную основу для топографического картографирования. Иногда они являются единственно возможными съемочными материалами для труднодоступных высокогорных, пустынных, заболоченных территорий, не только непроходимых, но и сложных для постановки аэросъемочных работ.

Создание топографических карт по космическим снимкам сейчас ориентируется на использование цифровых технологий и компьютерных комплексов.

*Обновление карт.* Повторные аэрокосмические съемки дают хорошие материалы для регулярного обновления топографических карт, что представляет необходимый вид картографических работ. Раньше процесс обновления затягивался на многие годы, так как его начинали с карт крупных масштабов; теперь можно вести одновременно обновление карт всего масштабного ряда.

*Тематические карты.* Разрешение большей части современных космических снимков в первые десятки метров соответствует размерности большинства исследуемых географами объектов земной поверхности. Это делает снимки, получаемые с ресурсно-картографических спутников, ценным материалом для тематического картографирования. Для территории нашей страны созданы космофотогеологические и космофототектонические карты в масштабах 1 : 10 000 000, 1 : 5 000 000, 1 : 2 500 000, содержащие принципиально новые данные о строении земной коры, главным образом о линейных разрывных и кольцевых структурах. Государственные геологические карты масштабов 1 : 200 000 (2-го издания) и 1 : 100 000 (3-го издания) составляются с использованием космической информации. Для этого создается так называемая «фактографическая дистанционная основа» (или космофотооснова), представляющая собой набор фотокарт соответствующих масштабов, создаваемых по снимкам разных типов в расчете на взаимодополняемость извлекаемой по ним информации. Благодаря применению космических снимков стало возможным завершение многолистной почвенной карты страны масштаба 1 : 1 000 000 для северных и восточных районов и создание почвенной карты России масштаба 1 : 2 500 000.

По космическим снимкам в конце XX в. созданы серии карт в обзорных масштабах по программе Комплексной картографической инвентаризации природных ресурсов (ККИПР) для ряда важнейших хозяйственных районов России: Ставрополья, Тверской области, Калмыкии, Прибайкалья, Южной Якутии, а также для Таджикистана, Узбекистана, Киргизии, Монголии.

За рубежом с появлением космических снимков получил распространение новый вид картографирования земных покровов и использования земель (land cover and land use). Такие карты в мас-

штабе 1 : 250 000 созданы на территории многих штатов США. Обзорное глобальное картографирование земных покровов на начало 90-х гг. XX в. выполнено по данным AVHRR/NOAA и на рубеже тысячелетий по данным Vegetation/SPOT. Космические снимки используют и в других крупных проектах по тематическому картографированию, например для создания карты лесов Канады. Разнообразны по содержанию глобальные карты состояния атмосферы, океана и многие другие, характеризующие Землю как систему и ее изменения.

**Аэрокосмические снимки в ГИС.** В современных научных исследованиях и практической деятельности нашли самое широкое применение географические информационные системы (ГИС). Наряду с статистической и картографической информацией в них используются аэрокосмические снимки. Снимки представляют для ГИС особую ценность благодаря ряду их свойств.

Комплексное отображение природно-территориальных систем и их хозяйственного использования обуславливает применение снимков в разных тематических направлениях исследований и для изучения взаимосвязей различных объектов. Дешифрирование снимков позволяет создать множество срезов информации, таких, как геология, рельеф, почвы, растительность, хозяйство, расселение.

Оперативность получения информации, ее «свежесть» обеспечивают использование снимков для оперативного выявления и оценки происходящих на земной поверхности изменений — обновления имеющихся слоев ГИС, поддержания их на уровне современности, актуализации информации.

Четкая временная привязка данных, возможность использования разновременных снимков разной давности делает их незаменимым материалом для изучения динамики природы и хозяйства.

Эти свойства определяют два основных направления использования аэрокосмических снимков при создании ГИС. Во-первых, они представляют источник первичной информации при создании тематических слоев в базе данных ГИС, в особенности для труднодоступных и необследованных территорий. Во-вторых, это самостоятельный элемент базы данных, предназначенный для решения таких важных задач, как изучение взаимосвязей различных географических объектов и явлений, исследование их динамики.

Включение аэрокосмической информации в геоинформационные системы предъявляет свои требования к программному обеспечению и структуре системы, в связи с чем выделяется особый тип *интегрированных ГИС*.

## ГЛАВА 4

### МИРОВОЙ ФОНД СНИМКОВ

В настоящем разделе дается обзор не только современных материалов космической съемки, но и истории формирования фонда снимков, накопления и совершенствования его материалов, что необходимо знать для грамотного выбора и применения снимков.

Как уже отмечалось в гл. 1, в географических исследованиях используются как аэроснимки, так и космические снимки. Аэрофотосъемка территории нашей страны выполняется для создания топографических карт аэрогеодезическими предприятиями Федеральной службы геодезии и картографии России, в которых и хранятся съемочные материалы; информация об их наличии может быть получена через Центральный картографо-геодезический фонд (ЦКГФ). Кроме того, есть ряд специализированных ведомственных фондов в таких организациях, как, например, Научно-производственное предприятие «Аэрогеология». Обширные материалы аэрофотосъемки других стран являются достоянием национальных фондов.

С 70-х гг. XX в. к этому достаточно упорядоченному фонду аэроснимков добавился постоянно пополняющийся фонд космических снимков, поступающих с различных космических аппаратов. Для фонда космических снимков характерно большое разнообразие видов и глобальное покрытие земной поверхности, возможность использования снимков на любые территории. В нашей стране, в соответствии с сложившейся с 70-х гг. XX в. космической системой исследования природных ресурсов, снимки были сосредоточены в двух ведомствах. Оперативная информация со спутников *Ресурс-О*, *Океан-О* находилась в ведении гидрометеорологической службы (НПО «Планета»), а затем — Научного центра оперативного мониторинга Земли Росавиакосмоса; фотографическая со спутников *Ресурс-Ф* — в ведении картографической службы (Государственный научно-производственный центр «Природа»). Наряду с государственными центрами созданы коммерческие компании, например ассоциация оборонных ведомств «Совинформспутник». Кроме того, космические снимки территории нашей страны с зарубежных спутников распространяются рядом фирм-дистрибьютеров.

В создании фондов снимков за рубежом также сочетается деятельность государственных ведомств и частных фирм. Крупнейшим архивом снимков с оперативных метеорологических, океанологических, экологических спутников США располагает национальная гидрометеорологическая служба США NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration), в рамках которой созданы четыре центра данных — общий архив и центры, специализированные по климатическим, океанографическим, геофизическим данным; все они входят в мировую систему центров данных. Разветвленная система, включающая 9 тематических центров данных, используется при выполнении важнейшей современной программы изучения Земли как планеты EOS (Earth Observing System). В совместном владении гидрометеорологической службы США NOAA и геологической USGS (United States Geological Survey) находится обширный архив снимков со спутников *Landsat* более чем 10-летней давности, а новые материалы съемок хранит и распространяет частная компания Space Imaging, владеющая также снимками с американского коммерческого спутника *Ikonos*, индийского *IRS* и др. В Европе архивирование и распространение снимков с европейских, американских, японских спутников выполняет фирма Eurimage, а снимков со спутников *SPOT* — французская фирма Spotimage. Национальные архивы снимков созданы в Японии, Индии, Китае, Корее, Австралии и других странах. Материалы некоторых архивов перекрываются; доступ к ним облегчен благодаря Интернету.

Все эти материалы съемок целесообразно рассматривать как единый фонд космических снимков, знание которого помогает географам в работе, обеспечивая правильный выбор поступающих с многочисленных спутников разного назначения материалов для решения определенных тематических задач, а также грамотный поиск и использование архивных материалов прежних съемок для изучения динамики различных объектов по различным снимкам.

В наше время существенным источником информации о фонде снимков становится Интернет, но он освещает далеко не все имеющиеся материалы.

Всестороннее изучение мирового фонда снимков поможет получить сбалансированное представление о нем для правильного использования.

Далее мировой фонд снимков рассматривается для шести основных типов снимков, выделенных в соответствии с их классификацией по спектральным диапазонам съемки и технологии получения снимков (разд. 2.5).

Исторический анализ формирования фонда снимков каждого типа позволяет проследить, как в процессе развития съемок совершенствовались и сами снимки.

## 4.1. Снимки в видимом, ближнем и среднем инфракрасном (световом) диапазоне

Современный фонд космических снимков в видимом, ближнем и среднем инфракрасном диапазоне накапливается с 60-х гг. XX в. Разнообразные съемочные материалы, которые получали в начальных поисковых космических экспериментах, не потеряли своего значения, поскольку они представляют источник для исследований динамики природных явлений и хозяйственной деятельности. Поэтому при обзоре фонда снимков кратко охарактеризованы и накопленные ранее космические снимки, хотя основное внимание уделяется современным материалам съемок.

### 4.1.1. Фотографические снимки

На первом экспериментальном этапе получения космических фотоснимков с пилотируемых кораблей и орбитальных станций опробовались разные виды съемочной аппаратуры, шел поиск оптимального варианта космической фотосъемки. Созданный при этом фонд снимков имеет в основном историческое значение, иллюстрируя путь развития метода. С середины 70-х гг. XX в. начали успешно функционировать разработанные на базе разведывательных систем народно-хозяйственные спутники *Ресурс-Ф*. Снимки с этих спутников составили основу отечественного фонда космических снимков. В 90-х годах к ним в результате конверсионной деятельности добавились фотоснимки с отечественных спутников оборонного ведомства. Таким образом, фотографические снимки представляют главные материалы фонда космических снимков высокого разрешения в нашей стране.

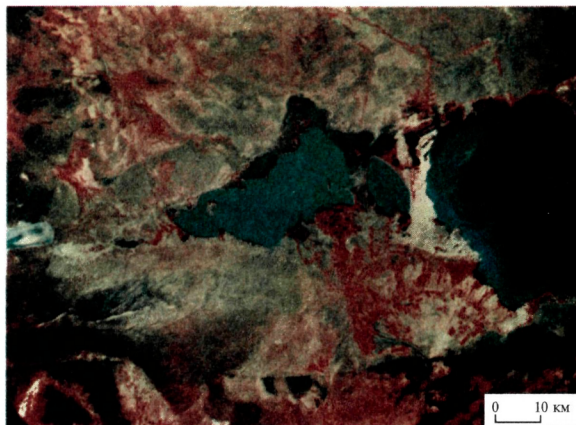
В зарубежных исследованиях на первом этапе также шли эксперименты по космической фотосъемке с пилотируемых объектов, а с 60-х гг. XX в., в годы «холодной войны», выполняли в значительных объемах фотосъемку с разведывательных спутников. Однако ориентация на развитие оперативных методов съемки определила относительно меньшую значимость фонда фотографических снимков за рубежом.

**Отечественный фонд фотографических снимков с околоземных орбит. Снимки с пилотируемых космических кораблей и орбитальных станций.** В полетах первых пилотируемых кораблей *Восток*, *Восход*, *Союз* фотосъемка еще не ставилась как самостоятельная задача. С 1969 г. фотографирование в целях геолого-географического изучения Земли становится составной частью программ пилотируемых космических полетов. Основные этапы первых экспериментов, в которых опробовались новые методы съемки, следующие:



## ЦВЕТНАЯ ВКЛЕЙКА II

1. Фотографический многозональный снимок  
с космического корабля «Союз-22», камера МКФ-6  
Юго-Восточный Казахстан, озера Алаколь, Сасыкколь



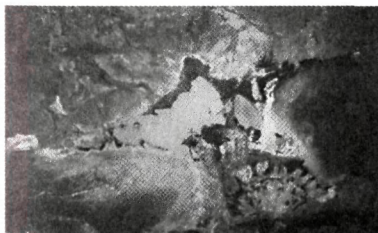
Цветной синтезированный снимок



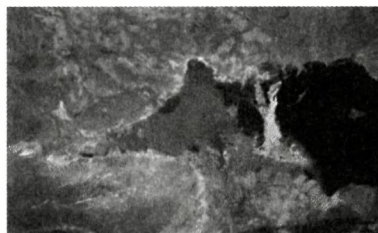
Голубая зона



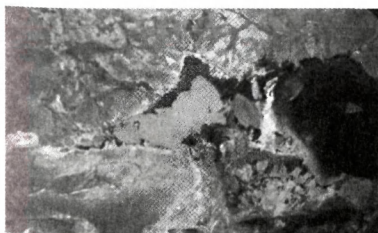
Красная зона



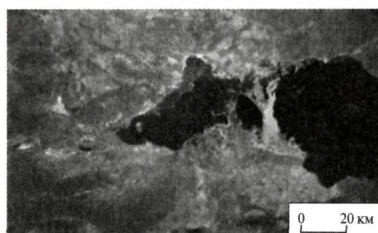
Зеленая зона



Красная — инфракрасная зона



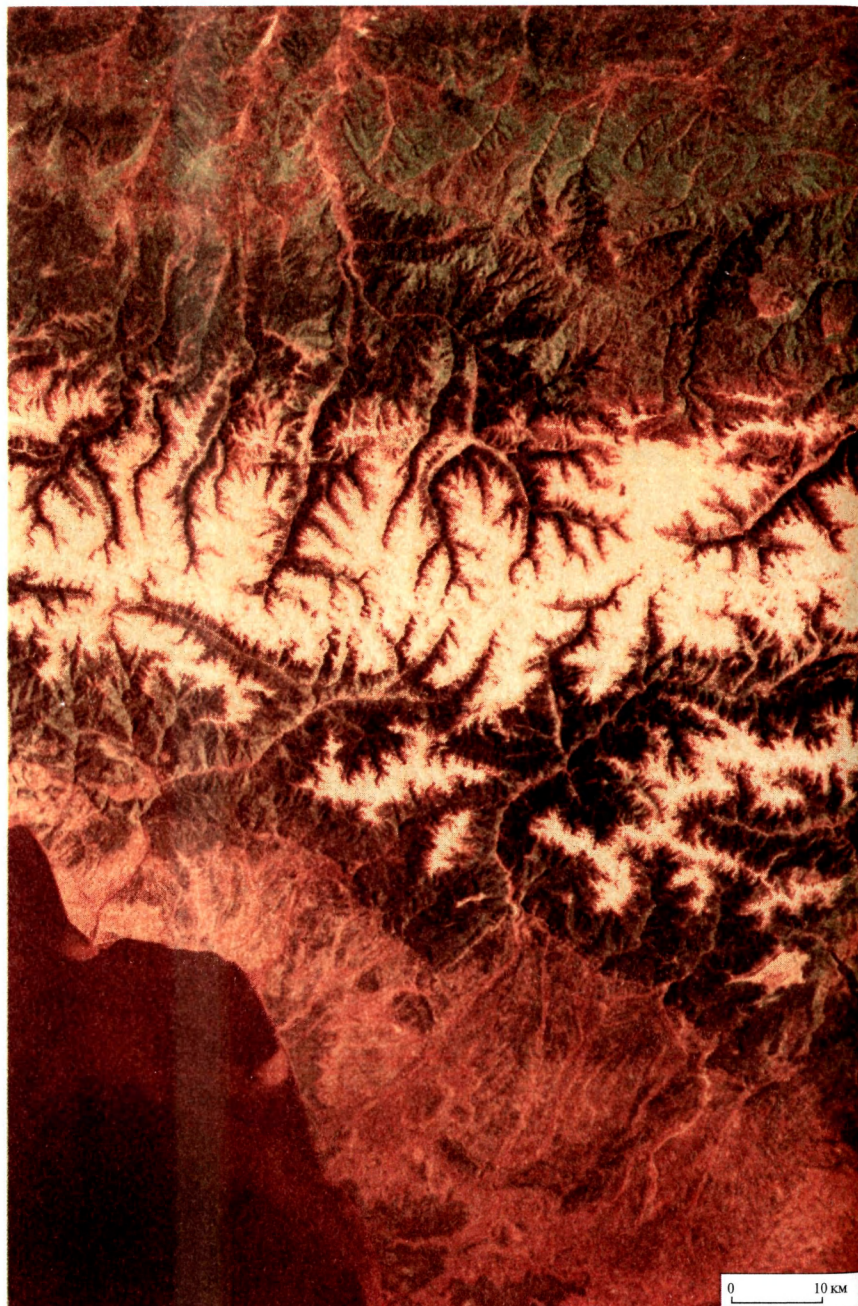
Оранжевая зона



Инфракрасная зона

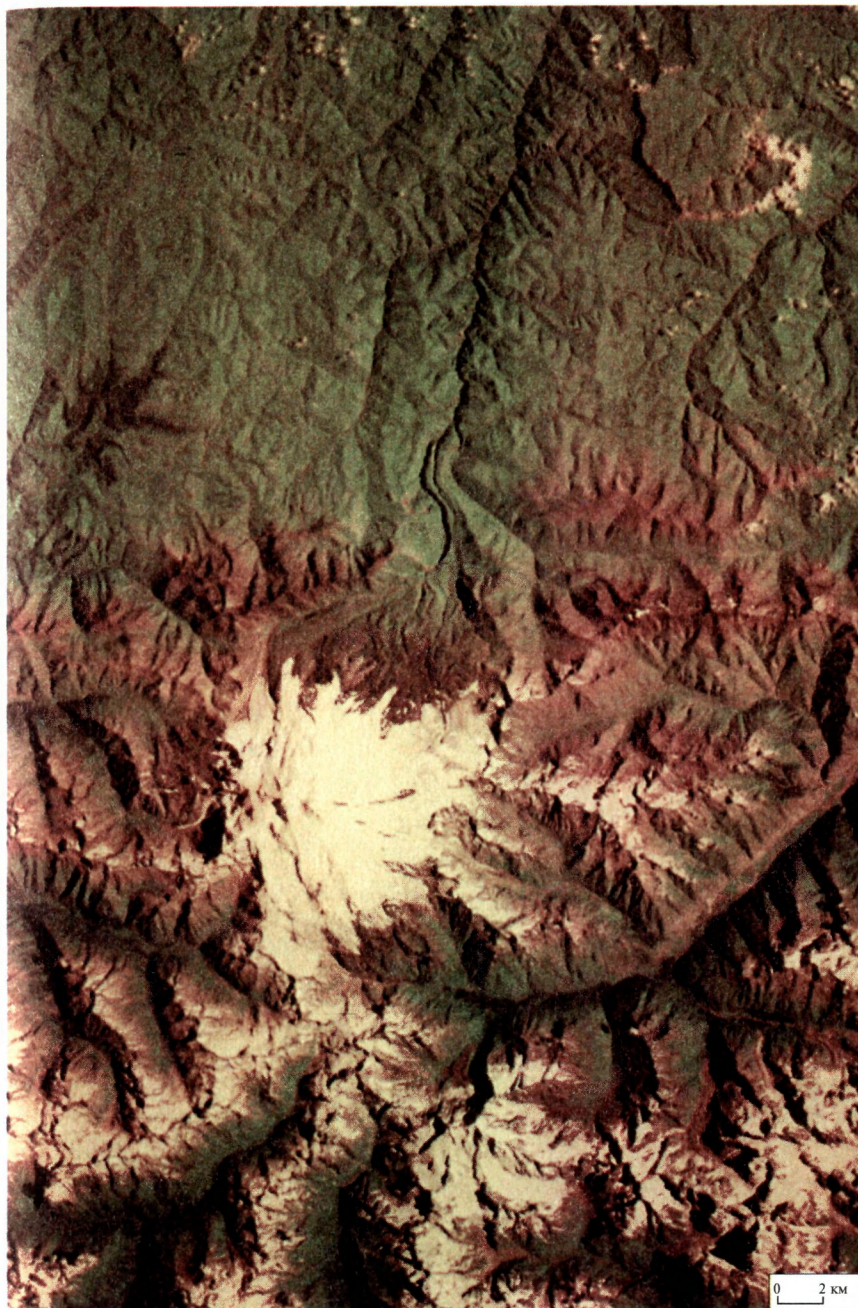
Серия зональных снимков

2. Фотографический цветной синтезированный снимок со спутника  
«Ресурс-Ф», камера КАТЭ-200  
Западный и Центральный Кавказ





3. Фотографический спектрозональный снимок со спутника  
«Ресурс-Ф», камера КФА-1000  
Центральный Кавказ, Эльбрус





4. Фотографический цветной синтезированный снимок со спутника  
«Ресурс-Ф», камера МК-4

Москва и Подмосковье. Увеличение фрагмента 2,5×



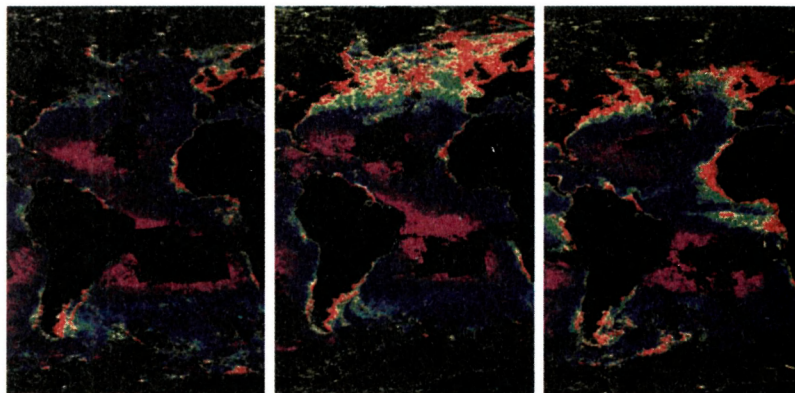


5. Фотографический панхроматический снимок со спутника «Комета» (камера КВР-1000), совмещенный с многозональным снимком МК-4

Москва. Увеличение фрагмента 4×



6. Сезонные изменения концентрации фитопланктона в Атлантическом океане, по данным съемки со спутника *Nimbus-7*, многоканальный сканер CZCS



Январь — март

Апрель — май

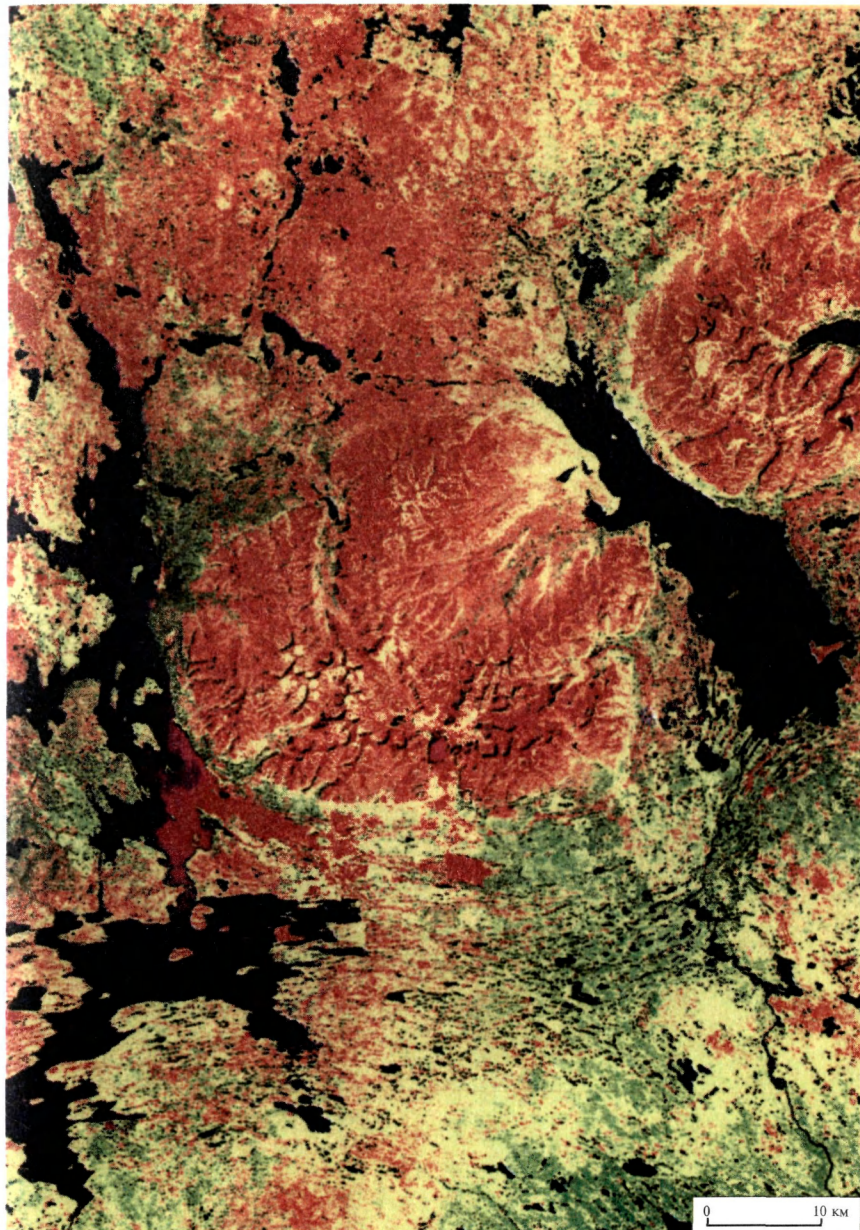
Октябрь — декабрь

7. Сканерный снимок с геостационарного метеоспутника *Meteosat*



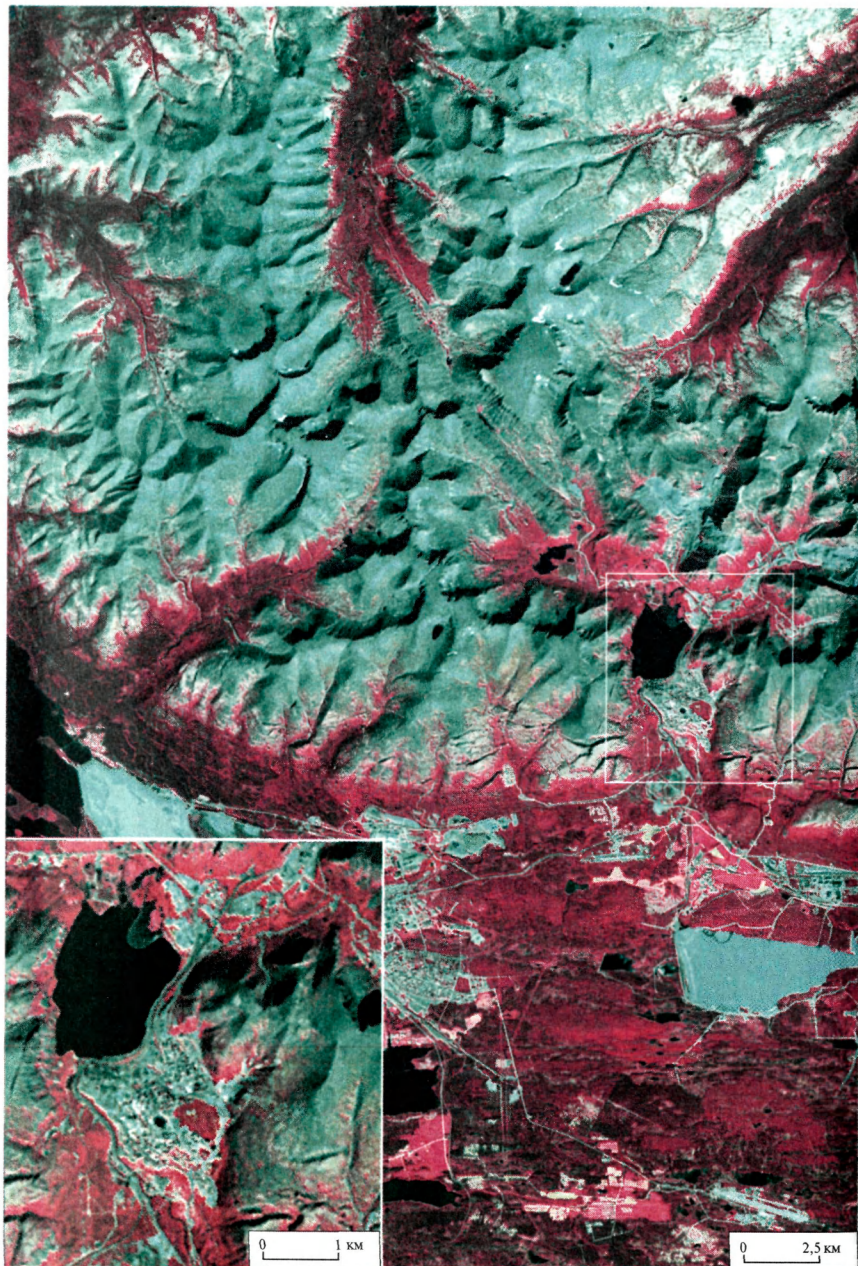


8. Сканерный снимок со спутника *Landsat*, съемочная система MSS  
Кольский полуостров, озеро Имандра, Хибины, Умбозеро





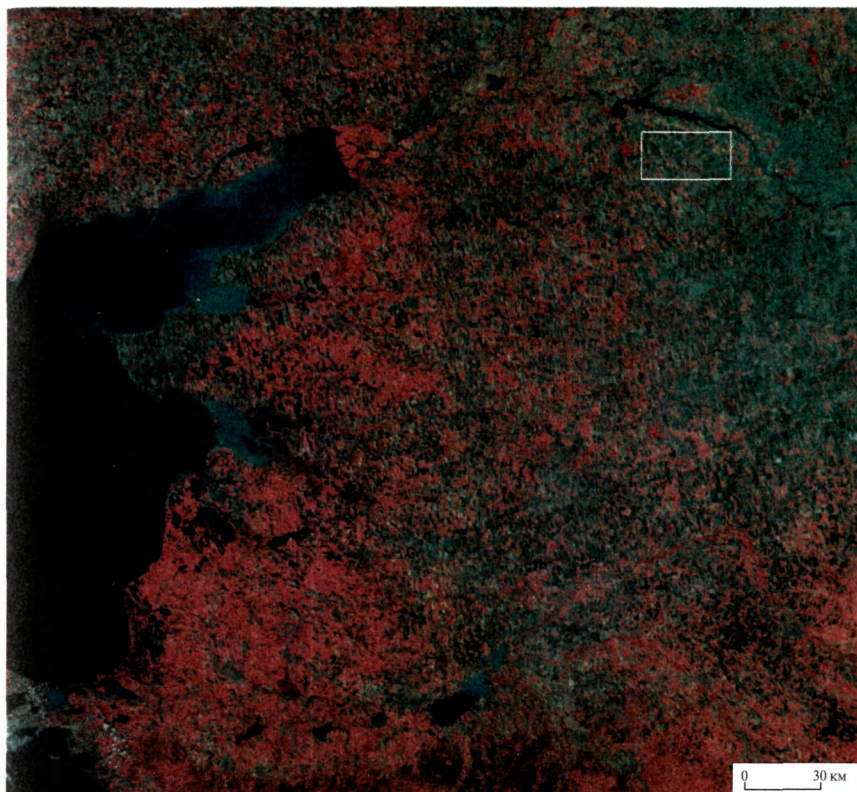
9. Сканерный снимок со спутника *Landsat*, съемочная система ETM+  
Хибины (на фрагменте — г. Кировск).  
Увеличение фрагмента 2,5×



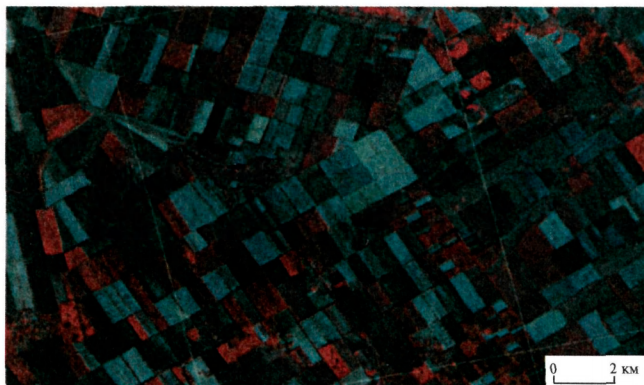


**10. Сканерный снимок со спутника «Ресурс-О»,  
съёмочная система МСУ-СК**

Кавказ и Северное Предкавказье



**11. ПЗС-снимок со спутника «Ресурс-О», съёмочная система МСУ-Э**  
Северное Предкавказье, поля Ставрополя



12. ПЗС-снимок со спутника *SPOT*, съемочная система HRV

Стокгольм





13. ПЗС-снимки со спутника *Ikonos*  
Нью-Йорк, Нью-Йоркская бухта

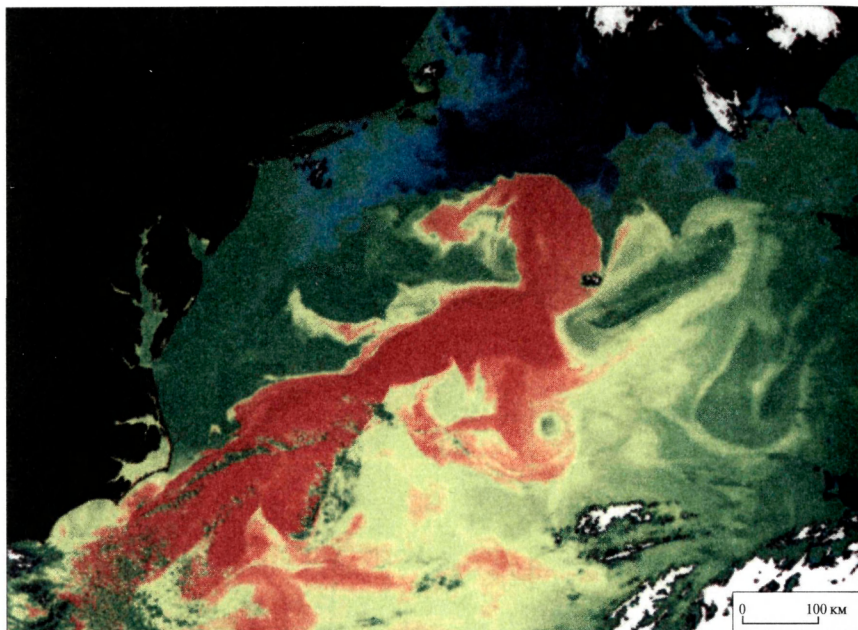


Вашингтон (увеличенный фрагмент снимка)

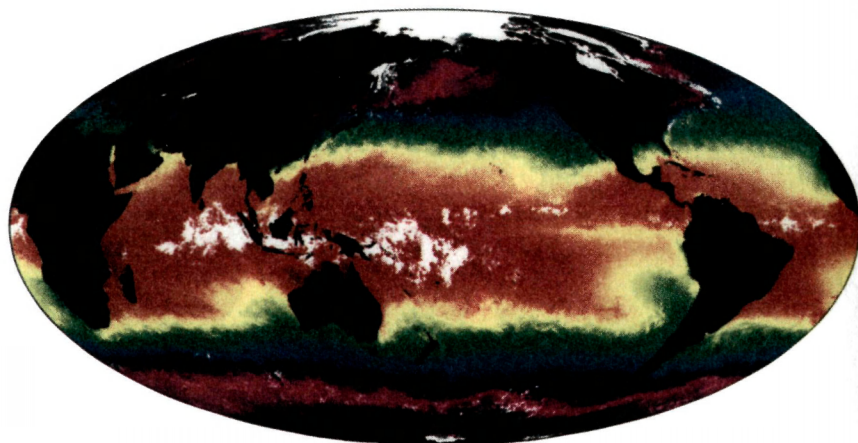


**14. Тепловой инфракрасный снимок, полученный со спутника *Terra*,  
съёмочная система MODIS**

Северная Атлантика, течение Гольфстрим

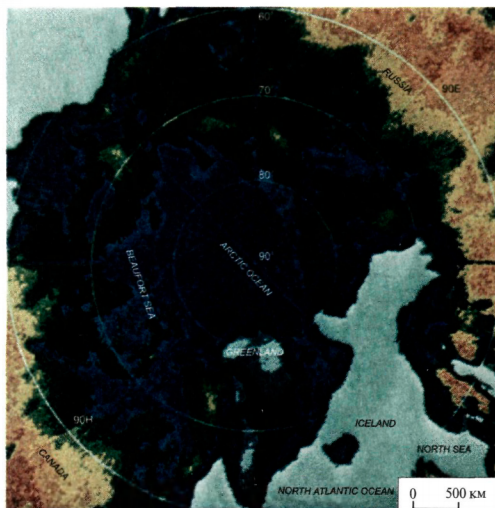


**15. Глобальное распределение температур морской поверхности  
в январе, по результатам съёмки со спутника *NOAA*,  
съёмочная система AVHRR**

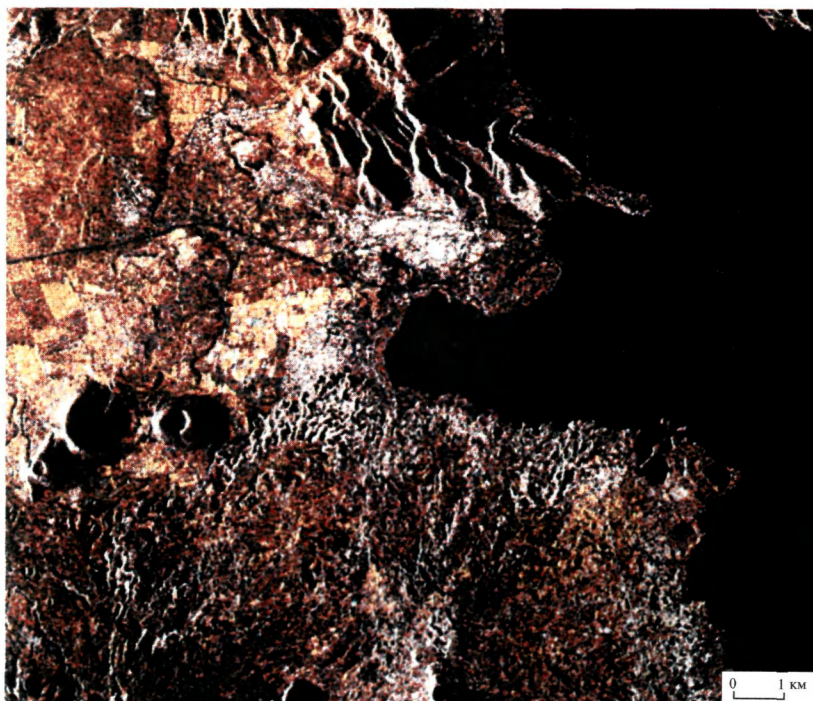




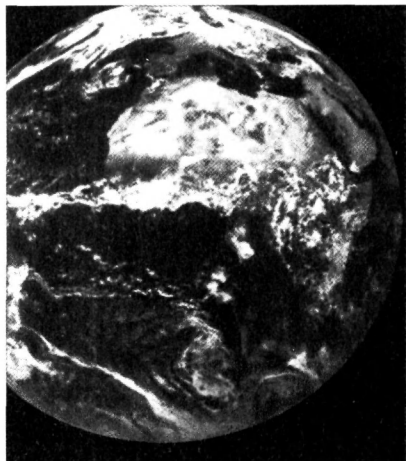
16. Микроволновый радиометрический снимок со спутника *Nimbus-5*  
Северный Ледовитый океан



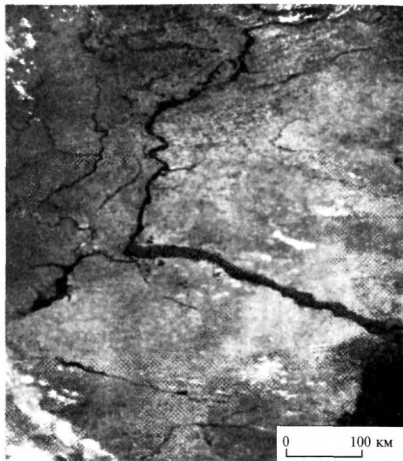
17. Радиолокационный снимок со спутника *ERS-1*.  
Цветовой синтез разновременных снимков  
Армения, озеро Севан



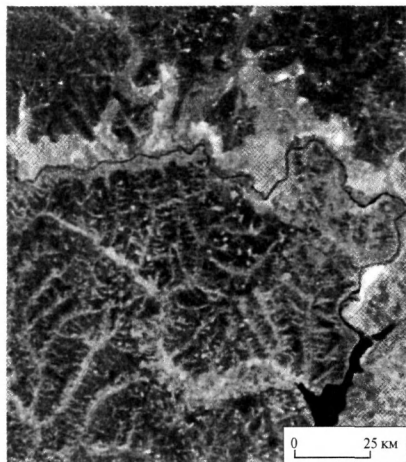
18. Изображение форм эрозионного рельефа на снимках разного пространственного разрешения



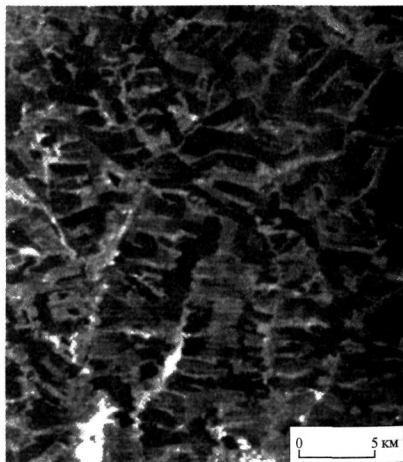
*a*



*б*



*в*



*г*

**Снимки со спутников:**

*a* — *Meteosat* ( $L_R = 5$  км);

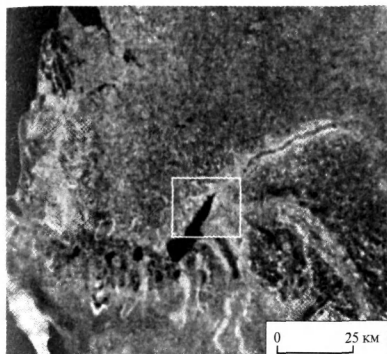
*б* — МСУ-М/*Метеор-30* ( $L_R = 1,5$  км);

*в* — МСУ-С/*Метеор-30* ( $L_R = 300$  м);

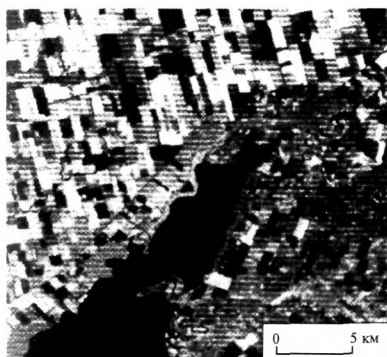
*г* — «Фрагмент»/*Метеор-30* ( $L_R = 85$  м)

## 19. Изображение сельскохозяйственных полей на снимках разного пространственного разрешения

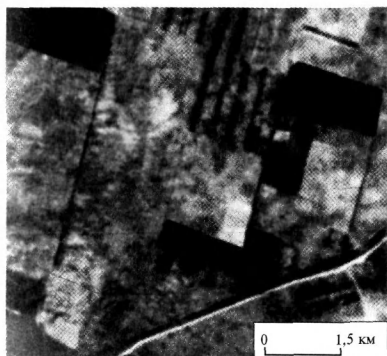
Поля в равнинных районах  
зернового земледелия



*a*

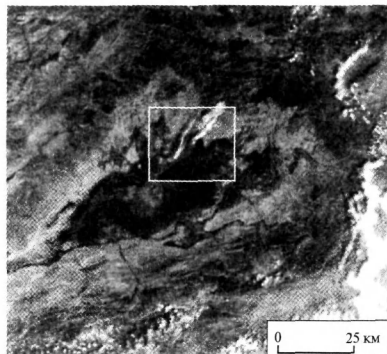


*б*

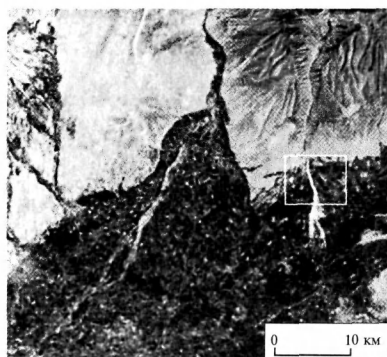


*в*

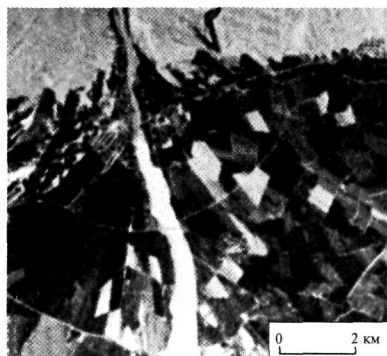
Поля в районах  
орошаемого хлопководства



*z*



*д*



*e*

Снимки со спутников:

*a* — МСУ-С/Метеор-30 ( $L_R = 300$  м);

*б* — «Фрагмент»/Метеор-30 ( $L_R = 85$  м);

*в* — КФА-210/Салют ( $L_R = 20$  м)

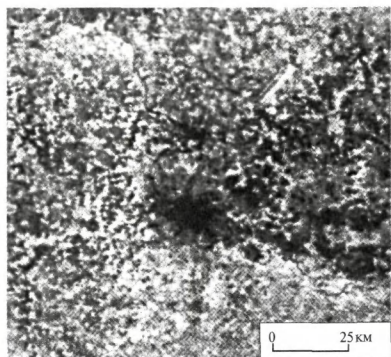
*z* — МСУ-С/Метеор-30 ( $L_R = 300$  м);

*д* — MSS/Landsat ( $L_R = 80$  м);

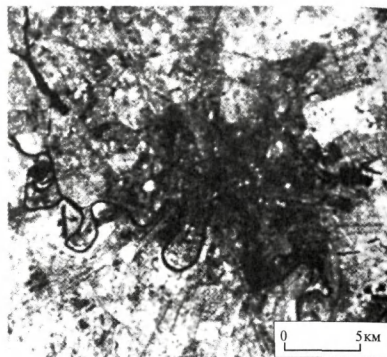
*e* — МКФ-6/Союз-22 ( $L_R = 20$  м)



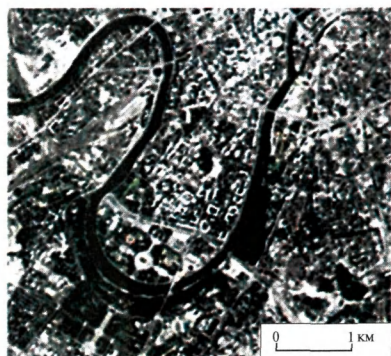
## 20. Изображение населенных пунктов на снимках разного пространственного разрешения



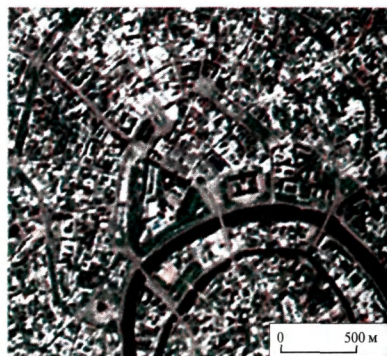
*a*



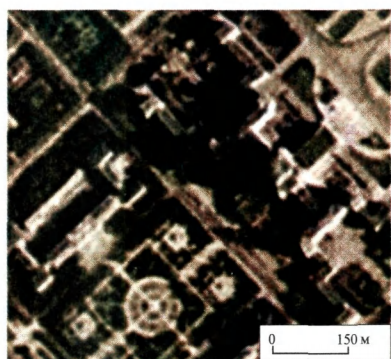
*б*



*в*



*г*



*д*



*е*

### Снимки со спутников:

*a* — МСУ-С/Метеор-30 ( $L_R = 300$  м);

*б* — MSS/Landsat ( $L_R = 80$  м);

*в* — TM/Landsat ( $L_R = 30$  м);

*г* — ASTER/Terra ( $L_R = 15$  м);

*д* — KBP-1000/Комета ( $L_R = 2$  м);

*е* — Key-Hole/Corona ( $L_R = 2$  м)



— первое сопровождение космической съемки, выполнявшейся пока ручными камерами, разновысотной фотографической аэросъемкой, воздушным и наземным спектрометрированием, т. е. проведение подспутникового эксперимента, выполненного на плато Устюрт во время полета кораблей *Союз-6*, *7*, *8* в 1969 г.;

— переход от съемки ручными камерами к использованию автоматической аэрофотокамеры со сменными объективами, что позволило впервые получить в 1970 г. в 18-дневном полете космического корабля *Союз-9* большой массив снимков (более 1000) в широком диапазоне масштабов от 1 : 800 000 до 1 : 7 000 000 с разрешением мелкомасштабных снимков порядка 70—100 м;

— съемочные эксперименты на первой орбитальной станции *Салют* в 1971 г., в которых удалось получить фотографические снимки с высоким для того времени разрешением 15—20 м, достигнутым благодаря применению специальной методики фотохимической обработки пленки, разработанной в Московском государственном университете им. М. В. Ломоносова;

— первое опробование в 1973 г. с космических кораблей *Союз-12*, *13* метода многозональной съемки при использовании ручной малоформатной камеры. Несмотря на невысокое разрешение снимков — 100—200 м, их анализ показал большие перспективы применения многозональных снимков, в частности, для исследований мелководного шельфа.

Накопление фонда многозональных фотоснимков высокого качества начато в 1976 г. с применением на космическом корабле *Союз-22* камеры МКФ-6, специально разработанной для многозональной космической съемки, представляющей агрегат из шести аппаратов (табл. 4.1). Снимки, обладающие хорошими геометрическими и фотометрическими свойствами, имеют разрешение в видимой части спектра около 20 м, в ближней инфракрасной — около 40 м (цв. вкл. II, 1). С высоты 280 км при масштабе съемки около 1 : 2 000 000 обеспечивался сравнительно небольшой охват — 110 × 160 км — недостаток, связанный с относительно малым форматом кадра (5,5 × 8 см). В 8-дневном полете корабля *Союз-22* было получено около 2,5 тыс. снимков, которые благодаря изменению наклона орбиты до 65° впервые охватили почти полную картину ландшафтов территории нашей страны. На примере этих материалов отработана методика дешифрирования многозональных снимков с использованием спектрального образа исследуемых объектов, особенно эффективная для изучения растительности, мелководий, твердого стока рек и многих других объектов, отраженная в специальном научно-методическом атласе. Хорошо зарекомендовавшая себя камера МКФ-6 вошла в состав штатной аппаратуры орбитальных станций *Салют*, *Мир*.

На орбитальных станциях *Салют* в середине 70-х гг. XX в. шли дальнейшие поиски оптимальных вариантов съемки. В многоме-

Таблица 4.1

## Характеристика основных отечественных фотографических космических снимков

Космический корабль, спутник	Высота орбиты, км	Фотокамера	$f$ , мм	Размер кадра, см	Масштаб	Охват, км	Разрешение, м
Орбитальная станция <i>Салют</i>	350	КАТЭ-140	140	18×18	1 : 2 400 000	430×430	60
<i>Союз-22</i> , орбитальная станция <i>Салют</i>	280	МКФ-6 (6 зон)	125	5,5×8	1 : 2 000 000	110×160	20 (вид) 40 (ИК)
<i>Ресурс-Ф1</i>	200—300	КАТЭ-200 (КФА-200) (блок из 4 камер)	200	18×18	1 : 1 000 000	180×180	20 (вид) 30 (ИК)
		КФА-1000	1000	30×30	1 : 200 000	60×60	5—8 (ч-б) 10—12 (спз)
<i>Ресурс-Ф2</i>	200—300	МК-4 (4 зоны)	300	18×18	1 : 600 000	120×120	10—12
		ТК-350	350	30×45	1 : 600 000	200×300	10
<i>Комета</i>	220	КВР-1000	1000	18×18	1 : 220 000	40×40	2

сячном полете орбитальной станции *Салют-4* (1975), например, использовалось 12 съемочных систем разных типов. Особое значение приобрела съемка широкоформатной (18×18 см) камерой КАТЭ-140 с  $f = 140$  мм, позволившей получать снимки большого охвата 430×430 км с разрешением 60 м в масштабе 1 : 2 400 000. Съемки охватили 4,5 млн км<sup>2</sup> на юге нашей страны, по этим снимкам созданы фотокарты южных районов. Снимки получили широкое применение, а камера КАТЭ-140 также вошла в состав штатной аппаратуры орбитальных станций.

В конце 70-х гг. XX в. многообразие экспериментальных съемочных материалов сменяется массовым поступлением с орбитальных станций *Салют-6* (1978—1982), *Салют-7* (1983—1986) унифицированных материалов съемки, выполняемой с помощью камер КАТЭ-140 и МКФ-6, а также ручными камерами. С *Салюта-6*, например, получено более 15 тыс. снимков. Однако общий недостаток фонда снимков с орбитальных станций — ограничение охвата съемки шириной 52° в соответствии с наклоном их орбиты.

На сменявшей *Салюты* орбитальной станции *Мир* (1986—1999) использовалась длиннофокусная камера, обеспечившая снимки высокого разрешения. Но впоследствии фотографирование с орбитальных станций начали заменять другими видами съемки. На *Мире* был специально оборудован природно-ресурсный модуль с комплексом радиофизической аппаратуры для съемки в радиодиапазоне и телевизионной дистанционно управляемой аппаратуры для наблюдения за динамическими процессами. На этом модуле впервые выполнялась и конвергентная стереосъемка («вперед — назад») с помощью оптико-электронного сканера MOMS (Modular Optoelectronic Multispectral Scanner), обеспечивающего разрешение надирных панхроматических снимков 6 м, а многозональных и полученных при конвергентной съемке — 13,5 м. Однако в получении снимков орбитальные станции играют теперь меньшую роль, так как проведение массовых съемок передано автоматическим спутникам. С российского модуля *МКС* — Международной космической станции — оперативные наблюдения и съемки с экологическими задачами, например по программе «Ураган», выполняют с помощью цифровых камер, передавая материалы съемки по радиоканалам.

**Снимки со спутников Ресурс-Ф.** Основной массив в фонде космических фотоснимков относится к снимкам с автоматических спутников *Ресурс-Ф*, которые работали с первой половины 70-х до конца 90-х гг. XX в. на субполярных орбитах с наклоном 82° и высотой 200—300 км. Работа 4—5 спутников в год с месячным сроком (всего функционировало более 100 таких спутников), в течение которого с каждого из них получали 3—4 тыс. снимков, обеспечила создание фонда фотоснимков на всю территорию нашей страны. По заказу других государств выполнялась съемка за-

рубежных территорий; для коммерческого обеспечения снимками зарубежных заказчиков создано внешнеторговое объединение «Союзкарта».

Фонд снимков со спутников *Ресурс-Ф* включает несколько их видов с разным охватом и разрешением. Со спутников первого поколения *Ресурс-Ф1* их получали камерами КАТЭ-200 (КФА-200) и КФА-1000 (см. табл. 4.1, цв. вкл. II, 2, 3). Камера КАТЭ-200 давала более обзорные снимки в масштабе 1 : 1 000 000 с охватом 180 × 180 км. Три таких камеры составляли блок многозонального фотографирования и использовались для съемки в спектральных диапазонах 0,5—0,6, 0,6—0,7, 0,7—0,8 мкм, а четвертая — для спектрозональной съемки. Разрешение снимков в разных зонах составляет 20—30 м. Второй вид аппаратуры — камера КФА-1000 — при относительно небольшом охвате 60 × 60 км давала снимки очень высокой детальности с разрешением на местности 5—8 м при съемке на черно-белую пленку и 10—12 м при съемке на спектрозональную пленку. Для расширения полосы охвата на спутнике устанавливали две камеры КФА-1000 с небольшим отклонением осей вправо и влево. На последней модификации спутника (*Ресурс-Ф1М*, 1997 г.) в связи с большим спросом на снимки высокого разрешения перешли к использованию одной камеры КАТЭ-200 и трех КФА-1000, устанавливаемых для увеличения охвата по верному типу.

Со спутников второго поколения *Ресурс-Ф2*, которое начало работать параллельно с первым с 1988 г., снимки получали 4-канальной фотографирующей системой МК-4, представлявшей блок из четырех фотокамер, обеспечивавших съемку в разных спектральных зонах в масштабе 1 : 600 000 с охватом 120 × 120 км с высоким разрешением 10—12 м (цв. вкл. II, 4). Одна камера обычно использовалась для съемки на спектрозональную пленку. Устройство компенсации сдвига, наличие калибровочных данных и впечатанного в момент съемки фотометрического клина рассчитаны на метрическую обработку снимков. Система МК-4 позволила экономично перейти к большему охвату снимков при хорошем разрешении, однако на спутниках *Ресурс-Ф2* продолжали использовать и высокодетальную камеру КФА-1000. Параллельно с этим эпизодически получали снимки со спутника новой модификации *Ресурс-Ф3* с очень длиннофокусной камерой КФА-3000 ( $f = 3000$  мм) для съемки в масштабе 1 : 100 000 и крупнее с разрешением 2—3 м.

Фотоснимки высокого разрешения со спутников *Ресурс-Ф*, обеспечившие нужды картографической службы и отраслей народного хозяйства, представляют основной источник отечественной космической информации, используемой для общегеографического и тематического картографирования. Они положены в основу выполнения крупнейшей картографической программы комплексной картографической инвентаризации природных ресурсов

ККИПР. Эти снимки оставались непревзойденными по качеству в мировом фонде снимков до конца 90-х гг. XX в., когда вышли на первый план новые технологии оптико-электронной съемки.

#### **Конверсионные снимки со спутников оборонного ведомства.**

К уникальному фонду фотографических космических снимков в нашей стране в 90-е гг. XX в. добавился фонд снимков с российских спутников оборонного назначения, ставший доступным гражданскому потребителю в результате конверсионной деятельности. Их распространяет межотраслевая ассоциация оборонных ведомств «Совинформспутник». Эта часть фонда включает снимки, полученные не только ранее с разведывательных спутников, но и с действующих спутников *Комета* на субполярной орбите высотой 220 км; запуск *Кометы-20* состоялся, например, в конце 2000 г. Снимки получают двумя камерами. Топографическая камера ТК-350 с  $f = 350$  мм и большим форматом кадра  $30 \times 45$  см дает снимки масштаба  $1 : 660\,000$  с охватом  $200 \times 300$  км и разрешением 10 м. Съемка ведется с перекрытием 60—80 % для дальнейшей стереообработки при увеличении снимков до масштаба  $1 : 50\,000$ . Вторая камера высокого разрешения КВР-1000 с  $f = 1000$  мм и шириной кадра 18 см осуществляет панорамный обзор (с компенсацией сдвига изображения) в пределах кадра ТК-350. Семь панорамных кадров размером  $18 \times 72$  см перекрывают весь кадр ТК-350; каждый панорамный кадр делят на 4 снимка с охватом  $40 \times 40$  км масштаба  $1 : 220\,000$  с разрешением 2 м (цв. вкл. II, 5). Эти снимки получают без перекрытия и предназначены они для детального дешифрирования при увеличении снимков до масштаба  $1 : 10\,000$ . Фотографический комплекс *Кометы* обеспечивает создание топографических карт масштаба  $1 : 50\,000$ , ортофотокарт, цифровых моделей и тематических карт масштаба  $1 : 25\,000$ . Без наземных опорных точек достигается точность 20 м в плане, 10 м по высоте, а с дополнительным наземным определением опорных точек (обычно с помощью GPS) — 10 м в плане и 3—5 м по высоте. Съемочная аппаратура *Кометы* на рубеже веков представляла по существу единственный специально предназначенный для топографического картографирования комплекс, решавший задачи создания крупномасштабных топографических карт.

**Зарубежный фонд фотографических снимков с околоземных орбит.** В США фонд фотографических космических снимков активно формировался в десятилетие 60-х гг. XX в., когда выполнялись экспериментальные программы съемки с пилотируемых космических кораблей *Mercury*, *Jeminy*, *Apollo*. Существенный массив снимков (более 1000) получен с 11 кораблей *Jeminy* в 1965—1966 гг. ручными камерами. Снимки с разрешением 70—100 м получали сначала на цветной пленке, а начиная с *Jeminy-VII*, — на цветной инфракрасной (т.е. спектрзональной). С *Apollo-VII* стали использовать для съемки автоматические камеры, приспособлен-

ные для условий космического полета аэрофотоаппараты, что увеличило объем съемочных материалов и обеспечило стереосъемку. С *Apollo-IX* в 1969 г. впервые выполнили съемку с помощью блока из четырех синхронизированных камер с разными фильтрами, реализовав таким образом многозональную съемку, идея и аппаратура которой были разработаны в Московском государственном университете им. М. В. Ломоносова в конце 50-х гг. XX в. и которая получила успешное развитие в последующем. Пути развития космической фотосъемки в эти годы в двух космических державах были таким образом очень схожими.

Снимки с пилотируемых кораблей США охватывают лишь тропические и субтропические широты, что связано с наклоном орбиты кораблей  $30^\circ$ . Эти снимки были включены в изданные атласы и благодаря этому стали широко известны и использовались исследователями разных стран.

Фонд фотографических снимков был существенно пополнен во время полета в 1973 г. орбитальной станции *Skylab*, в программе работы которой 100 ч было отведено съемочным экспериментам. С помощью 6-зональной фотографирующей системы с  $f = 152$  мм и форматом кадра  $7 \times 7$  см получены многозональные снимки с разрешением 30 м, а камера для детальной съемки земной поверхности ЕТС (Earth Terrain Camera) с  $f = 460$  мм и форматом кадра  $11,5 \times 11,5$  см обеспечила получение черно-белых снимков с разрешением 16 м. За 5 месяцев работы трех сменных экипажей получена 21 тыс. снимков, имевших, однако, ограниченное распространение.

В дальнейших космических исследованиях США отказались от программ пилотируемых полетов (последним был совместный полет кораблей *Союз—Аполлон* в 1975 г.) до разработки возвращаемого корабля, и в течение почти десятилетия в 70-х гг. XX в. фотографических снимков с пилотируемых кораблей и орбитальных станций не поступало.

С вводом в действие в 1981 г. возвращаемого челночного корабля *Shuttle* в зарубежных исследованиях возобновлены программы космической фотосъемки, рассчитанные на получение детальных снимков с помощью широкоформатной космической фотокамеры LFC (Large Format Camera) с  $f = 305$  мм, форматом кадра  $23 \times 43$  см и разрешением 10 м. С европейской орбитальной станции *Spacelab*, выведенной на орбиту с помощью корабля *Shuttle* в 1983 г., выполнялась фотосъемка по программе «Атлас», для которой в ФРГ была разработана метрическая фотокамера МС (Metric Camera) с  $f = 305$  мм и форматом кадра  $23 \times 23$  см, обеспечивающая разрешение 15 м. По этой программе получена 1 тыс. снимков.

Таким образом, поступление фотографических материалов из космоса, прерванное за рубежом на десятилетие, возобновилось в ограниченном объеме при существенном повышении качества

снимков и их ориентации на решение задач топографического картографирования.

К середине 90-х гг. XX в. фонд снимков высокого разрешения в США был пополнен, как и в нашей стране, в связи с конверсионной деятельностью. Стали доступными гражданскому пользователю снимки со спутников системы национальной безопасности США, полученные в связи с выполнением программы *Corona* в 1960—1972 гг. Основная аппаратура — камера Key Hole («замочная скважина») обеспечивала разрешение до 2 м. На спутнике устанавливались по две панорамные камеры с отклонением осей от вертикали по трассе съемки на 15° «вперед — назад» (Forward—Aft) для получения конвергентных стереопар снимков. Панорамная камера за один разворот давала узкий протяженный кадр поперек трассы, охватывая 40 × 600 км и обеспечивая съемку полосы шириной 600 км.

Каталог снимков, полученных по программе *Corona*, включающий информацию о 860 тыс. снимков, имеется в Интернете и они распространяются по стоимости, доступной широкому российскому потребителю.

Фотографические снимки с американских пилотируемых кораблей, полученные ручными камерами, также каталогизированы; 400 тыс. снимков переведено в цифровую форму и они доступны для просмотра и заказа по Интернету. Географическим результатам анализа снимков, сделанных ручными камерами в международных экспериментах *Shuttle—Mup*, посвящена совместная книга российских и американских исследователей.

**Фотографические снимки с межпланетных орбит.** Космическую фотосъемку выполняют не только с околоземных орбит. В 1968 и 1969 гг. впервые были получены снимки Земли как планеты в целом. Они сделаны с межпланетных станций *Зонд-5—7*, предназначенных для съемки обратной стороны Луны, но на траектории Луна — Земля выполнивших фотосъемку Земли с расстояния 90 тыс. и 70 тыс. км. Широкоформатные (13 × 18 см) черно-белые снимки с разрешением 6 км с *Зонда-5*, сделанные с интервалом 20 мин, образовали стереопары. С *Зонда-7* получены цветные снимки, продемонстрировавшие хорошие возможности передачи цвета изображения планеты с больших расстояний.

Впоследствии аналогичные снимки Земли были сделаны ручными камерами с американских кораблей *Apollo*, направлявшихся к Луне в 1969—1970 гг.

#### 4.1.2. Сканерные снимки

Снимки, оперативно передаваемые по радиоканалам, — вначале телевизионные, а затем сканерные — получают, как и фотографические, с начала 60-х гг. XX в. Невысокое разрешение сним-

ков, которое обеспечивали первые съемочные системы, измеряемое километрами, обусловило применение сканеров вначале лишь на метеорологических спутниках, и только в 70-х годах, когда удалось перейти к разрешению в десятки метров, такие снимки стали получать с ресурсных спутников.

**Сканерные снимки с метеорологических спутников.** С метеорологических спутников ежесуточно получают снимки облачного покрова. На свободных от облачности участках изображается открытая поверхность суши и океанов, а регулярное повторение съемки делает такие снимки ценными для изучения изменчивых явлений. Поэтому снимки с метеоспутников входят в круг материалов космической съемки, используемых в широком спектре географических исследований.

**Снимки с отечественных метеоспутников** получают с 1967 г., когда начала действовать спутниковая система *Метеор* Гидрометеослужбы нашей страны, включающая 2—3 одновременно работающих спутника на круговых субполярных орбитах высотой 800—1200 км. Работали более 50 таких спутников; сменилось их третье поколение, спутники которого переведены на солнечно-синхронные орбиты. Со спутников первого поколения получали с помощью двух телевизионных камер снимки с охватом 1000 км и разрешением 3—8 км в масштабе 1 : 8 000 000. Современные сканерные снимки с полосой охвата 2500 км и разрешением по надирной линии снимка 1—2 км записываются в масштабе 1 : 12 000 000. С последних спутников выполняется многозональная съемка в видимом, ближнем инфракрасном и тепловом инфракрасном диапазонах. Кроме снимков облачности, со спутников *Метеор* получают информацию для исследования теплового баланса Земли и решения других задач. В частности, на спутнике *Метеор-3* спектрометр ультрафиолетового диапазона TOMS обеспечивал ежедневное глобальное картографирование состояния озонового слоя Земли, что имеет исключительно важное экологическое значение.

По снимкам со спутников *Метеор* выполняется дешифрирование облачного покрова, разделение его различных типов, составление карт облачности и анализ ее распределения, что необходимо для службы погоды. Эти снимки используют также для изучения снежного покрова и его динамики в целях гидрологического прогнозирования, для анализа ледовой обстановки в морях. Снимки применялись и для изучения тектонических структур земной поверхности, причем сильно генерализованное изображение дало возможность выявления глубинных нарушений земной коры. Таким образом снимки со спутников *Метеор* обеспечивали решение довольно широкого круга задач. Теперь в связи с наличием разнообразных других материалов эти снимки не архивируют, ограничиваясь их оперативным использованием.



**Снимки с зарубежных метеоспутников.** За рубежом фонд снимков с метеоспутников в первые десятилетия космических исследований формировался главным образом за счет спутников США. На экспериментальном этапе в 60-е гг. XX в., при поисках оптимальной съемочной системы, со спутников *TIROS*, *ESSA*, *Nimbus* получали снимки с постепенным повышением разрешения от 8 до 1 км и увеличением охвата до 2500 км. Эти спутники решали не только метеорологические задачи. Например, с точки зрения пополнения фонда снимков в видимом диапазоне очень важным оказалось выполнение съемки со спутника *Nimbus-7* цветовым сканером береговой зоны CZCS (Coastal Zone Color Scanner), в шести каналах в видимой части спектра с разрешением 0,8 км. Составление по этим снимкам глобальных карт концентрации фитопланктона на основе анализа цветовых характеристик вод океана используется для мониторинга биомассы океана, оценки углеродного цикла в глобальных моделях (цв. вкл. II, б). По данным CZCS за 8 лет (1978—1986) составлено 56 000 таких глобальных изображений, архив которых создан в Годдардовском центре дистанционных данных НАСА. В дальнейшем, после завершения программы *Nimbus*, такие снимки стали получать с океанологических спутников *Seastar* (сканер SeaWIFS), а позже — с *Terra* и *Aqua* (гиперспектральная система MODIS).

Современные метеоспутники США NOAA (по названию гидрометеорологической службы США National Oceanic and Atmospheric Administration) работают с 1970 г. С 1978 г. со спутников NOAA-6—14 на солнечно-синхронных орбитах высотой 850 км получают с помощью радиометров AVHRR (Advanced Very High Resolution Radiometer) снимки в 5 зонах видимой, ближней и средней инфракрасной, а также тепловой инфракрасной частей спектра с разрешением 1 км при охвате 2700 км. Помимо обеспечения службы погоды по ним строятся карты вегетационного индекса NDVI для оценки состояния растительности, ее сезонных изменений, изучения процессов обезлесивания и опустынивания, т. е. для решения задач мониторинга состояния природной среды. Такие глобальные карты создаются с 1982 г. в центрах данных NOAA с разным пространственным разрешением и временным осреднением (за 10 дней, по месяцам, годам); они архивируются и доступны для потребителей. По этой информации создана первая глобальная карта земных покровов, отражающая распределение растительности на Земле в 1992—1993 гг.

Снимки со спутников NOAA широко используются во всем мире, их принимают на упрощенных пунктах приема, например на судовых станциях, но при уменьшении разрешения до 4 км. Некоторые из этих станций оснащены системами географической привязки снимков по орбитальным данным и выдают изображения с сеткой географических координат.

Поступление снимков со спутников *NOAA*, практически обслуживающих задачи международной службы погоды, завершается, но в первые полтора десятилетия XXI в. ожидается получение снимков той же съемочной системой *AVHRR* с европейских спутников *METOP* (Meteorology Operational Programme), которые должны заменить *NOAA* в качестве международных метеоспутников.

Тем не менее продолжается получение снимков и с национальных метеоспутников, например, в Китае, где с 1988 г. со спутников *FY-1* (Feng Yun — ветер и облачность) с помощью радиометра *VHRSR*, работающего в 10 диапазонах видимой, ближней инфракрасной и тепловой инфракрасной части спектра, получают снимки с разрешением 1 км и охватом 3200 км, которые при съемке с 7 витков охватывают всю территорию страны.

Таким образом, характеристики снимков с метеоспутников разных стран сейчас примерно одинаковы, а круг решаемых ими задач расширяется — от собственно метеорологических до контроля состояния окружающей среды.

**Снимки с высокоорбитальных метеоспутников.** Особую часть фонда составляют снимки с геостационарных спутников на удаленных орбитах высотой около 36 000 км, система которых (4—5 спутников) одновременно обеспечивает полный глобальный охват при многократной повторяемости съемки в течение суток. В 80—90-х гг. XX в. глобальную съемку для обеспечения службы погоды вели два спутника США *GOES* (Geostationary Operational Environmental Satellite), европейский *Meteosat* и японский *GMS* (Geostationary Meteorological Satellite). Так, *Meteosat*, работающий с 1977 г. (к 1997 г. было запущено 7 таких спутников), обеспечивает получение снимков на Европу, Африку и Ближний Восток с Атлантическим и Индийским океанами (цв. вкл. II, 7).

Снимки в видимом и тепловом инфракрасном диапазонах получали вначале с разрешением 5 км, а с 1986 г. — 2,5 км. Со спутников *Meteosat* второго поколения предусмотрена съемка в 12 каналах оптического диапазона. Новое поколение спутников *GOES* также должно обеспечить получение снимков в 12—18 каналах от 0,47 до 13,3 мкм с разрешением в видимом диапазоне 0,5 км, а в тепловом инфракрасном — 2 км при возможности обзора диска Земли за 5—15 мин. Параллельно со съемкой геостационары ведут наблюдения за химическим составом и физическим состоянием атмосферы.

Изображения облачности, поступающие в реальном режиме времени, обрабатываются в мировых метеорологических центрах с помощью программы *Meteo MapMarker*, а составленные по снимкам оперативные метеокарты ретранслируются потребителям через тот же спутник. Для глобального обзора предусмотрен обмен информацией между метеорологическими службами западного и восточного полушарий.

С 1982 г. на геостационарной орбите ведет съемку индийский спутник *InSat*, обеспечивающий национальные интересы; с 1994 г. занял свое место на геостационарной орбите российский спутник *Электро*. С 2001 г. работает китайский геостационарный метеоспутник *FY-2*.

**Сканерные снимки с ресурсных спутников.** Важнейшую для географических исследований часть фонда сканерных снимков составляют снимки с ресурсных спутников, которые начали получать в 70-х гг. XX в., когда усовершенствованная технология сканерной съемки обеспечила разрешение снимков в несколько десятков метров.

**Снимки с американских ресурсных спутников *Landsat*.** С 1972 г. началось накопление огромного фонда снимков (теперь насчитывающего десятки миллионов) со спутников США для исследования природных ресурсов *Landsat* (первоначальное название *ERTS* — Earth Resources Technological Satellite) на солнечно-синхронных орбитах высотой около 900 км (*Landsat-1—3*) и 700 км (*Landsat-4, 5, 7*) с повторяемостью съемки через 18 и 16 суток. Состав аппаратуры на спутниках этой серии несколько изменялся, характеристики снимков совершенствовались.

Основной массив снимков с первых трех спутников получен многозональной сканирующей системой *MSS* (*MultiSpectral Scanner*), дающей изображение полосы шириной 185 км в четырех спектральных зонах видимой и ближней инфракрасной части спектра (0,5—0,6; 0,6—0,7; 0,7—0,8; 0,8—1,1 мкм) с элементом разрешения 59×79 м (цв. вкл. II, 8). На третьем спутнике она была дополнена тепловым каналом с разрешением 240 м.

С 1982 г. со спутника *Landsat-4* начали получать снимки многозональной сканирующей системой следующего поколения *TM* (*Thematic Mapper*), работающей в семи спектральных диапазонах видимой, ближней, средней и тепловой инфракрасной частей спектра при том же охвате 185 км с разрешением в видимом, ближнем и среднем инфракрасном диапазоне 30 м, а в тепловом инфракрасном — 120 м. Повысилось не только пространственное, но и радиометрическое разрешение снимков: снимки *TM* передают 256 градаций яркости, тогда как *MSS* только 64 градации. Снимки *TM* с 1984 г. продолжали получать со спутника *Landsat-5*, проработавшего до 1998 г.

С 1999 г. со спутника *Landsat-7* получают снимки новой системой *ETM+* (*Enhanced Thematic Mapper Plus*) (цв. вкл. II, 9), в которой к семи каналам *TM* добавлен панхроматический канал с разрешением 15 м, а разрешение теплового канала повышено до 60 м (табл. 4.2).

Система *MSS*, проработавшая на спутниках *Landsat-1—5* в течение 20 лет и выполнившая задачу многократной съемки Земли, на седьмом спутнике не использовалась.

**Спектральные зоны съемки сканирующей системой ЕТМ+  
спутника *Landsat-7***

Номер зоны	Длины волн, мкм	Разрешение, м	Решаемые задачи
1	0,45—0,52	30	Изучение мелководного шельфа. Оценка хлорофилла и каротина в растительном покрове и разделение вечнозеленых и листопадных лесов
2	0,52—0,60	30	Оценка состояния зеленой растительности
3	0,63—0,69	30	Оценка поглощения хлорофилла для определения типа растительности
4	0,76—0,90	30	Оценка отражения радиации в ближнем инфракрасном диапазоне для определения биомассы растительности. Выделение водных объектов
5	1,55—1,75	30	Оценка влагосодержания растительности и почв. Разделение снежного и облачного покровов, сухого и влажного снега
6	10,40—12,50	60	Картографирование температур поверхности. Определение влажности почв
7	2,08—2,35	30	Оценка влагосодержания растительности. Распознавание типов горных пород. Определение гидротермальных объектов. Оценка содержания ионов окиси водорода в почве
Pan	0,52—0,90	15	Детальное картографирование

В 2001 г. на орбиту спутника *Landsat-7* недалеко от него был выведен спутник *EO-1* (Earth Observing-1), предназначенный для отработки съемочных систем нового поколения для спутников *Landsat*. Опробовалась более легкая система ALI (Advanced Land Imager), в которой используются линейки ПЗС и которая должна заменить ЕТМ+.

До поступления снимков потребителю выполняется их предварительная обработка; предусмотрено несколько ее уровней. При общей обработке для всех снимков проводится предварительная радиометрическая, геометрическая коррекция и привязка по ор-

битальным данным с точностью до 1 км; такие снимки с первых спутников записывались на фотопленку, потребители получали отпечатки в масштабе 1 : 1 000 000 (или 1 : 500 000, 1 : 250 000) — зональные черно-белые или цветные синтезированные, дополненные фотометрическим клином и служебной информацией (дата съемки, координаты углов и центра снимка, высота Солнца и т. п.). Прецизионная выборочная обработка предусматривала более точную радиометрическую и геометрическую коррекцию, привязку по опорным точкам с погрешностью около 200 м и перевод изображения в равноугольную проекцию UTM (Universal Transverse Mercator). Теперь обработка снимков направлена на их распространение преимущественно в электронном виде, а также при разных уровнях обработки (уровень L0R — «сырые» данные с необходимой для коррекции служебной информацией, L1R — с радиометрической коррекцией, L1G — с геометрической) при возможности заказа части снимка (1/2, 1/4 площади) ввиду большой стоимости информации.

Уже к 1983 г. снимками MSS была охвачена вся поверхность Земли, многие районы многократно. Фонд этих снимков насчитывает несколько десятков миллионов.

По снимкам *Landsat* составляют фотокарты обширных территорий. Уже через несколько месяцев работы спутника удалось создать фотокарты для США, многих других стран, континентов в целом. Изданы многочисленные атласы и тематические наборы снимков.

Снимки со спутников *Landsat* представляют самые распространенные в мире материалы космической съемки и находят применение в разнообразных областях геолого-географических исследований и хозяйственной деятельности. Широкое развитие получило составление по ним карт «земных покровов» и использования земель, в том числе городских. По ним выполнены эксперименты по определению площадей посевов основных сельскохозяйственных культур и прогнозированию урожайности. Снимки используются во всем спектре направлений тематического картографирования, особенно для территорий развивающихся стран. Однако их картографическая оценка показала, что задачи точного топографического картографирования по этим снимкам решать не удастся.

**Снимки с отечественных ресурсных спутников Метеор-Природа, Ресурс-О, Метеор-ЗМ.** В 1974—1980 гг. в нашей стране начали получать снимки с экспериментальных ресурсных спутников по программе «Метеор-Природа» (спутники *Метеор-18*, *25*, *28*, *29*, *30*), работавших вначале на полярных орбитах высотой 1000 км, а с *Метеора-28* — на полярных солнечно-синхронных орбитах высотой 650 км. При экспериментальном поиске оптимального варианта ресурсного спутника на них использовались разные виды аппаратуры и получали снимки с различными характеристиками. На всех

Характеристика снимков со спутников *Метеор-Природа*, *Ресурс-О*

Съемочная система	Спектральные зоны съемки, мкм	Разрешение, м	Ширина полосы обзора, км	Обычно используемый масштаб
МСУ-М	0,5—0,6; 0,6—0,7; 0,7—0,8; 0,8—1,1	1700	2200	1 : 12 000 000
МСУ-С	0,6—0,7; 0,7—1,1	280	1400	1 : 2 500 000
«Фрагмент»	0,5—0,6; 0,6—0,7; 0,7—0,8; 0,8—1,1	85	90	1 : 500 000
МСУ-СК	0,5—0,6; 0,6—0,7; 0,7—0,8; 0,8—1,1 10,4—12,6	170	600	1 : 2 500 000
		550		
МСУ-Э	0,5—0,6; 0,6—0,7; 0,8—0,9	45	45	1 : 200 000

спутниках работала система МСУ-М — многозональное сканирующее устройство малого разрешения, ведущее съемку в тех же четырех спектральных диапазонах, что и система MSS (табл. 4.3), с разрешением в средней части снимка  $1 \times 1,7$  км и полосой обзора более 2000 км при записи изображения в масштабе 1 : 12 000 000. Начиная со спутника *Метеор-28* к нему добавлен сканер среднего разрешения МСУ-С, работающий в двух спектральных каналах видимой и ближней инфракрасной части спектра с разрешением 280 м и полосой обзора 1400 км. Эти изображения записывались в масштабе 1 : 2 500 000.

Геометрические свойства снимков, полученных сканерами малого и среднего разрешения, специфичны. Из-за большого угла сканирования ( $2\beta = 106^\circ$  у МСУ-М и  $90^\circ$  у МСУ-С) разрешение снимков вдоль строки непостоянно, оно ухудшается на краях строки у снимков МСУ-М в 4 раза и МСУ-С в 2,5 раза; масштаб по строке также не одинаков. Компьютерная геометрическая коррекция предусматривалась лишь для выборочных кадров.

Снимки МСУ-М и МСУ-С использовались в геологических, гидрологических, гляциологических, лесохозяйственных исследованиях. Оперативность съемки обусловила их применение для изучения динамики ледового и снежного покрова, мониторинга наводнений, лесных пожаров. Однако недостаточное пространственное разрешение не позволило использовать их для оперативных наблюдений за состоянием сельскохозяйственной растительности и прогноза урожайности. Этот пробел ликвидирован с получением с последнего спутника этой серии *Метеор-30* снимков скани-

рующей аппаратурой высокого разрешения «Фрагмент» в четырех каналах видимой и ближней инфракрасной части спектра с разрешением 85 м при охвате 90 км, используемых обычно в масштабе 1 : 500 000. В отличие от аналоговых устройств малого и среднего разрешения информация высокого разрешения впервые поступала с отечественных спутников в цифровой форме и имела хорошую радиометрическую точность. Снимки, полученные по программе «Метеор — Природа», архивировались и распространялись НПО «Планета».

В середине 80-х гг. XX в. осуществлен переход от экспериментальных к эксплуатационным ресурсным спутникам *Ресурс-О*, также обеспечивающим снимки разного разрешения и территориального охвата. Обзорные снимки получают системой конического сканирования среднего разрешения МСУ-СК, работающей в пяти спектральных диапазонах — четырех в видимой и ближней инфракрасной части спектра с разрешением 170 м и в тепловом инфракрасном диапазоне с разрешением 600 м — при ширине полосы обзора 600 км. Снимки обычно воспроизводятся в масштабе 1 : 2 500 000 (цв. вкл. II, 10). Переход к коническому сканированию обеспечивает более высокую радиометрическую точность.

Более детальные снимки получают с помощью системы МСУ-Э, представляющей устройство оптико-электронного типа, использующее многоэлементные линейные приемники излучения; по классификации, приведенной на рис. 2.38, такие снимки относятся к типу ПЗС-снимков и рассматриваются здесь, чтобы не нарушать целостной картины работы спутника. МСУ-Э дает изображения в трех каналах видимой и ближней инфракрасной части спектра с разрешением 35 × 45 м при ширине полосы обзора 45 км (цв. вкл. II, 11). Таким образом, по детальности эти снимки приближаются к снимкам ТМ/*Landsat*, уступая им по охвату и числу спектральных каналов. Для расширения охвата на спутниках работали по два устройства МСУ-Э.

Съемку МСУ-СК вели постоянно над территорией Европы и России, а МСУ-Э — по заказу потребителей. Пропускная способность радиоканала не обеспечивала одновременную передачу всей информации, например при работе МСУ-Э информация МСУ-СК поступала лишь в двух зонах.

Снимки МСУ-СК и МСУ-Э стали основными при формировании фонда снимков с ресурсных спутников в нашей стране. Большая часть их получена со второго (1988 — 1994) и третьего (1995 — 2000) спутников *Ресурс-О*. При запуске в 1998 г. четвертого спутника получены очень качественные снимки МСУ-СК с разрешением 140 м и МСУ-Э с разрешением 25 м при охвате 60 км, однако этот спутник проработал недолго. Снимки с такими характеристиками планируется получать со спутников *Ресурс-О* второго поколения.

С 2001 г. получение снимков, близких по характеристикам к снимкам *Ресурс-О*, продолжено с ресурсных спутников *Метеор-3М*. Многозональные снимки среднего разрешения получают сканером МСУ-СМ в зонах 0,5—0,7 и 0,7—1,0 мкм с разрешением 500 м и охватом 2240 км, а снимки высокого разрешения (ПЗС-снимки) — системой МСУ-Э в трех зонах (0,5—0,6; 0,6—0,7; 0,8—0,9 мкм) с разрешением 35 м и охватом 80 км.

Снимки с ресурсных спутников архивируются и распространяются НПО «Планета», Научным центром оперативного мониторинга Земли Росавиакосмоса, коммерческой фирмой СканЭкс, создавшей электронный каталог снимков в Интернете; их принимают локальные персональные станции приема изображений, а также европейские станции в Кируне и Фучино.

Сканерные снимки получают не только с ресурсных спутников, ориентированных в основном на изучение суши, но и с *океанологических спутников*, выполняющих съемку в оптическом и радиодиапазоне. Со спутников *Океан-О*, например, получают снимки многозональными системами МСУ-М с разрешением около 2 км при охвате около 2000 км, МСУ-СК с разрешением 150 м при охвате 600 км и МСУ-В с разрешением 50 м при охвате 200 км. Многозональная сканирующая система исследования цвета вод океана SeaWIFS, используемая на спутниках США *SeaStar*, дает снимки в восьми зонах видимого диапазона с разрешением 1 км при охвате 1500 км, а в режиме глобального покрытия с разрешением 4,5 км при охвате 2800 км.

Таким образом, фонд сканерных снимков очень велик, постоянно совершенствуется и пополняется. Главные его составляющие — снимки с метеорологических спутников, которые в последние десятилетия, с использованием многозональной съемки, выполняют роль спутников контроля за состоянием окружающей среды, и снимки с ресурсных спутников, теперь многократно покрывших съемками Землю; при растущем качестве изображений они все более полно удовлетворяют решение задач тематического картографирования, исследования природных ресурсов, контроля за хозяйственной деятельностью и экологического мониторинга.

#### 4.1.3. ПЗС-снимки

Снимки, получаемые с помощью многоэлементных линейных приемников излучения на основе приборов с зарядовой связью, характеризующиеся высоким разрешением при оперативной передаче изображений в цифровой форме по радиоканалам, начали поступать с 80-х гг. XX в., и теперь этот метод съемки стал основным для получения снимков очень высокого разрешения, составив реальную конкуренцию фотографической съемке.



Снимки этого типа из космоса впервые получены в 1980 г. с помощью экспериментальной системы МСУ-Э на спутнике *Метеор-30*, работавшем по программе «Метеор— Природа». С 1988 г. их получают с эксплуатационных спутников *Ресурс-О* (эти снимки охарактеризованы в разд. 4.1.2).

**Снимки с французского спутника SPOT.** Регулярное формирование фонда снимков такого типа с высоким разрешением (10 м), превзошедшим на то время разрешение всех остальных видов оперативной информации, началось с 1986 г. с запуском французского спутника *SPOT*. С субполярной солнечно-синхронной орбиты высотой 800 км, обеспечивающей повторяемость съемки через 26 сут, с помощью съемочной системы HRV (High Resolution Visible), где приемником излучения служит линейка ПЗС, включающая 6 тыс. элементов и обеспечивающая полосу охвата шириной 60 км, получают панхроматические снимки с разрешением 10 м или многозональные в трех зонах видимой и ближней инфракрасной части спектра с разрешением 20 м (цв. вкл. П, 12). Для расширения полосы охвата используются два устройства HRV. С помощью системы зеркал полоса съемки может перемещаться на 400 км в сторону от трассы спутника (см. рис. 1.6), что обеспечивает получение стереоснимков с соседних витков и повторяемость съемки через 1—4 дня.

Характеристики снимков со спутников *SPOT* совершенствуются. На спутнике *SPOT-4*, который работает с 1997 г., в камере HRV добавлен инфракрасный канал, что отражено в ее названии HRVIR. Снимки в четырех зонах имеют разрешение 20 м, либо при съемке в одной из них — красной — разрешение 10 м. Кроме детальных, с этого спутника начали получать обзорные снимки 4-канальной сканирующей системой Vegetation с разрешением 1,15 км и охватом 2200 км, спектральные каналы которой соответствуют каналам HRVIR, за исключением первого, смещенного в голубую зону (табл. 4.4). Эти снимки обеспечивают мониторинг растительности, получение карт вегетационного индекса по аналогии с AVHRR/NOAA и карт цветового индекса вод океана для мониторинга фитопланктона по аналогии с CZCS/*Nimbus*. По снимкам Vegetation за 2001 г. создана глобальная карта земных покровов GLC-2000 (Global Land Cover).

Дальнейшее совершенствование снимков реализовано с 2002 г. при работе спутника *SPOT-5*, где два устройства HRG (High Resolution Geometric) дают снимки охватом 60 км с разрешением многозональных снимков 10 м (в средней инфракрасной зоне 20 м) и панхроматических — 5 м (при обработке возможно программное увеличение его до 2,5 м). С помощью устройства HRS (High Resolution Stereoscopic) получают конвергентные стереоснимки с отклонением съемочных осей двух объективов (съемка «вперед — назад») с разрешением 10 м при охвате 120 км. Продолжается получение снимков системой Vegetation.

Характеристика снимков со спутников *SPOT*

Спутник	Съемочная система	Спектральные зоны съемки, мкм	Разрешение, м	Ширина полосы обзора, км	Обычно используемый масштаб
<i>SPOT-1—3</i>	HRV	0,51—0,75; 0,50—0,59; 0,61—0,68; 0,79—0,89	10 20	60	1 : 100 000
<i>SPOT-4</i>	HRVIR	0,61—0,68; 0,50—0,59; 0,61—0,68; 0,79—0,89; 1,58—1,75	10 20	60	1 : 100 000
	Vegetation	0,43—0,47; 0,61—0,68; 0,79—0,89; 1,58—1,75	1150	2200	1 : 10 000 000
<i>SPOT-5</i>	HRG	0,49—0,69; 0,49—0,61; 0,61—0,68; 0,78—0,89; 1,58—1,75	5 (2,5) 10 20	60	1 : 100 000
	Vegetation	0,43—0,47; 0,61—0,68; 0,78—0,89; 1,58—1,75	1000	2250	1 : 10 000 000

До распределения потребителям снимки проходят предварительную обработку в центре приема и обработки снимков в Тулузе. Предусматриваются три уровня обработки — с точностью привязки 2 км, 50 и 10 м. Разработчики системы предполагали, что уже снимки со спутников *SPOT-1—3* обеспечат задачи топографического картографирования: составление карт в масштабе 1 : 100 000, обновление карт в масштабе 1 : 50 000 и создание фотокарт в масштабе 1 : 25 000. Две последние задачи успешно решаются, но полностью автоматическое создание топографических карт по этим снимкам все же не удавалось. Снимки *SPOT-5* отвечают требованиям создания топографических карт в масштабе 1 : 25 000. В первый же год работы спутника, впервые передававшего по радиоканалам изображения высокого разрешения, с него были получены снимки всех столиц мира. К 2002 г., за 16 лет работы спутников *SPOT*, было получено 10 млн снимков.

Снимки со спутников *SPOT* в течение десятилетия, до середины 90-х гг. XX в., были лучшими по разрешению оперативно получаемыми снимками. Наряду со снимками ТМ/*Landsat* они представляют наиболее широко используемые за рубежом материалы. Вместе с тем значительная дороговизна снимков и их обработки сдерживают применение этих материалов в развивающихся странах, где необходимость в них для решения задач топографического и крупномасштабного тематического картографирования особенно велика. Это стимулировало разработку в развивающихся странах собственных космических съемочных систем.

**Снимки с индийского спутника *IRS*.** В середине 90-х гг. XX в. новый скачок в повышении разрешения передаваемых по радиоканалам снимков сделан при работе индийских спутников *IRS* (Indian Remote Sensing Satellite System). Со спутников этой системы, которые с 1988 г. выводятся на солнечно-синхронные орбиты высотой 900 км с повторяемостью съемки 22 дня, предусматривается получение снимков аппаратурой разного охвата и разрешения, параметры которой постоянно совершенствуются (табл. 4.5). Так, оптико-электронные камеры с линейными ПЗС-приемниками LISS вначале давали снимки с разрешением 72 м (при охвате 148 км), которое с 1996 г. повышено до 23 м, а на девятом спутнике должно составить 10 м (при охвате 40 км). Но наибольшую известность

Таблица 4.5

**Характеристика снимков со спутников *IRS***

Номер спутника	Съемочная система	Спектральные зоны съемки, мкм	Разрешение, м	Ширина полосы обзора, км
1, 2 (1A, 1B)	LISS-1	0,4—0,5; 0,5—0,6; 0,6—0,7; 0,7—0,8	72	148
1, 2 (1A, 1B)	LISS-2	0,4—0,5; 0,5—0,6; 0,6—0,7; 0,7—0,8	36	74
3, 4, 8 (1C, 1D, P4)	LISS-3	0,5—0,6; 0,6—0,7; 0,7—0,8 1,5—1,7	23 70	142
9 (P5)	LISS-4	Вид., бл. ИК, ср. ИК	10	40
3, 4 (1C, 1D)	PAN	0,5—0,75	5,8	70
10 (P6)	HR PAN	Вид.	2,5	10
3, 4, 7, 8, 9 (1C, 1D, P3, P4, P5)	WiFS	0,62—0,68; 0,77—0,86	188	774

получили снимки панхроматической камерой PAN, установленной на 3-м и 4-м спутниках (IRS 1C, IRS 1D), запущенных в 1996 и 1997 гг. Эти снимки имеют разрешение 5,8 м при охвате 70 км. На десятом спутнике предусмотрено получение снимков усовершенствованной камерой HR PAN (High Resolution PAN) с разрешением 2,5 м при охвате 10 км. Со спутников этой серии получают также обзорные снимки широкоугольной камерой WIFS (Wide Field Sensor) в 2—3 зонах с разрешением 120—180 м при охвате 700—800 км, аналогичной сканирующей системе МСУ-С на российских ресурсных спутниках.

Результаты съемки камерой PAN вывели снимки, получаемые при оптико-электронном сканировании с использованием линейных ПЗС-приемников, на уровень разрешения фотографических снимков. Снимки LISS и PAN получили мировое признание; наряду с национальными, их фонд формируют такие фирмы, как Space Imaging. В нашей стране снимки *IRS* принимает и распространяет Инженерно-технологический центр СканЭкс.

**Снимки со спутников других стран.** Во второй половине 90-х гг. XX в. мировой фонд космических снимков стал пополняться из новых источников: с середины 80-х — с космических аппаратов Франции, в середине 90-х — Индии и Японии, а к концу 90-х годов насчитывалось уже около 20 стран, подготавливавших или запускавших спутники и получавших космические снимки (рис. 4.1, 4.2). Этому способствовало создание малых спутников, быстрее разрабатываемых, более экономичных в изготовлении и запусках.

В 1996—1997 гг. японский ресурсный спутник *ADEOS* (Advanced Earth Observation Satellite) давал снимки, по характеристикам превысившие SPOT, в течение десятилетия державший первенство среди оперативных космических систем. Снимки сканирующим радиометром AVNIR (Advanced Visible and Near Infrared Radiometer) в пяти каналах видимой и ближней инфракрасной



Рис. 4.1. Страны мира, разрабатывавшие или запускавшие спутники к 2000 г. (выделены темным фоном)

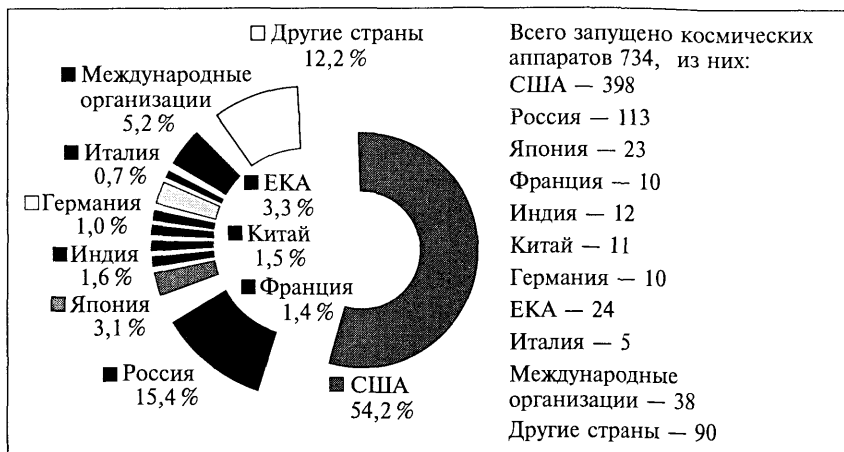


Рис. 4.2. Участие стран в мировой орбитальной группировке космических аппаратов разных типов (данные на 2000 г.)

части спектра имели разрешение 16 м, а в режиме панхроматической съемки — 8 м. Сравнительно небольшой охват 80 км компенсирован возможностью расширения полосы съемки при отклонении съемочной оси поперек трассы до 40°. Другая съемочная система этого спутника — 12-канальный сканер OCTS (Ocean Color and Temperature Scanner) — преследовала цель перехода к гиперспектральной съемке, которая будет рассмотрена ниже. Как и в других японских программах, здесь сочетаются задачи картографирования земной поверхности по снимкам высокого разрешения с океанологическими задачами, допускающими меньшую детальность, но требующими использования разных спектральных диапазонов.

С 1998 г. по совместной китайско-бразильской программе стали поступать снимки со спутников *CBERS* (China-Brasil Earth Resources Satellite System) с разрешением панхроматических снимков 10 м, а многозональных в трех каналах видимого диапазона 20 м и в ближнем инфракрасном канале 80 м при охвате 115 км. С этих спутников получают также обзорные снимки среднего разрешения системой *WFI* (Wide Field Imager). Цель программы — обеспечить недорогие снимки высокого и среднего разрешения в расчете на распространение в развивающихся странах и конкуренцию со снимками *SPOT* и *Landsat*.

С 1999 г. стали формироваться национальные фонды снимков с Южно-Корейских малых спутников *Kitsat-3* (многозональные снимки с разрешением 15 м) и *Kompsat* (панхроматические снимки с разрешением 10 м при возможности отклонения оптической оси для стереосъемки). С 2000 г. с китайского спутника *Zi Yuan-2* (Цзы

Юань — земные ресурсы) поступают снимки с разрешением 5 м. Съемка высокого разрешения с малых спутников предусмотрена и в программах таких стран, как Германия, Великобритания. Так, в 1999 г. с английского спутника *UOSAT-12* начали получать панхроматические снимки с разрешением 10 м и многозональные с разрешением 32 м. Таким образом конец XX в. ознаменовался массовым поступлением снимков с разрешением 10 м и выше при расширении круга космических держав.

**Снимки сверхвысокого разрешения с американского спутника *Ikonos* и других спутников.** Значительным событием в дальнейшем повышении детальности снимков мирового фонда, доступного гражданским потребителям, оказалось получение при оперативной съемке космических снимков с субметровым разрешением, достигнутым с запуском в 1999 г. американского коммерческого спутника *Ikonos*. Панхроматические снимки с этого спутника имеют разрешение 0,8 м, а многозональные в трех каналах видимой и ближней инфракрасной части спектра — разрешение 4 м при охвате 11 км (цв. вкл. II, 13). Возможность отклонения оптической оси до 45° вдоль и поперек трассы используется для прицельной съемки объектов, не находящихся в полосе трассы съемки, или для конвергентной стереосъемки. Хотя время съемки составляет всего до 100 мин в сутки, фонд этих снимков быстро растет. Заявки на съемку превышают возможности спутника, в основном это контракты с государственными службами США, Индонезии, Индии, Японии, Южной Америки, Африки. По результатам обработки снимков фирма Space Imaging выпускает несколько видов продукции с различной детальностью и точностью — от трансформированных изображений масштаба 1 : 100 000, полученных при съемке с отклонением оптической оси, с привязкой снимков с точностью 50 м (Geo) до ортотрансформированных (с использованием для устранения искажений из-за рельефа имеющейся модели рельефа и опорных точек) в масштабе до 1 : 2400 с точностью привязки 2 м (Precision Plus). Реализация программы рассчитана на 10 лет.

С выполнением съемки со спутника *Ikonos* оперативные космические снимки превзошли по разрешению доступные потребителю материалы фотографической съемки из космоса. Однако *Ikonos* не долго оставался единственным спутником, обеспечивавшим такой тип снимков. Уже в 2000 г. в Израиле был запущен коммерческий спутник *EROS*, передававший снимки с разрешением 1,8 м, при обработке которых с помощью специальных программ получают изображения с размером пиксела 1 м. Индийский спутник *TES* (Test Evaluation Satellite), запущенный в 2001 г., также дает снимки с разрешением 1 м. Таким образом, растет число спутников, способных получать снимки метрового разрешения.

В 2001 г. произошло событие, ознаменовавшее новый этап в космической съемке, которая вышла на рубеж полуметрового раз-

решения. Запущен американский спутник *Quick Bird-2*, с которого получают панхроматические снимки с разрешением 0,6 м, а многозональные — 2,4 м при охвате 16,5 км. Предусмотрена возможность перенацеливания при наклоне оптической оси съемки до 30° и стереосъемки с отклонением оптической оси до 45°.

Рубеж веков отмечен выполнением программ по разработке специальных картографических спутников: японского *ALOS* (Advanced Land Observation Satellite) — стереосъемка с разрешением 2,5 м, индийского *Cartosat* (разрешение на первом спутнике этой серии 2,5 м, на втором — 1 м). Среди отечественных — съемочные системы высокого разрешения *Ресурс-ДК* (2 м), *Монитор-Э* (8 м).

На спутнике *ALOS* получение стереопар снимков высокого разрешения обеспечивается системой *PRISM* (Panchromatic Remote Sensing Instrument for Stereomapping), имеющей три объектива для съемки в надир и с отклонением оптической оси на 24° вперед и назад по маршруту. С ее помощью получают триплет строчных снимков с разрешением 2,5 м и охватом 35 км (при съемке в надир — 70 км), предназначенных для стереообработки и измерения высот с точностью 2,5 м. В дополнение к этому ведутся многозональная съемка сканирующим радиометром *AVNIR-2* в четырех зонах видимого и ближнего инфракрасного диапазона с охватом 70 км и разрешением 10 м, а также радиолокационная съемка с тем же охватом и разрешением.

В результате совершенствования технологий оптико-электронной съемки, использования малых космических аппаратов и подключения к космическим исследованиям ряда стран детальная ПЗС-съемка становится обычным явлением. Например, в 2002 г. 17 спутников одновременно вели съемку с разрешением выше 20 м.

## 4.2. Снимки в тепловом инфракрасном диапазоне

Фонд тепловых инфракрасных снимков накапливается с 60-х гг. XX в., с начала работы метеорологических спутников, на которых такая съемка выполнялась для получения изображения облачности на затененной стороне Земли или в условиях полярной ночи. Этот факт отражен уже в названии первого метеоспутника *TIROS* (Television and Infrared Observation Satellite). Но поскольку разрешение снимков с метеоспутников обычно недостаточно для изучения деталей земной поверхности, тепловые снимки с более высоким разрешением получают также с ресурсных спутников.

Тепловые инфракрасные снимки с современных отечественных и зарубежных метеоспутников, работающих на околоземных орбитах, имеют такое же пространственное разрешение, что и снимки в видимом диапазоне, — 1 км и температурное 0,1—0,2°.

С метеоспутников на удаленных геостационарных орбитах получают снимки в тепловом инфракрасном диапазоне с разрешением 2—5 км.

На тепловых инфракрасных снимках с метеоспутников находит отображение поверхностная тепловая структура океанов, в которой проявляется («визуализируется») динамика вод, крупные течения. Так, на снимке Атлантического океана (цв. вкл. II, 14) хорошо видны границы и структура течения Гольфстрим, сопровождаемого кольцевыми вихрями — рингами. На тепловых снимках с метеоспутников отображаются и некоторые объекты поверхности суши, например «тепловые острова» крупных городов и промышленных центров, в разной степени увлажненные почвы.

В фондах снимков, например в центрах данных НАСА, информация тепловой съемки хранится и предлагается потребителям уже в виде изготовленных карт температур морской поверхности SST (Sea Surface Temperature). По снимкам AVHRR с начала 80-х гг. XX в. составляются такие региональные и глобальные карты дневных и ночных, суточных, осредненных за неделю, месяц, температур морской поверхности с разным пространственным обобщением (с разрешением 9, 18, 54 км) (цв. вкл. II, 15), используемые для изучения их многолетней динамики с целью создания прогнозных моделей.

Тепловые снимки получают и с океанологических спутников; со временем растет их разрешение и увеличивается число спектральных каналов съемки. Так, первый океанологический спутник *Seasat* (1978) давал тепловые инфракрасные снимки с разрешением 7 км, *Космос-1500* (1983) с разрешением 1—2 км. Сканирующий радиометр ATSR (Along Track Scanning Radiometer) европейского океанологического спутника *ERS* с 1991 г. обеспечивал снимки в четырех каналах ближнего и теплового инфракрасного диапазона с разрешением 1 км при охвате 600 км, а 12-канальный сканер OCTS (Ocean Color and Temperature Scanner) японского ресурсно-океанологического спутника *ADEOS* (1996) — снимки в трех каналах теплового инфракрасного диапазона с разрешением 0,7 км при охвате 1400 км. Разрешение около 1 км оказывается вполне достаточным для решения океанологических задач. Выполнение съемки в нескольких зонах теплового диапазона реализуется все чаще. Так, запущенный в 2001 г. американский малый спутник *MTI* (Multispectral Thermal Imager) давал снимки в трех зонах видимого и 12 зонах теплового инфракрасного диапазона. Это увеличивает возможности исследования земных объектов — изучения состава пород, обнаружения пораженных болезнями участков посевов сельскохозяйственных культур. Тепловой инфракрасный спектральный индекс TISI оценивается как еще более надежный индикатор состояния растительности, чем вегетационный индекс VI.



Однако для изучения деталей земной поверхности требуется более высокое разрешение снимков. Оно реализуется при съемке с ресурсных спутников. С 1978 г. такие снимки начали получать со спутника *Landsat-3*, дополнив сканирующую систему MSS тепловым каналом 10,4—12,8 мкм с разрешением 240 м; с 1982 г. система ТМ/*Landsat-4* стала давать снимки в том же канале с разрешением 120 м, а с 1999 г. система ЕТМ+/*Landsat-7* — с разрешением 60 м, приблизив, таким образом, снимки в тепловом диапазоне по разрешению к снимкам в видимом диапазоне. На отечественных ресурсных спутниках *Ресурс-О* сканирующая система МСУ-СК имеет тепловой канал, обеспечивающий обзорные тепловые снимки с разрешением 600 м. Поскольку тепловая съемка с современных ресурсных спутников выполняется в дополнение к съемке в видимом и ближнем инфракрасном диапазоне едиными многозональными съемочными системами, то и фонды таких снимков практически не разделены.

### 4.3. Гиперспектральные снимки в оптическом диапазоне

Многозональные снимки как в видимом так и в тепловом инфракрасном диапазоне получают системами, имеющими достаточно широкие зоны съемки, преимущественно 100 нм. При небольшом числе съемочных каналов это в целом устраивало потребителя для решения задач, связанных с картографированием.

Осознание в конце XX в. глобальных экологических проблем, необходимости комплексного изучения планеты Земля как системы, побудило использовать так называемую гиперспектральную съемку с большим числом узких съемочных зон в расчете на то, что такие снимки помогут решать весь комплекс задач изучения Земли, связанных с контролем ее экологического состояния. Например, такие снимки получали в 1999—2000 гг. со спутников США *EO-1* с помощью гиперспектральной системы Hyperion с 222 спектральными каналами. Гиперспектральные системы с более чем 10 каналами с 2000 г. существенно пополнили фонд снимков в связи с выполнением программы EOS, рассчитанной на длительное наблюдение за экологическим состоянием Земли. С первого спутника, работавшего по этой программе — *Terra* — получены гиперспектральные снимки системами MODIS и ASTER, которые приобрели широкую известность благодаря свободному распространению по сети Интернет.

Сканирующий радиометр среднего разрешения MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) с охватом полосы обзора 2300 км, т. е. практически ежедневным глобальным повторением съемки, работает в 36 каналах в диапазоне с длинами волн от

0,4 до 14,4 мкм (табл. 4.6, рис. 4.3). В двух каналах в видимой и ближней инфракрасной части спектра получают снимки с разрешением 250 м, в пяти каналах видимой, ближней и средней инф-

Таблица 4.6

**Зоны съемки системой MODIS со спутника EOS AM-1 (Terra)**

Группа зон	Номер зоны	Длина волны, мкм	Объект исследования
Разрешение 250 м			
А	1	0,62—0,67	Контуры облаков и земных объектов
	2	0,841—0,876	
Разрешение 500 м			
Б	3	0,459—0,479	Свойства облаков и земных объектов
	4	0,545—0,565	
	5	1,23—1,25	
	6	1,628—1,652	
	7	2,105—2,155	
Разрешение 1000 м			
В	8	0,405—0,42	Цвет, фитопланктон и биогеохимия океана
	9	0,438—0,448	
	10	0,483—0,493	
	11	0,526—0,536	
	12	0,546—0,556	
	11	0,526—0,536	
	12	0,546—0,556	
	13	0,662—0,672	
	14	0,673—0,683	
	15	0,743—0,753	
16	0,862—0,877		
Г	17	0,89—0,92	Водяной пар
	18	0,931—0,941	
	19	0,915—0,965	
Е	20	3,66—3,84	Температура облаков и поверхности Земли
	21	3,929—3,989	
	22	3,929—3,989	
	23	4,02—4,08	
Ж	24	4,433—4,498	Температура воздуха
	25	4,482—4,549	
Д	26	1,36—1,39	Перистые облака

Группа зон	Номер зоны	Длина волны, мкм	Объект исследования
З	27	6,535—6,895	Водяной пар
	28	7,175—7,475	
	29	8,4—8,7	
И	30	9,58—9,88	Озоновый слой
К	31	10,78—11,28	Температура облаков и поверхности Земли
	32	11,77—12,27	
Л	33	13,185—13,485	Высота верхней границы облаков
	34	13,485—13,785	
	35	13,785—14,085	
	36	14,085—14,385	

ракрасной частей спектра — с разрешением 500 м, в остальных — 1000 м. Весь набор съемочных каналов MODIS позволяет заменить им данные нескольких прежде работавших съемочных систем различного назначения, например, CZCS/SeaWIFS и AVHRR/NOAA, с дополнением новыми каналами в тепловом диапазоне. Это способствует комплексированию исследований, выполнению одной системой разнообразных задач, многофункциональности системы.

Увеличение числа каналов сопровождается повышением спектрального разрешения, т.е. использованием узких спектральных зон, шириной до 10 нм вместо традиционных 100 нм. Это дает

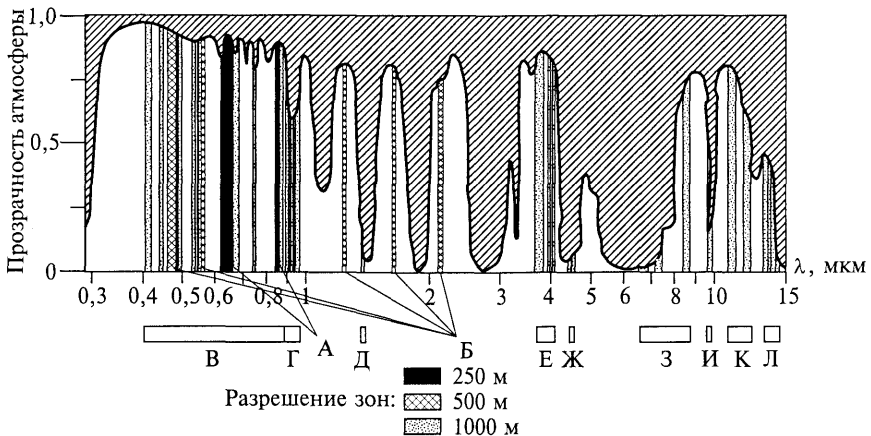
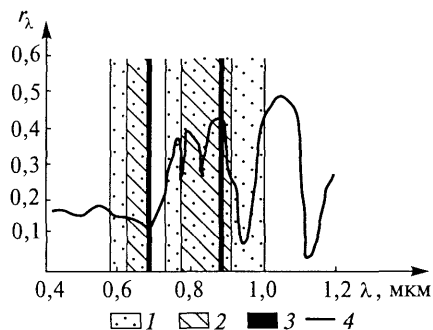


Рис. 4.3. Спектральные зоны съемки гиперспектральной системы MODIS (характеристика групп зон, обозначенных буквенными индексами, дана в табл. 4.6)

Рис. 4.4. Спектральные зоны съемки сканирующих систем AVHRR (1), ETM+ (2) и MODIS (3), используемые для определения вегетационного индекса, и детальная кривая спектральной отражательной способности одного из видов вегетирующей растительности (4)



возможность вести наблюдение в полосах поглощения хлорофилла, воды и других важных компонентов, повышает достоверность определения объектов съемки и их состояния по спектральным признакам. В качестве примера преимуществ такого повышения спектрального разрешения может служить расчет вегетационного индекса по данным AVHRR и MODIS (рис. 4.4). Широкий инфракрасный канал радиометра AVHRR охватывал не только область «инфракрасного плато» на кривой спектральной яркости растительности, но и полосы поглощения водяного пара и  $O_2$ , что снижало коэффициенты отражения растительности в этом канале и делало их зависимыми от содержания воды в атмосфере. Более узкий инфракрасный канал MODIS приходится точно на «инфракрасное плато» и данные теперь не зависят от состояния атмосферы.

По данным MODIS/*Terra*, в качестве одного из видов их обработки регулярно создаются глобальные карты типов земных покровов с выделением 17 классов, 11 из которых характеризуют растительность. Для отображения сезонного состояния растительности производится осреднение данных за 3 месяца. После накопления этих данных за 2 года работы спутника предполагается использование новых материалов съемки для изучения динамики земных покровов.

Другая гиперспектральная съемочная система на том же спутнике — 14-канальный радиометр ASTER (Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer). Он предназначен для менее обзорной (60 км), но более детальной съемки: три канала в видимом и ближнем инфракрасном диапазоне обеспечивают изображение с разрешением 15 м (при ширине каналов 6—10 нм), шесть каналов в среднем инфракрасном диапазоне — с разрешением 30 м и пять каналов в тепловом инфракрасном — с разрешением 90 м (табл. 4.7). Снимки ASTER, в первый год работы спутника *Terra* (2000 г.) свободно распространявшиеся через Интернет, особенно детальные снимки в видимом диапазоне, пользовались большим спросом и нашли применение во всех областях географических исследований, на первых порах, правда, как тра-

**Характеристика снимков системой ASTER  
со спутника EOS AM-1 (Terra)**

Съёмочная система	Спектральные зоны съёмки, мкм	Разрешение, м	Ширина полосы обзора, км
VNIR	0,52—0,60; 0,63—0,69; 0,76—0,86	15	60
SWIR	1,60—1,70; 2,145—2,185; 2,185—2,225; 2,235—2,285; 2,295—2,365; 2,36—2,43	30	60
TIR	8,125—8,475; 8,475—8,825; 8,925—9,275; 10,25—10,95; 10,95—11,65	90	60

традиционные многозональные материалы, без использования всей информации «гиперспектрального куба» (см. цв. вкл. I, 3). Кроме гиперспектральной, на спутнике *Terra* были опробованы и другие новые виды съёмки, например, многокурсовая, с помощью системы MISR (Multiangle Imaging SpectroRadiometer), выполняющей съёмку веерного типа девятью камерами с разными углами наклона оптической оси, для исследования аэрозолей и использования анизотропности индикатрисы отражения при дешифрировании некоторых объектов (см. цв. вкл. I, 2).

Круг задач, для решения которых поставляют информацию гиперспектральные системы, охватывает атмосферу, океан и сушу. Исследования атмосферы включают определение толщины облаков, типов облачности в зависимости от состава (кристаллы льда, снега, капли воды), измерение концентрации водяного пара во всем столбе воздуха под спутником, определение содержания аэрозолей, эмиссии вулканических газов, пылевых бурь. При исследованиях океана, кроме традиционного определения температур водной поверхности, столь важного для изучения морских течений и рыбопромыслового прогнозирования, открываются новые возможности мониторинга первичной продуктивности океана, концентрации фитопланктона и хлорофилла, а также флуоресценции хлорофилла, свидетельствующей об остановке фотосинтеза, т.е. о состоянии водорослей. При изучении морских льдов определение их температур позволяет судить о мощности и возрасте льдов.

В исследованиях суши появляются более совершенные методы изучения распределения растительности и ее состояния, первичной продуктивности, количественных оценок биомассы растительности с использованием производных изображений на основе расчета различных индексов: NDVI — вегетационного индекса,

LAI — индекса листового покрытия, FPAR — индекса части радиации, поглощенной при фотосинтезе (фотосинтетически активной радиации). Сочетание съемки в видимом, среднем и тепловом инфракрасном диапазонах увеличивает возможности мониторинга лесных пожаров. Система обработки данных предусматривает изготовление по специальным алгоритмам глобальных и региональных карт LAI, NDVI, FPAR, толщины облаков и их типа, высоты и температуры верхней границы облачности, снежного покрова и морских льдов, температур поверхности суши и моря, концентрации хлорофилла, флюоресценции хлорофилла и др.

С 2001 г. получение снимков системой MODIS продолжено со второго спутника по программе EOS — *Aqua*. По завершении их работы такие снимки с 2006 г. предполагается принимать с разрабатываемых спутников США *NPOESS* (National Polar-Orbiting Operational Environmental Satellite System). Кроме того, близкие по характеристикам снимки с 2002 г. поступают с японского ресурсно-океанологического спутника *ADEOS-2*, который в ряду других задач начал 15-летнюю программу наблюдения глобальных изменений *GCOM* (Global Change Observation Mission) 36-зональной съемочной системой *GLI* (Global Imager) в видимом, ближнем, среднем и тепловом инфракрасном диапазонах от 0,375 до 12,5 мкм при ширине каналов 10 нм и разрешении 250 м—1 км с целью определения геофизических параметров для моделей глобальных изменений в связи с проблемой потепления климата.

Гиперспектральная съемка используется и в других программах. Например, на европейском ресурсно-океанологическом спутнике *Envisat*, который сменил работавшие в 90-х гг. XX в. спутники *ERS*, наряду с радиолокационной съемкой предусмотрена 15-зональная система *MERIS*, дающая снимки в видимом и ближнем инфракрасном диапазонах от 0,40 до 1,05 мкм с разрешением 300—1200 м, что позволяет решать задачи мониторинга концентрации фитопланктона, биомассы растительности, температур поверхности воды и суши.

Таким образом, переход к гиперспектральной съемке становится не единичным, а типичным явлением. При исследовании антропогенного воздействия на природу, решении экологических задач наибольший интерес могут представлять изготавливаемые по материалам такой съемки различные виды производной геовидеопродукции, с помощью которых изучают состояние растительности — NDVI, LAI, FPAR, поскольку именно растительность является индикатором состояния природной среды, ее загрязнения.

Особый интерес представляет также сочетание видимой, средней и тепловой инфракрасной зон для контроля за лесными и торфяными пожарами, факелами сжигания нефти и газа. Значительная часть съемочных зон (например, 17 из 36 каналов MODIS)

предназначена для исследований атмосферы, в том числе ее загрязнения — содержания в ней аэрозолей и водяного пара, а один из каналов специально предназначен для контроля за состоянием озонового слоя. Таким образом, экологический аспект гиперспектральной съемки очевиден.

Для обработки гиперспектральных снимков сейчас разрабатывается программное обеспечение и существенную роль играют библиотеки спектральных данных, имеющиеся в Интернете. Однако при использовании гиперспектральных снимков пользователь чаще обращается не к первичным материалам съемки, а к созданным по ним вторичным видам продукции. Для снимков MODIS, например, готовят около 50 видов производных глобальных геоизображений, представляющих собой в основном результаты визуализации различных индексов, с различной степенью пространственного обобщения и временного осреднения, которые архивируются и предлагаются потребителю. Их изготовлением занимаются специализированные тематические центры данных, сеть которых создана, например, НАСА в связи с выполнением программы EOS и которые таким образом реализуют новый тип центров распространения космической информации, максимально удовлетворяющих запросы потребителя.

#### 4.4. Снимки в радиодиапазоне

Снимки в радиодиапазоне распространены и практически используются не так широко, как снимки в оптическом диапазоне, но в последнее десятилетие XX в. их фонд значительно вырос, а экспериментальное применение вышло на первый план. При этом фонд снимков, поступивших при пассивном методе съемки — **микроволновых радиометрических**, — остается очень скромным, и ограничивается пока материалами съемки со спутников *Nimbus-5—7*, полученными в 1973—1986 гг. системой SMMR (Scanning Multichannel Microwave Radiometer) с очень низким разрешением — 25 км (*Nimbus-5*, 6) и 12 км (*Nimbus-7*).

В последующие годы накопление материалов съемки продолжалось с американских военных метеоспутников *DMSP* (Defence Meteorological Satellite Program), но их разрешение было еще ниже — 50 и 25 км. Такое разрешение ограничивает применение этих снимков в исследованиях земной поверхности, где этот метод съемки перспективен для изучения влажности и солености почв, толщины и влагосодержания снежного покрова. Тем не менее с этих спутников впервые получена картина распространения многолетних и однолетних льдов в масштабе полушария (цв. вкл. II, 16) и ее изменений за длительный период, что представляет определенный интерес в связи с проблемой глобального потепления климата.

Материалы съемок в виде фотокарт морских льдов и снежного покрова регулярно предлагаются потребителю, например Национальным центром гляциологических данных США. Ведется разработка алгоритмов расчета содержания воды в снежном покрове по материалам такой съемки. Ожидается получение микроволновых радиометрических снимков с разрешением 7—8 км с европейского метеоспутника *МЕТОР* (Meteorology Operational Programme), который должен сменить спутники *NOAA*. Разрабатывается много-частотный сканирующий микроволновой радиометр *MIMR* (Multi-frequency Imager Microwave Radiometer) с пространственным разрешением от 5 до 60 км, с помощью которого планируется реализовать многозональную съемку в радиодиапазоне. Специально для исследований влажности почв и солености океана на основе микроволнового зондирования разрабатывается европейский спутник *SMOS* (Soil Moisture and Ocean Salinity). Дальнейшее совершенствование аппаратуры и повышение разрешения снимков должно расширить круг решаемых по ним задач.

**Радиолокационные снимки**, получаемые при активном методе съемки, начали поступать из космоса лишь в конце 70-х гг. XX в., хотя аэроснимки такого типа прежде использовались, например, при геологическом изучении гор северо-востока нашей страны, топографическом картографировании бассейна Амазонки. Первые радиолокационные снимки из космоса получены в 1978 г. с американского океанологического спутника *Seasat* радаром с синтезированной апертурой *SAR* (Synthetic Aperture Radar), работавшим в *L*-диапазоне и дававшим изображение полосы шириной около 100 км с разрешением 25 м. Съемка океана была предназначена для изучения волнения, нефтяного загрязнения вод, морских льдов. Благодаря высокому разрешению на снимках нашли отображение также многие черты земной поверхности, и оказалось возможным их применение в геологических, сельскохозяйственных и других видах исследований.

В 80-х гг. XX в. радиолокационные снимки получали эпизодически. В 1981 г. на возвращаемом корабле *Shuttle* работал радиолокатор также в *L*-диапазоне, дававший изображения с разрешением 40 м при полосе охвата 50 км. В 1983 г. близкие по параметрам снимки получены при работе европейской орбитальной станции *Spacelab*, вышедшей на орбиту возвращаемым кораблем *Shuttle*. Это были непродолжительные 1—2-недельные полеты. Тем не менее в них получены интересные материалы, в частности снимки подземного русла Нила в песках Сахары; издан атлас радиолокационных снимков.

С 1983 г. российский океанологический спутник *Космос-1500* вел наряду со съемкой аппаратурой *МСУ-М* в видимом диапазоне и радиолокационную съемку с разрешением 1—2 км (радиолокатором с реальной антенной) в основном с целью ледовой разведки.



Обильное и регулярное пополнение фонда радиолокационных снимков происходило в 90-х гг. XX в., которые можно считать годами «радиолокационного бума», когда такую съемку вели одновременно несколько специализированных спутников разных стран: российский *Алмаз*; европейские *ERS-1, 2* (European Remote Sensing Satellite); японский *JERS* (Japanese Earth Resources Satellite); канадский *Radarsat*; продолжались эксперименты с кораблей *Shuttle*.

В 1987 г. запущен экспериментальный, а с 1991 г. работал оперативный спутник *Алмаз*. Радиолокатором *X*-диапазона получены снимки с разрешением 15—25 м при охвате 20—40 км. Они используются геологами, опробуются в интересах лесного хозяйства.

С 1991 г. началось поступление снимков с европейского ресурсно-океанологического спутника *ERS-1*, продолженное в 1995 г. со спутника *ERS-2*. Радиолокатор с синтезированной апертурой, работающий в *C*-диапазоне, дает снимки с разрешением 30 м при охвате около 100 км (цв. вкл. II, 17). Предусмотрена также съемка в режиме радиоальтиметра (для точного определения высот, в частности уточнения фигуры морского геоида), скаттерометра (для определения характеристик волнения и приповерхностных ветров). Прием информации с этих спутников вели 25 станций, а обработку — специальные центры в Германии, Италии, Франции, Великобритании. Снимки применяются в широком спектре направлений исследований океана и земной поверхности. Одновременная работа двух спутников *ERS* облегчила получение пар снимков для радиоинтерферометрической обработки (см. разд. 3.3). Разновременные интерферограммы позволяют с точностью до сантиметров фиксировать изменения высоты поверхности, что дало возможность гляциологам определять величину таяния на ледниковых шапках, скорости движения льдов в Антарктиде, сейсмологам фиксировать деформации земной коры при землетрясениях, вулканологам следить за изменениями вулканического рельефа при извержениях вулканов.

После завершения программы работы спутников *ERS* и создания 10-летнего архива снимков, их поступление продолжено с запущенного в 2002 г. европейского спутника *Envisat* (Environmental Satellite). Его название свидетельствует о расширении задач, прежде в основном океанологических, в область мониторинга состояния природной среды. Радиолокационная аппаратура *ASAR* (Advanced Synthetic Aperture Radar) с разрешением в основном 30 м при охвате 100 км, работающая в *C*-диапазоне при вертикальной и горизонтальной поляризации излучения, выполняет съемку с разным охватом и разрешением (предусмотрены пять режимов работы) для решения различных задач. Радиолокационная съемка с этого спутника сочетается с многозональной съемкой системой *AATSR* (Advanced Along-Track Scanning Radiometer) в семи зонах видимого и инфракрасного диапазона с разрешением 500 м и 1 км

и гиперспектральной системой MERIS (Medium Resolution Imaging Spectroradiometer) в 15 зонах видимого и инфракрасного диапазона с разрешением 250 м и 1 км.

Параллельно с европейскими спутниками с 1992 г. получали с японского ресурсно-океанологического спутника *JERS-1* радиолокационные снимки с разрешением 18 м при ширине охвата 75 км. Одновременно выполнялась съемка в семи каналах оптического диапазона (аппаратура OPS — Optical Sensor) с тем же охватом и разрешением.

На разрабатываемом японском картографическом спутнике *ALOS* (Advanced Land Observation Satellite) предусмотрена наряду с панхроматической и многозональной съемкой в видимом диапазоне также и радиолокационная съемка с разрешением 10 м при охвате 70 км. Таким образом получение радиолокационных снимков одновременно со снимками в оптическом диапазоне составляет характерную черту японских спутников, комплексирующих задачи исследований суши и океана.

С 1995 г. начал давать снимки канадский спутник многоцелевого назначения *Radarsat-1* (изучение океана, льдов, геологии, лесов, сельскохозяйственных земель). Особенность снимков с этого спутника — разнообразие характеристик, что делает их пригодными для решения многих задач. Работая в *S*-диапазоне в разных режимах, радар с синтезированной апертурой обеспечивает разрешение от 8 до 100 м при охвате от 35 до 500 км. Один из интересных результатов работы этого спутника — первая радиолокационная фотокарта Антарктиды, с большой выразительностью передающая детали рельефа поверхности ледникового покрова и потоков выводных ледников (рис. 4.5). Предусмотрена возможность

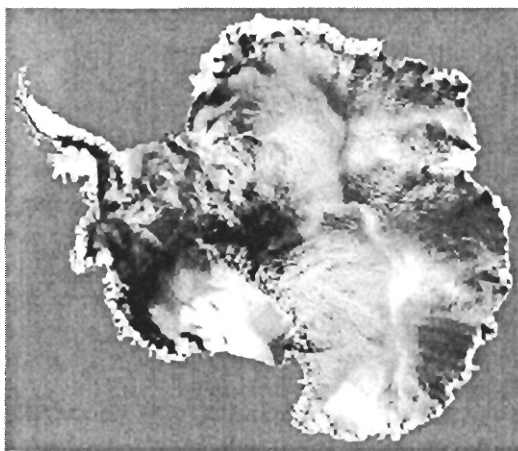


Рис. 4.5. Фотокарта Антарктиды, созданная по радиолокационным снимкам со спутника *Radarsat* (уменьшенная копия)

работы с изображением при разном разрешении — от 25 до 250 м. Для обеспечения радиointерферометрической обработки снимков проведены эксперименты с целевой коррекцией орбиты спутника, обеспечивающей оптимальное получение пар снимков для создания интерферограмм, позволяющих с большой точностью определять изменения высоты поверхности. На следующем спутнике *Radarsat-2* предполагается получение радиолокационных изображений в том же диапазоне частот при 12 режимах работы с разрешением от 3 до 100 м с охватом от 10 до 500 км, при четырех вариантах поляризации сигнала.

Тенденция получения разнообразных материалов радиолокационной съемки сохраняется и на разрабатываемых спутниках. Так, *TerraSAR-X* будет вести многополяризационную съемку в разных режимах с разрешением 1, 6, 16 м при повторяемости съемки 2—4 дня, а 5-метровая антенна должна обеспечить возможность наиболее надежной вдольмаршрутной радиointерферометрии.

Несмотря на массовое получение радиолокационных снимков в длительных спутниковых программах, продолжают и кратковременные эксперименты, предусматривающие опробование новых видов съемки и совершенствование типов снимков. Так в 1994 г. с возвращаемого корабля *Shuttle* получены радиолокационные снимки одновременно в *L*-, *C*-, *X*-диапазонах и при разной поляризации излучения.

Интересные материалы получены радиолокационной системой с возвращаемого корабля *Shuttle Endeavor* в его недельном полете в феврале 2000 г. с целью формирования высокоточной цифровой модели рельефа Земли, для чего на корабле имелись две антенны, одна из которых была выдвинута на 60-метровой штанге. Съемка двумя радарными, работающими в *C*- и *X*-диапазонах, выполнялась с разрешением 25 м. Такой съемкой удалось покрыть поверхность планеты от 60° с.ш. до 56° ю.ш. дважды (при разной геометрии радиолучей). С помощью радиointерферометрического метода строится глобальная цифровая модель рельефа с частотой точек через 25 м и точностью в плане 20 м и по высоте 16 м.

Таким образом, фонд радиолокационных снимков в последнее десятилетие быстро растет и совершенствуется, однако методы обработки информации пока находятся на экспериментальной стадии. Дальнейшая их разработка должна обеспечить действительно широкое и эффективное использование радиолокационных снимков.

#### **4.5. Электронные фонды космических снимков**

Переход к цифровым методам съемки, постепенно охвативший большую часть космических съемочных систем, хранение

съемочных материалов на носителях высокой плотности обусловили создание электронных фондов космических снимков, т.е. фондов цифровых снимков, доступ к которым обеспечивается средствами телекоммуникации. Систематизированные сведения о материалах съемки содержатся в электронных каталогах, помещаемых в сети Интернет; нередко они предусматривают возможность знакомства с просмотрными снимками (*quicklook*). В результате материалы съемки становятся доступными для поиска и заказа независимо от местонахождения потребителя.

Основные поставщики материалов космической съемки через Интернет — крупнейшие американские и европейские центры данных дистанционного зондирования.

*EROS Data Center* в США, созданный в системе государственной службы совместно USGS — Геологической съемкой США и NOAA — Национальной службой атмосферы и океанов, распространяет через каталог *Earth Explorer* в Интернете главным образом архивные данные прошлых съемок: снимки, полученные системами MSS и TM со спутников *Landsat* 10-летней и более давности, рассекреченные фотоснимки с разведывательных спутников *Corona*, снимки, сделанные ручными камерами с пилотируемых кораблей и орбитальных станций, и многие другие.

*Space Imaging* — частная компания в США — является основным поставщиком современных съемочных материалов. Эта фирма распространяет новые материалы съемки со спутников *Landsat*, получает и продает снимки высокого разрешения с индийского спутника *IRS*. Она же является владельцем и распространителем снимков сверхвысокого разрешения со спутника *Ikonos*, для поиска которых создан каталог *Carterra*.

*Eurimage* — европейская фирма, распространяющая снимки с европейских, индийских, японских, американских спутников: *ERS-1, 2, Envisat, SPOT, IRS, JERS, NOAA, Landsat, Radarsat, Ikonos, Quick Bird*. Для поиска снимков можно пользоваться каталогом Европейского космического агентства.

*Spotimage* — французская фирма-распространитель снимков со спутника *SPOT*. Для их поиска действует каталог *SIRIUS*.

Канадский центр дистанционного зондирования СЕО — государственная организация, наряду со снимками с канадского спутника *Radarsat* распространяет снимки со спутника *Landsat-7*.

Кроме национальных, действуют международные Интернет-каталоги снимков, обслуживающие сеть распределенных архивов данных в разных странах. Из них наиболее известна система *EOS Data Gateway*, которая на 2003 г. объединяла национальные каталоги 8 стран.

В России для основных материалов фотографической съемки со спутников *Ресурс-Ф* созданы электронный каталог и поисковая система в *Госцентре «Природа»*. Снимки со спутников *Ресурс-О*,

*Океан-О* архивируются в цифровой форме и для них также создан электронный каталог в НПО «Планета». Однако в Интернете на рубеже веков были помещены из российских лишь электронные каталоги «Совинформспутника» и Инженерно-технологического центра «СканЭкс», принимающего, архивирующего и распространяющего снимки со спутников *Ресурс-О* (МСУ-СК и МСУ-Э), *Метеор-ЗМ1*. Эта фирма начала также прием и распространение снимков с зарубежных спутников *IRS* (съёмочные системы LISS и PAN), *Terra* (система MODIS), *Radarsat*, распространяет снимки *Landsat-7*, организовав для российских потребителей их библиотеку «Прозрачный мир» также с электронным каталогом. Ряд других коммерческих фирм — «Совинформспутник», *Дата+* и др. — также являются дистрибьютерами снимков с зарубежных спутников. В то же время некоторые снимки с российских спутников принимают и распространяют зарубежные станции приема, например европейские станции Кируна (Швеция) и Фучино (Италия) — снимки со спутников *Ресурс-О*. Это еще раз убеждает в необходимости ориентироваться во всех накапливаемых материалах космической съемки.

## 4.6. Географическая оценка фонда снимков

### 4.6.1. Задачи, решаемые по снимкам разного пространственного разрешения

Соотношение между размерами объектов, изучаемых в разных областях географических исследований, и пространственным разрешением снимков, обеспечиваемым основными съёмочными системами, можно представить графиком (рис. 4.6). Он показывает, какие задачи можно решать по снимкам разных типов и в какой мере обеспечиваются нужды различных областей географических исследований и тематического картографирования современными съёмочными материалами.

Задачи исследования глобальных метеорологических процессов, изучения макро- и мезоклиматических явлений, допускающие обобщенное изображение облачности, равно как и задачи изучения глобального распределения температур океанической поверхности, глобальной океанической циркуляции, решаются по снимкам с геостационарных метеоспутников с разрешением 2—5 км.

Снимки с метеорологических спутников на околоземных орбитах с разрешением 1 км, как и снимки сканирующими системами малого разрешения с ресурсных спутников, вполне удовлетворяют требованиям метеорологии, связанным с изучением циркуляции атмосферы и синоптической ситуации в целях про-

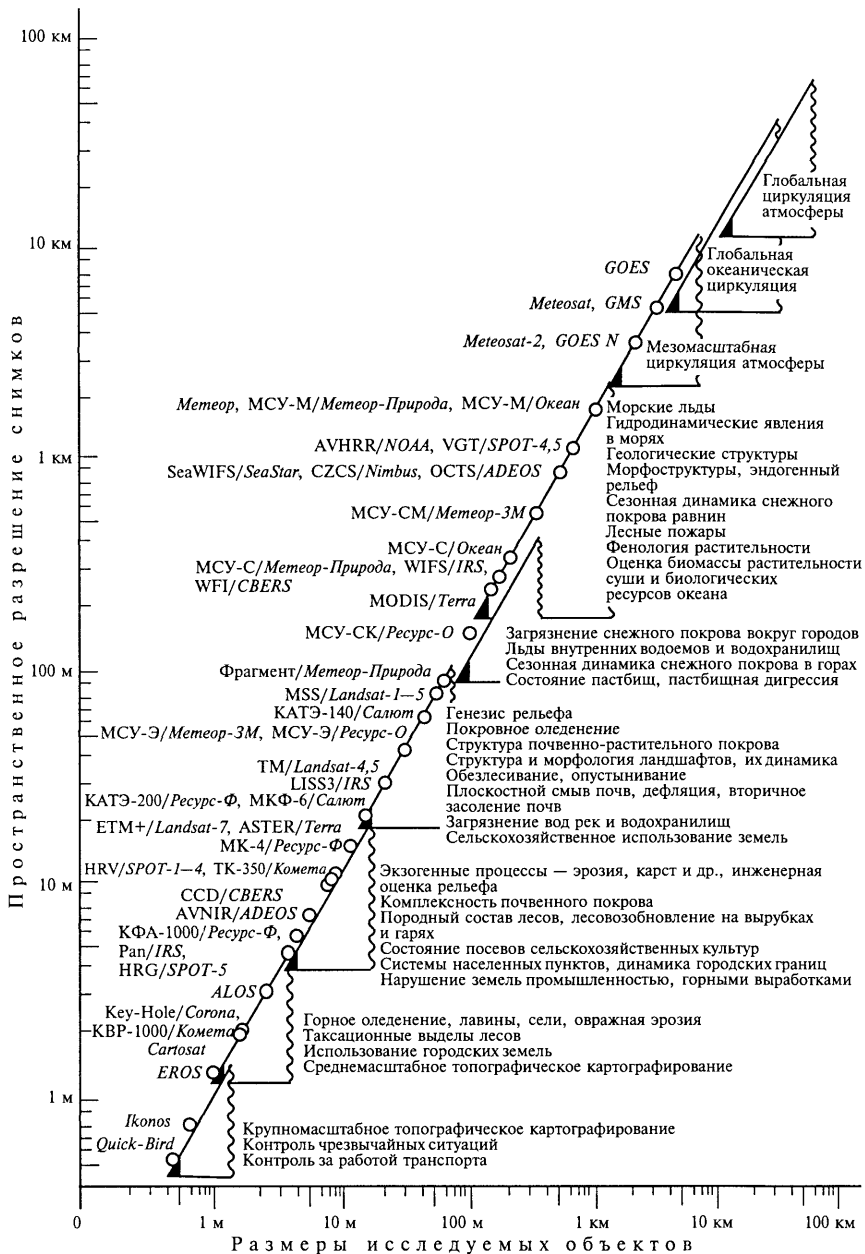


Рис. 4.6. Соотношение между пространственным разрешением снимков мирового фонда и решаемыми по ним задачами

гноза погоды и, кроме того, позволяют частично решать другие многочисленные задачи: анализ ледовой обстановки в морях и гидродинамической обстановки в океанах; изучение геологических структур и морфоструктур эндогенного рельефа; изучение распределения снежного покрова и его сезонной динамики для прогнозирования талого стока. По таким снимкам могут решаться и некоторые задачи, связанные с почвенно-растительным покровом: общий контроль за весенним просыханием почв, их готовностью к обработке; контроль за возникновением пожароопасной ситуации в лесах и крупными лесными пожарами. По снимкам такой детальности можно проследить за фенологическим состоянием растительности, продвижением «зеленой волны» весеннего развития и «коричневой волны» осеннего увядания растительности. При определении по данным съемки вегетационного индекса возможна оценка биомассы растительности, контроль за состоянием пастбищ, их готовностью к выпасу. По цвету воды океана, фиксируемому многозональными системами, можно судить о распределении фитопланктона при изучении биологических ресурсов океана.

Таким образом, снимки километрового разрешения с метеоспутников применимы и для разносторонних обзорных исследований поверхности Земли. Переход к более детальным снимкам среднего разрешения (140—280 м) с ресурсных спутников позволяет решать тот же широкий круг задач исследований земной поверхности: геологических условий и рельефа, изучения снежного покрова суши и ледового покрова морей, почвенно-растительного покрова, но с большей обоснованностью и для более сложных территорий и объектов. Например, такие снимки целесообразно использовать для изучения сезонной динамики снежного покрова не только на равнинах, но и в горах, для выявления зон его загрязнения вокруг городов и промышленных центров, для оценки ледовой обстановки не только в морях, но и на внутренних водоемах и водохранилищах, они лучше удовлетворяют нужды оценки весеннего просыхания почв и состояния пастбищ, мониторинга процессов пастбищной дигрессии и опустынивания, контроля за лесными пожарами и определения площадей гарей.

Наибольшее число задач исследований природной среды приходится на группу снимков с разрешением 10—100 м. Эти задачи настолько разнообразны, что требуют дифференциации.

Значительная часть задач исследования природных ландшафтов и их различных компонентов — рельефа, почвенно-растительного покрова, а также некоторых видов хозяйственной деятельности (прежде всего сельскохозяйственной) удовлетворяется уже при относительно высоком разрешении 30—100 м, т. е. при использовании снимков *MSS/Landsat*, «Фрагмент»/*Метеоп-Природа*, фотографических снимков с пилотируемых кораблей и орби-

тальных станций. Такое разрешение адекватно размерности значительной части природных объектов, хорошо удовлетворяет нужды геоморфологических исследований в отношении генезиса рельефа, обеспечивает картографирование таких физиономических объектов, как эоловый рельеф пустынь и изучение его динамики, обеспечивает изучение структуры почвенно-растительного покрова, его современного состояния и динамики, удовлетворяет нужды гляциологических исследований в отношении покровного оледенения. Эти снимки пригодны для изучения таких видов антропогенного воздействия на природу, как обезлесивание, опустынивание, вторичное засоление земель в результате сброса стирригационных вод. Они позволяют изучать сельскохозяйственное использование земель, идентифицировать основные сельскохозяйственные культуры в равнинных районах зернового земледелия, подсчитывать площади под их посевами для прогнозирования урожайности, оценивать организацию сельскохозяйственной территории. Эти снимки достаточны для составления многих тематических карт природы в масштабах 1 : 500 000 и мельче и частично удовлетворяют нужды сельскохозяйственного картографирования.

Более высокое разрешение 10—30 м, характерное для снимков, полученных системой ТМ/*Landsat*, фотоснимков КАТЭ-200/*Ресурс-Ф*, МКФ-6/*Союз-22*, *Салют*, обеспечивает, как и предыдущая группа, решение очень широкого круга географических задач. В каждой области исследований и тематического картографирования природы таким снимкам соответствует своя группа объектов определенного таксономического ранга, что и определяет перечень решаемых по снимкам вопросов. Например, в геоморфологии это изучение эрозионного, карстового и других типов экзогенного рельефа, в ландшафтоведении — изучение ландшафтной морфологической структуры на уровне ландшафтов и местностей, в географии почв — исследование структуры почвенного покрова, его комплексности, засоленности, заболоченности, в геоботанике — структуры растительного покрова. Для нужд лесного хозяйства по таким снимкам возможно картографирование породного состава лесов, контроль за соблюдением правил рубок, лесовосстановлением на вырубках и гарях. Широкий круг сельскохозяйственных задач: изучение размещения сельскохозяйственных культур, включая орошаемые земли, оценка состояния посевов в районах зернового земледелия, сбитости и стравленности пастбищ в животноводческих районах полупустынной и пустынной зоны. Частично решаются задачи исследования систем расселения и изучения использования городских земель крупных населенных пунктов.

Однако часть задач в тех же областях исследований остается за пределами удовлетворения требований. Из природных процессов это, например, исследование горного оледенения и лавинной



деятельности, в лесном хозяйстве — задачи лесной таксации. Лучшего разрешения требует исследование антропогенного воздействия на природу в промышленных районах, детальное изучение населенных пунктов, транспортной сети, решение инженерных задач. Они удовлетворяются при переходе к разрешению 10 м и выше, реализуемому, например, фотографическими съемочными системами КФА-1000, МК-4/*Ресурс-Ф*, ТК-350, КВР-1000/*Комета* и многочисленными системами ПЗС-съемки — HRV/*SPOT*, PAN/*IRS*, AVNIR/*ADEOS*, CCD/*CBERS*, обеспечивающими также задачи топографического картографирования, для решения которых эти системы и предназначены. Снимки такого типа пригодны для создания топографических карт в масштабах 1 : 50 000 — 1 : 100 000, а при разрешении около 2 м — 1 : 25 000. Именно стремление создавать по космическим снимкам топографические карты в первую очередь и обусловило переход к разрешению выше 10 м и запуск на рубеже веков разными странами многочисленных спутников, главным образом малых, с аппаратурой ПЗС-съемки.

И наконец, задачи детального наблюдения, например при оценке чрезвычайных ситуаций, а также задачи крупномасштабного топографического картографирования в масштабе крупнее 1 : 25 000 решаются при переходе к разрешению лучше 1 м, которое реализовано при съемке со спутников *Ikonos*, *Quick Bird*.

Таким образом, анализ соотношения разрешения снимков и исследуемых по ним объектов показывает четкую дифференциацию решаемых по снимкам задач в зависимости от пространственного разрешения и соответственно — уровня генерализации изображений. Разные задачи требуют снимков различного разрешения и сейчас, когда детальность космических снимков и аэрофото-снимков практически смыкается, для решения любых задач можно найти адекватные им материалы.

#### **4.6.2. Соотношение пространственного и спектрального разрешения**

В обширном и разнообразном фонде космических снимков имеются снимки панхроматические, многозональные, гиперспектральные, когда изображения получены в разных по числу и ширине охвата спектральных зонах.

Панхроматические снимки, получаемые при фотографической съемке, обычно в зоне 0,4—0,65 мкм, имеют спектральное разрешение порядка 0,25 мкм (250 нм); такая большая ширина спектрального канала соответствует наиболее низкому спектральному разрешению. При оптико-электронной съемке с использованием ПЗС-линеек в панхроматическом режиме, когда обеспечивается наилучшее пространственное разрешение, получают снимки также в широких спектральных каналах, с спектральным разрешени-

ем от 0,25 мкм (250 нм) (например, HRV/SPOT: 0,51—0,75 мкм, PAN/IRS: 0,5—0,75 мкм) до 0,45 мкм (450 нм) (например, Ikonos: 0,45—0,90 мкм). Таким образом все лучшие по пространственному разрешению космические снимки — и фотографические, и оперативно получаемые ПЗС-снимки — характеризуются использованием наиболее широкого спектрального канала съемки и соответственно более низким спектральным разрешением.

Цель многозональной съемки — получить серию снимков в нескольких спектральных зонах, более узких. При этом пространственное разрешение многозональных снимков в видимом и ближнем инфракрасном диапазоне, как правило, ниже, чем панхроматических. Обычно многозональная съемка выполняется в 4—6 зонах видимого и ближнего инфракрасного диапазона от 0,4 (0,5) до 0,8 (1,1) мкм при ширине зон 0,1 мкм (100 нм). Таковы наиболее широко распространенные снимки MSS/Landsat, HRV/SPOT, МСУ-М, МСУ-СК, МСУ-Э/Ресурс-О. В ближней инфракрасной зоне ширина спектральных каналов многозональных снимков увеличивается до 0,2—0,3 мкм (например, 0,8—1,1 мкм у MSS; 1,55—1,75 у TM/Landsat), но остается меньшей, чем у панхроматических снимков. Для многозональных фотографических снимков характерны более узкие, чем для сканерных, спектральные зоны, например у снимков камерой МКФ-6 их ширина 40 нм в видимом и 60 нм в ближнем инфракрасном диапазоне.

Таким образом, при переходе к многозональной съемке в видимом и ближнем инфракрасном диапазоне (когда пространственное разрешение несколько уменьшается) спектральное разрешение снимков повышается, однако в ближней инфракрасной зоне остается несколько более низким, чем в видимой.

Съемку в тепловом инфракрасном диапазоне обычно выполняют в зоне 10,4—12,5 мкм, т.е. при спектральном разрешении около 2 мкм (2000 нм), а используя несколько спектральных зон (например, у AVHRR/NOAA-7: 10,3—11,3; 11,5—12,5) — при спектральном разрешении 1 мкм (1000 нм). Это наиболее широкие спектральные зоны съемки из всех используемых.

Указанные относительно невысокие характеристики спектрального разрешения практически охватывают почти весь фонд космических снимков. Рост спектрального разрешения реализуется лишь при гиперспектральной съемке. Многоканальные системы с сотнями спектральных каналов (например, Hyperion — 222) имеют спектральное разрешение в первые десятки и даже единицы нанометров. Широко используемые благодаря свободному распространению по сети Интернет снимки, сделанные системами ASTER/Terra и MODIS/Terra, имеют неодинаковую ширину спектральных каналов разного пространственного разрешения в разных участках спектра (см. табл. 4.6, рис. 4.3). Так, из 36 спектральных каналов MODIS два канала в видимой части спектра, где

съемка ведется с пространственным разрешением 250 м, имеют ширину 50 нм, каналы с пространственным разрешением 500 м — ширину зон 20 нм в видимом и 50 нм в ближнем инфракрасном диапазоне, а каналы с пространственным разрешением 1000 м в видимом диапазоне наиболее узкие — 10 нм, в ближнем и среднем инфракрасном преимущественно 30—60 нм, а в тепловом инфракрасном они остаются довольно широкими — 300—700 нм. Таким образом, и в этом случае наблюдается понижение спектрального разрешения с переходом от коротковолновых к более длинноволновым зонам.

Накопление в фонде космических снимков информации высокого спектрального разрешения начато с 2000-х годов, когда стали работать несколько систем с числом спектральных каналов более 10—15 и шириной зон в первые десятки микрометров. Кроме упомянутых *Hyperion/EO1*, *ASTER*, *MODIS/Terra*, это *MERIS/ENVISAT*, *MTI*, *MightySat*.

Переход к более узким спектральным зонам позволяет, как это видно из рис. 4.4, значительно эффективней учитывать спектральный образ объектов для их распознавания или определения их состояния, более точно рассчитывать спектральные индексы. Узкие спектральные зоны позволяют учитывать полосы поглощения воды, аэрозолей, загрязняющих веществ, лучше решая задачи экологического мониторинга.

### **4.6.3. Соотношение пространственного и временного разрешения**

Соотношение пространственного и временного разрешения современных снимков и соответствие повторяемости съемки требованиям различных областей исследований отражены на рис. 4.7. Из графика следует, что большинство современных спутников обеспечивают съемку с низким пространственным разрешением при высокой повторяемости, а съемку высокого разрешения с редкой повторяемостью. Это связано с малым охватом территории при съемке высокого разрешения. Однако основной круг стоящих сейчас перед космическими съемками задач по повторяемости вполне удовлетворяется.

Съемки малого разрешения (1 км и менее) в большинстве случаев выполняются через сутки (с метеоспутников на полярных околоземных орбитах) и даже через 15—30 мин (с геостационарных спутников), т. е. с достаточно высокой периодичностью, вполне соответствующей решаемым по снимкам задачам. Сканерная съемка среднего разрешения, выполняемая с периодичностью 5—6 суток, в отношении временного разрешения также вполне соответствует решаемым по ее материалам задачам, таким, как проследивание за динамикой снежного покрова в целях прогноза стока,

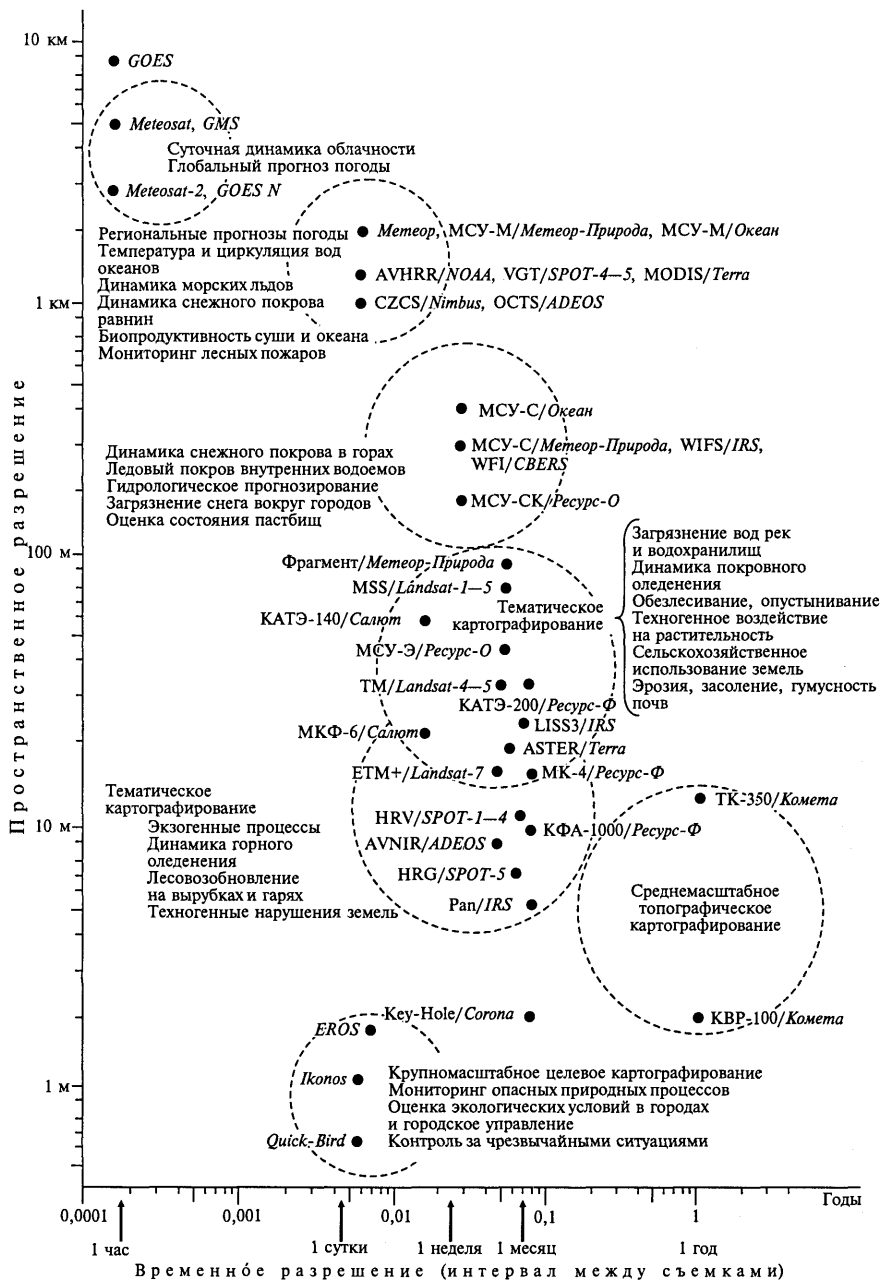


Рис. 4.7. Соотношение между пространственным и временным разрешением снимков и решаемые задачи

заблаговременного предупреждения о паводках и наводнениях. Что же касается съемок относительно высокого разрешения, выполняемых с ресурсных спутников с интервалом 16—18 дней, то для них ряд задач требует более высокой периодичности, повторения съемки через 5—10 дней. Поскольку практическая реализация съемки даже через 18 дней из-за условий облачности не удается, приходится констатировать, что снимки высокого разрешения с ресурсных спутников не обеспечивают решения задач мониторинга за быстро протекающими процессами, требующего повторения съемки через несколько суток.

Снимки высокого разрешения с использованием фотографических съемочных систем получали эпизодически при запусках спутников обычно на месяц, т. е. без расчета на повторение съемки. Такие съемки, предназначенные для создания по их материалам топографических карт, не нуждаются в регулярном повторении, а при изучении по этим материалам многолетней динамики природных и хозяйственных процессов исследователи обращаются к созданным ранее фондам. При выполнении оперативной оптико-электронной съемки высокого разрешения, когда при съемке в надир с помощью линейных ПЗС-приемников небольшой охват вынужденно обуславливает редкую повторяемость (например, у спутника *SPOT 24* дня, *IRS 22* дня), выход находят в выполнении съемки с отклонением съемочной оси поперек трассы. Например, на спутнике *SPOT* такое отклонение с помощью зеркальной системы позволяет обеспечить повторение съемки через 1—4 дня.

На спутниках с электронно-оптическими съемочными системами очень высокой детальности стало традиционным использовать «прицельную» съемку с отклонением оптической оси. В этом случае проблема повторяемости съемки высокого разрешения снимается, управление ориентацией спутника и съемочной системы обеспечивает практически любую заданную повторяемость. Другой путь решения проблемы — переход от отдельных спутников к их созвездиям, когда на одну орбиту запускаются несколько спутников (обычно малых), последовательно обзоревающих Землю с заданным временным интервалом. Это особенно важно при наблюдении за быстро протекающими процессами и для контроля чрезвычайных ситуаций.

#### **4.6.4. Соотношение пространственного и географического разрешения. Показатели географического разрешения**

Опыт работы со снимками показывает, что по величине пространственного разрешения еще нельзя точно предсказать, какие объекты изобразятся на снимке. Поэтому предложен качествен-

ный показатель изобразительных свойств снимков — географическое разрешение, представление о котором дано в гл. 3.

Обращение к снимкам одной и той же территории разного масштаба и пространственного разрешения показывает, что на них изображаются объекты различного иерархического ранга. Например, на снимках низкого разрешения сельскохозяйственные земли никак не выделяются, на снимках среднего разрешения появляется сетчатая структура земельных массивов, а при высоком разрешении становятся видны индивидуальные сельскохозяйственные поля. Точно так же с переходом к снимкам более высокого разрешения в пятне города сначала начинает проявляться его планировочная структура, затем изображаются магистрали и улицы и, наконец, отдельные здания.

На основе опыта работы со снимками выявлены те географические объекты, изображение которых на снимках можно использовать в качестве показателей их географического разрешения. Это объекты, обладающие хорошо выраженной физиономичностью, имеющие не локальное, а широкое территориальное распространение и характеризующиеся определенными размерами (варьирующими в небольших пределах). Для большинства равнинных районов зоны умеренных широт к таким объектам относятся *формы эрозионного рельефа, сельскохозяйственные поля и населенные пункты*. Их удобно использовать еще и потому, что каждая группа включает своеобразный ряд объектов, различающихся по размерам и рангам.

**Формы эрозионного рельефа.** Размерный ряд здесь образуют речные долины, балки, овраги. Уже на глобальных фотографических и сканерных снимках с пространственным разрешением 5—10 км просматриваются благодаря смене растительности крупнейшие долины в аридных районах, занятые тугайными лесами, болотами, орошаемыми землями (например, долина Нила) (цв. вкл. II, 18, а). По тому же признаку выделяются долины крупнейших рек на сканерных снимках низкого разрешения (1—2 км) (цв. вкл. II, 18, б). Их изображение и может служить показателем пространственного разрешения 1—10 км. На сканерных снимках среднего разрешения (200—300 м) благодаря различиям в изображении нераспаханных земель и земельных массивов, кроме долин, изображаются еще и крупные формы эрозионного рельефа — широкие балки (цв. вкл. II, 18, в); число порядков дешифрируемых эрозионных форм составляет 3—4. На сканерных и фотографических снимках относительно высокого разрешения (30—100 м) видны уже небольшие по размерам балки и число порядков дешифрируемых эрозионных форм возрастает до 5—7 (цв. вкл. II, 18, г). Таким образом, изображение эрозионных форм (например, балок) 3—4-го порядков может служить показателем пространственного разрешения 200—300 м, а 5—7-го порядков — про-

пространственного разрешения 30—100 м. На снимках высокого разрешения (10—30 м) число порядков дешифрируемых балок продолжает увеличиваться. И только на фотографических и многоэлементных ПЗС-снимках очень высокого разрешения (1—10 м) выявляются крупнейшие овраги, изображение которых и может служить показателем очень высокого пространственного разрешения.

**Сельскохозяйственные поля** включают объекты разной размерности: крупные поля в районах зернового земледелия со сторонами 1—2 км и более и мелкие поля, главным образом хлопчатника в районах орошаемого земледелия с размером сторон менее 1 км. Ряд может быть продолжен, например, с использованием рисовых чеков, имеющих размеры в сотни и десятки метров.

На сканерных и фотографических снимках низкого пространственного разрешения сельскохозяйственные поля не видны совсем. На сканерных снимках среднего разрешения (200—300 м) в равнинных районах зернового земледелия начинает неявно проявляться сетка полей, обуславливая сетчато-зернистую структуру изображения (цв. вкл. II, 19, а), в то время как районы орошаемого земледелия изображаются интегрально, без расчленения на поля (цв. вкл. II, 19, з). На сканерных и фотографических снимках относительно высокого разрешения (30—100 м) поля в равнинных районах зернового земледелия видны хорошо, четко определяются их границы и тон изображения каждого поля (цв. вкл. II, 19, б). В расчлененных и залесенных районах для их отображения требуется высокое разрешение 10—30 м; в районах же орошаемого земледелия отдельные поля не прослеживаются и на таких снимках, но в совокупности обуславливают сетчатую структуру изображения (цв. вкл. II, 19, д). Лишь на фотографических и ПЗС-снимках очень высокого разрешения (1—10 м) на богарных полях зерновых выявляется неоднородность посевов (цв. вкл. II, 19, в), а в орошаемых районах обеспечивается индивидуальное изображение полей хлопчатника, возможность выделения их границ (цв. вкл. II, 19, е). Таким образом, нерасчлененное изображение массивов сельскохозяйственных полей в районах зернового земледелия служит показателем пространственного разрешения 200—300 м, индивидуальное изображение таких полей — показателем пространственного разрешения 30—100 м и выше, а изображение полей в районах орошаемого земледелия — показателем пространственного разрешения 1—10 м.

**Населенные пункты.** Размерный ряд здесь образуют: крупные города — сельские населенные пункты — планировочная структура населенных пунктов — улицы вместе с примыкающими к проезжей части зданиями — отдельные здания в населенных пунктах.

На глобальных и региональных фотографических и сканерных снимках низкого пространственного разрешения населенные пункты не изображаются. Только в условиях зимнего ландшафта на

снимках могут быть выявлены крупнейшие города вместе с зоной загрязненного снега вокруг них. На сканерных снимках среднего разрешения (200—300 м) опознаются (с помощью карты) общие контуры крупнейших городов, а в зимних условиях также средних городов (цв. вкл. II, 20, *а*). На сканерных и фотографических снимках относительно высокого разрешения (30—100 м) города не только опознаются, но и дешифрируются их планировочная структура, основные магистрали, выделяются районы с разной плотностью застройки (цв. вкл. II, 20, *б*). На фотографических и сканерных снимках высокого разрешения (10—30 м) главным элементом в структуре изображения населенных пунктов являются сливающиеся ряды зданий и улиц, образующие светлые полосы, в результате чего для населенных пунктов в целом характерна полосчатая структура (цв. вкл. II, 20, *в*). На фотографических и ПЗС-снимках очень высокого разрешения (1—10 м) эти полосы расчленяются на составляющие элементы, появляется изображение индивидуальных зданий, что предопределяет разрушение полосчатой структуры (цв. вкл. II, 20, *г, д, е*). И наконец, на снимках сверхвысокого разрешения (лучше 1 м) видны не только индивидуальные здания и детали городской застройки, но и машины на улицах города и стоянках.

Разумеется, размеры и форма зданий, наличие зеленых насаждений сильно влияют на характер изображения, но тем не менее на снимках разного разрешения прослеживаются указанные общие закономерности изменений изображения.

Три выделенные группы объектов взаимно дополняют одна другую в том отношении, что в совокупности ими может быть охарактеризован весь имеющийся сейчас ряд снимков по разрешению. На мелкомасштабных снимках низкого и среднего разрешения в качестве показателя детальности снимков может быть использовано изображение форм эрозионного рельефа; на снимках среднего и относительно высокого разрешения — сельскохозяйственные поля; при высоком и очень высоком разрешении снимков хорошим показателем их детальности служит изображение населенных пунктов.

Наряду с выделенными общими показателями в каждом природном районе можно найти свой круг объектов, которые могут служить региональными показателями географического разрешения: в западносибирской лесостепи — березовые колки; в лесных районах — вырубки; в районах развития вечной мерзлоты — термокарстовые озера и аласы и т. п.

Кроме общих и региональных, можно назвать определенный набор индивидуальных объектов (просеки в лесу, взлетные полосы аэродромов, мосты), изображение которых также может быть использовано в качестве показателей географического разрешения снимков. Даже имея дело со съемочными материалами, ха-



рактеристики которых неизвестны, возможно примерно оценить их пространственное разрешение, зная особенности изображения названных объектов.

Подход к оценке снимков на основе их географического разрешения полезен при их использовании в любой области исследований Земли, в разных направлениях тематического дешифрирования. Приступая к решению определенной тематической задачи, необходимо выбрать из огромного разнообразного фонда снимки, оптимальные для решения данной задачи. Именно для этого и используются показатели географического разрешения. С другой стороны, они помогают оценить круг задач, решение которых обеспечивается снимками данного пространственного разрешения.

В рассмотренную систему входит набор самых общих показателей, наиболее простых, широко распространенных, охватывающих как природные, так и хозяйственные объекты. Этот набор хорошо характеризует снимки при их оценке для общегеографического дешифрирования. Такой же подход целесообразен и в более узко специализированных областях тематических исследований. По аналогии с общими показателями географического разрешения возможно также определение тематических наборов объектов, отображение которых на снимке позволяет оценить не только конкретную величину разрешения на местности (если оно неизвестно), но и пригодность снимков для решения определенного круга задач.

## АЭРОКОСМИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ЗЕМЛИ

Аэрокосмические снимки применяются во всех направлениях географических исследований, но интенсивность их использования и результативность применения в разных областях изучения Земли различны. Они чрезвычайно важны в исследованиях литосферы, так как показывают раздробленность геологического фундамента линейными тектоническими нарушениями (разломами) и обилие кольцевых структур; в исследованиях атмосферы, где снимки дали основу метеорологических прогнозов; благодаря снимкам из космоса открыта вихревая структура океана, но пока они значительно меньше применяются в социально-экономической географии. Различаются и типы задач, решаемых по снимкам в разных отраслях географических исследований. Так, решение инвентаризационных задач реализуется при изучении природных ресурсов, например при картографировании почв, растительности, поскольку снимки наиболее полно отображают сложную пространственную структуру почвенно-растительного покрова. Оценочные задачи, оперативная оценка состояния экосистем выполняются в рамках исследований биопродуктивности океанов, ледового покрова морей, контроля за пожароопасной ситуацией в лесах. Прогностические задачи, использование снимков для моделирования и прогнозирования наиболее развито в метеорологии, где их анализ является основой прогнозов погоды, в гидрологии — для прогноза талого стока рек, паводков и наводнений.

Как видно из гл. 3, при работе со снимками используются все виды их обработки, но наиболее широко развито дешифрирование снимков, прежде всего визуальное, которое теперь подкрепляется возможностями компьютерных улучшающих преобразований и классификации изучаемых объектов по снимкам. Большое развитие получило создание по снимкам различных производных изображений на основе расчета спектральных индексов. С выполнением гиперспектральной съемки стали создаваться десятки типов таких индексных фотокарт. Переход к цифровым методам съемки, развитие конвергентной цифровой стереоскопической съемки и создание цифровых фотограмметрических комплексов расширили возможности фотограмметрической обработки космиче-

ских снимков, используемой главным образом для создания топографических карт.

Хотя одно из основных достоинств космических снимков заключается в совместном отображении всех компонентов земной оболочки, обеспечивающем комплексность исследований, тем не менее применение снимков в различных областях изучения Земли шло пока разрозненно, так как везде требовалась углубленная разработка собственных методик. Идея комплексных исследований наиболее полно реализована при выполнении в нашей стране программы комплексной картографической инвентаризации природных ресурсов (ККИПР), когда по снимкам создавались серии взаимоувязанных и взаимосогласованных карт. Осознание на рубеже веков экологических проблем, нависших над человечеством, и парадигма изучения Земли как системы вновь активизируют комплексные межотраслевые исследования. Но поскольку исторически методы космических географических исследований развивались по областям, изучающим разные оболочки Земли, то применяемые методики, успехи и достижения в них различны. Поэтому и обзор аэрокосмических исследований Земли представлен в отраслевой структуре, по геосферам. Анализ применения снимков в разных направлениях географических исследований четко показывает, что при всем многообразии решаемых задач магистральный путь практического использования аэрокосмических снимков лежит через карту, которая имеет самостоятельное значение и, кроме того, служит базовой основой ГИС.

## 5.1. Исследования атмосферы

В исследованиях атмосферы, в метеорологии и климатологии космические методы начали применять раньше, чем в других областях изучения Земли; до 70-х годов XX в. спутниковые снимки получали именно в целях изучения атмосферы и метеорологических процессов и съемка велась предназначенными для этого метеорологическими спутниками. Космические наблюдения значимы для метеорологии и климатологии в нескольких направлениях. Во-первых, метеорологические спутники впервые в истории науки дали глобальную картину облачного покрова и позволили наглядно представить характер атмосферной циркуляции по ее проявлению в структуре облачности. Во-вторых, обеспечивая радиационные измерения, спутники поставляют обширные экспериментальные данные по радиационному и тепловому балансу Земли. Космические программы изучения Земли как планеты и глобальных изменений, например EOS, предусматривают наблюдения за физическим и химическим состоянием атмосферы, в первую очередь за водяным паром, аэрозолями в атмосфере, тем-

пературой на верхней границе облаков, состоянием озонового слоя и другими параметрами, имеющими экологическое значение. Поэтому появление метеоспутников радикально расширило возможности развития глобальной и региональной климатологии.

**Изучение характера атмосферной циркуляции и систем облачности.** Снимки со спутников обнаружили основную особенность в распределении облачного покрова — исключительно высокую степень его организации, развитие определенных типов облачных систем (фронтальных, ячеистых, циклонических); по ним подтверждена и уточнена международная классификация облачности, созданы атласы облаков.

Анализ изображения широко распространенных, особенно в умеренных широтах, спиралевидных циклонических облачных систем диаметром 1—1,5 тыс. км дал подтверждение теоретическим схемам циклонической циркуляции, выявив особенности различных стадий развития циклонов. В тыловой части обширных циклонов обнаружены облачные вихри небольших размеров — мезовихри, вызывающие развитие новых циклонов, с которыми, как оказалось, связаны зоны максимального волнения океана. Выявление дешифровочных признаков различных облачных систем обеспечило надежную идентификацию погодообразующих процессов.

Для изучения динамики отдельных атмосферных явлений, например прослеживания фаз эволюции тропических циклонов — ураганов, особенно ценны снимки с геостационарных спутников, поступающие с интервалом 15—30 мин, что позволяет прослеживать суточное развитие облачности и динамику атмосферы.

Снимки с метеорологических спутников дают возможность составлять региональные и мировые карты распределения облачности за различные промежутки времени — так называемые карты нефанализа. Информация с геостационарных спутников передается в мировые метеорологические центры, где на основе ее анализа составляются глобальные прогнозы погоды, которые распространяются по глобальной системе телесвязи во все страны мира.

**Исследование радиационного и теплового баланса Земли.** Актинометрические измерения и измерения уходящей радиации обеспечивают изучение по спутниковым данным радиационного баланса Земли. По данным спутников строятся карты альбедо и уходящего излучения системы Земля — атмосфера, радиационного и теплового баланса.

Прежние представления о закономерностях планетарного распределения радиационного баланса основывались почти исключительно на использовании расчетных данных. Актинометрические данные метеорологических спутников впервые позволили

сравнить расчетные данные с экспериментальными. Оказалось, что расчетные значения альбедо для всех широтных зон систематически превышали измеренные.

Анализ межгодовой изменчивости радиационного баланса показал наличие энергоактивных зон в океанах, к которым в Атлантическом океане относятся районы Гольфстрима, Ньюфаундленда, в Тихом — район восточнее берегов Азиатского материка, две зоны в тропических широтах, с которыми, в частности, связано развитие Эль-Ниньо.

**Изучение других метеорологических параметров.** Ряд других метеорологических характеристик находит прямое или косвенное отражение на спутниковых снимках, сделанных в тепловом инфракрасном и микроволновом диапазонах. Тепловые инфракрасные снимки отражают температуру поверхности суши или воды и используются для картографирования и анализа пространственного распределения температур поверхности океана. Зондирование в радиодиапазоне с помощью скаттерометра применяется для изучения приповерхностных ветров. Данные микроволновых радиометров позволяют фиксировать интенсивность осадков над океаном. Для изучения осадков выполняются специальные спутниковые программы — *GPM* (Global Precipitation Mission), *TRMM* (Tropical Rainfall Measuring Mission) с использованием радиофизических методов измерений по вертикальному профилю атмосферы.

В связи с проблемой глобального потепления климата в последние десятилетия активизировались исследования парникового эффекта атмосферы — содержания в ней водяного пара (регистрируемого специальным каналом съемки в зоне его поглощения 5—7,5 мкм, например, с геостационарных спутников), углекислого газа, метана и др., для контроля за которыми используется гиперспектральная съемка. Экологическую направленность имеют исследования содержания аэрозолей в атмосфере, изучаемого при многоракурсной (веерной) съемке, например системой *MISR/Terra*; наблюдения за состоянием озонового слоя, за химическим составом атмосферы. Таким образом, характерен переход от изучения преимущественно циркуляции атмосферы к ее комплексным исследованиям.

**Сбор данных метеонаблюдений.** Некоторые спутники решают задачу сбора данных наземных наблюдений автоматических метеостанций, размещаемых преимущественно в малоисследованных районах суши и в океане и снабжаемых датчиками для определения различных метеорологических параметров. Это, например, спутники на геостационарных орбитах, постоянно получающие и ретранслирующие метеоданные по определенному району для составления оперативных синоптических и других метеорологических карт.

## 5.2. Исследования гидросферы

### 5.2.1. Океаны и моря

Исследования океана ведут специальные океанологические спутники *Seasat*, *Topex-Poseidon*, *ERS*, *SeaStar*, *Jason*, *Океан*. Главное достижение космических методов в океанологии состоит в том, что спутники позволяют перейти от наблюдений в отдельных точках (ранее обеспечивавшихся буйковыми или судовыми методами) к общему глобальному охвату. Однако при этом регистрируются характеристики лишь поверхностного слоя воды — скин-слоя — и большое значение имеет использование косвенных показателей (например распределения температур как индикаторов различных водных масс и их динамики); поэтому и необходимо изучение связей исследуемых явлений.

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

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

**Измерения уровня океана.** Спутниковая радиоальтиметрия впервые открыла возможность получения глобальной суточной картины топографии поверхности океана с точностью вначале до 10, а теперь 5 см. Это позволяет определять отклонения уровня водной поверхности от геоида, исследовать вихревую структуру общей океанической циркуляции, 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.

Уже первые опыты радиопрофилирования с орбитальной станции *Skylab* (1973) показали связь топографии водной поверхности с рельефом морского дна. Радиолокационная система спутника *Seasat* вместе с радиовысотометром 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* о топографии поверхности восстановлены крупнейшие черты донного рельефа и составлена карта рельефа дна Мирового океана. Спутники *Topex/Poseidon* с 1992 г., *Jason* с 2001 г. обеспечивают с интервалом в 10 дней глобальную картину уровня поверхности океана для оперативного наблюдения и прогноза цунами, штормовых нагонов, а также для контроля за долголетними изменениями уровня океана. Эти данные показали, что с 1993 по 2000 г. средний уровень Мирового океана поднимался на 2,5 мм в год. Выявлены сезонные колебания уровня, в частности, связанные с температурным расширением воды в теплый период года. Подготовлены анимации, воспроизводящие годовой цикл аномалий уровня океана. Данные об уровне океана входят в модели прогноза ураганов. Явление Эль-Ниньо в 1997—1998 гг. было предсказано по альтиметрическим данным раньше, чем по метеорологическим.

**Наблюдения за течениями, океаническими вихрями, фронтами, апвеллингами, внутренними волнами.** Из-за сложности прямых наблюдений для изучения движения вод в океане приходится прибегать к косвенным методам, в частности к анализу трассеров движения. Хорошими индикаторами течений являются битые льды, взвеси, фитопланктон, которые визуализируют на снимке движение вод (рис. 5.1). Именно благодаря им открыт новый вид сложного перемещения водных масс — грибовидные течения (см. рис. 3.9); обнаружение их по космическим снимкам определило постановку экспериментальных работ и теоретических изысканий. Однако наиболее эффективный современный метод глобального изучения течений, воды которых обычно имеют температуры, отличные от температур окружающих акваторий, — это тепловая инфракрасная съемка. Перепад температуры 2—10 °С, наблюдаемый вдоль границ течений, вполне надежно фиксируется космическими средствами и позволяет исследовать эти границы в их динамике.

В значительной мере благодаря спутниковым наблюдениям в океанологии сделано одно из крупнейших за последнее столетие открытий — обнаружение повсеместно в Мировом океане, преж-



Рис. 5.1. Особенности движения вод у берегов Антарктиды, трассируемые битыми льдами. Снимок со спутника *Landsat*

де представлявшемся вместилищем инертных, медленно перемещающихся водных масс, океанической погоды, которая, как и в атмосфере, определяется в основном среднемасштабными вихревыми образованиями — океаническими циклонами и антициклонами. Обычно такие вихри диаметром 300—400 км образуются вдоль фронтов: по одну сторону формируются холодные циклонические вихри, по другую — теплые антициклонические. Вдоль струйных течений при отчленении их меандров образуются кольца — «ринги» — диаметром 100—200 км. Эти особенности динамики океана хорошо отражаются, например, на снимках Атлантического океана со спутников *NOAA*, *Terra*, на которых виден Гольфстрим со всеми деталями движения вод, четко выделяющи-



мися границами струйного течения, сопровождающими его меандрами и вихрями (см. цв. вкл. II, 14).

По снимкам с геостационарных спутников подготовлены фильмы, демонстрирующие движение вихрей вдоль границ Гольфстрима. Обнаружена «шахматная упаковка» вихрей субарктического фронта в северо-западной части Тихого океана в районе действия течения Куроисио, где возникают крупные (100—200 км) антициклонические вихри, образующиеся при отделении струй от вершин меандров и сопутствующие распространению теплых вод на север, и меньшие циклонические вихри (50—70 км), возникающие в результате бокового трения. Такая сложная система циркуляции вод обнаружена впервые, ее пространственные масштабы и временная изменчивость не позволяли изучать ее традиционными судовыми методами.

Фиксация на тепловых инфракрасных снимках зон апвеллингов — подъема холодных донных вод — открыла возможность регулярного изучения этого явления по данным спутниковых наблюдений.

На космических снимках находят отображение и внутренние волны, проявляющиеся в виде полосчатых структур на водной поверхности. Сделан расчет параметров внутренних волн по внешним проявлениям. В США издан атлас космических снимков с изображением следов внутренних волн.

**Изучение волнения и приповерхностных ветров.** Для изучения волнения используются различные радиофизические методы: микроволновая радиометрия, радиоальтиметрия, скаттерометрия, радиолокация. Самолетные эксперименты показали, что величина микроволнового излучения морской поверхности зависит от силы волнения, что объясняется разным количеством пены на воде. Действенный метод изучения волнения представляет активная радиолокация, фиксирующая неровности водной поверхности. Получаемые с океанологических спутников радиолокационные снимки океана с разрешением 20—40 м очень четко отображают структуру волнения (рис. 5.2).

Существенной для изучения волнения оказалась и спутниковая альтиметрия. Измерения радиовысотомера обеспечивают надежное определение высоты морских волн с погрешностью для сильного волнения (4—8 м) до 0,5 м. С помощью скаттерометра определяются параметры морского волнения, позволяющие рассчитывать направление и скорость ветра. Таким образом, открывается возможность получать в планетарных масштабах информацию о волнении и ветре, имеющую решающее значение в прогнозах погоды (рис. 5.3), а также использовать ее для выбора оптимальных путей судов вне зон разрушительных штормов.

**Исследования распределения и концентрации взвесей, фитопланктона, биопродуктивности океана.** На космических снимках в ви-

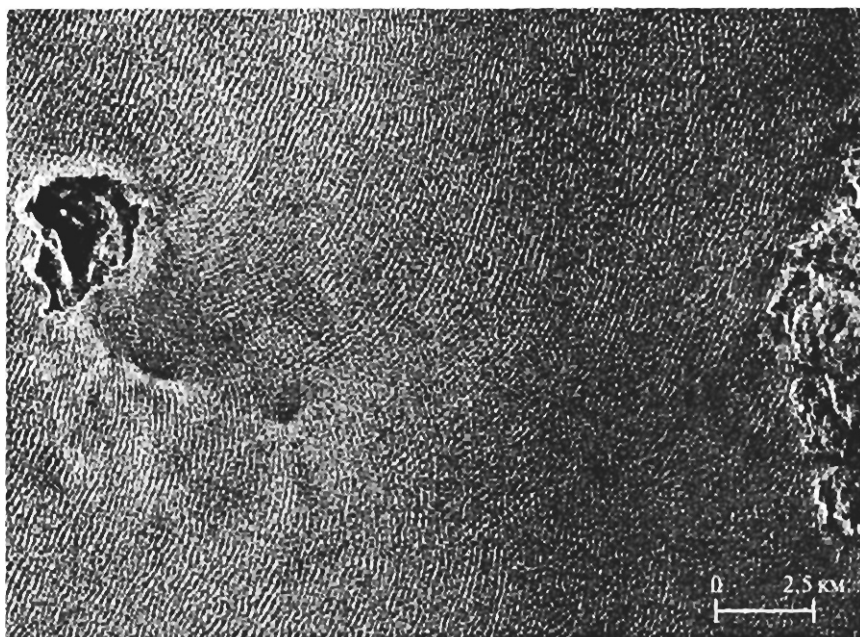


Рис. 5.2. Морское волнение у Шетландских островов. Радиолокационный снимок со спутника *Seasat*

димом диапазоне спектра четко выделяются прибрежные полосы мутных вод в зоне волнового перемешивания донных отложений, факелы выноса твердого стока в устьях рек. Например, взвеси лёс-

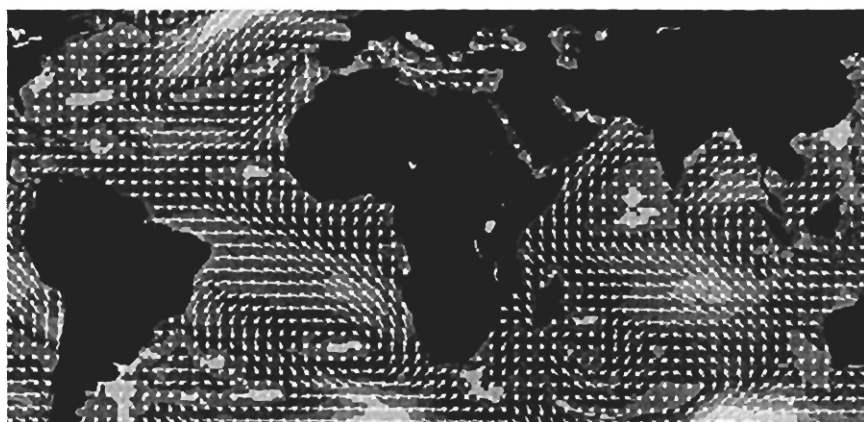


Рис. 5.3. Векторы направления и скорости ветров над Атлантическим океаном (по данным скаттерметра спутника *Seasat*)

сового происхождения вдоль берегов Китая, выносимые реками и маркирующие течения, видны даже на снимках с геостационарного спутника *GMS*.

Для изучения глубинного распределения и концентрации взвесей используют снимки в разных спектральных зонах. Эксперименты показывают, что спектральная отражательная способность вод находится в прямой зависимости от количества и состава содержащихся в них взвесей, что является основой использования многозональных снимков. Количественное изучение содержания взвесей в воде основывается на опорных одновременных дистанционных и контактных измерениях. На основе статистического анализа их результатов создаются регрессионные модели для получения в дальнейшем количественных характеристик по дистанционным данным. Такие модели, например, созданы для Финского залива Балтийского моря.

На снимках находят отображение и биологические компоненты вод, в первую очередь фитопланктон. Содержащийся в фитопланктоне хлорофилл меняет цвет воды океана, который можно фиксировать со спутника. Эту информацию дают многозональные сканеры *CZCS/Nimbus*, *SeaWIFS/SeaStar*. Сопоставление этих данных с многочисленными судовыми наблюдениями позволило установить корреляцию между цветовыми характеристиками вод (соотношением яркости в голубой и зеленой зонах спектра) и концентрацией фитопланктона. По данным *CZCS* издан атлас «Цвет океана из космоса». Регулярно создаются глобальные карты концентрации фитопланктона в океане с различным пространственным и временным осреднением, по которым выявлены зоны океанической пустыни в теплых тропических водах и зоны повышенной концентрации фитопланктона в холодных шельфовых водах, в районах апвеллингов, полярных водах. Изучается сезонная изменчивость биопродуктивности. Такие исследования необходимы в рыбохозяйственных целях, поскольку концентрация фитопланктона служит индикатором скопления промысловых рыб. Существенная роль фитопланктона, участвующего в фотосинтезе, в глобальном балансе  $\text{CO}_2$ , обуславливает экологическую значимость таких наблюдений, их большое значение в исследованиях глобального углеродного цикла.

**Наблюдения за загрязнением поверхности океана.** Актуальная задача мониторинга загрязнения океана, прежде всего нефтепродуктами, частично решается дистанционными методами. Нефтяная пленка влияет на оптические характеристики поверхности, изменяя ее отражательные свойства. Контрасты между пятнами нефти и чистой поверхностью, выбросы нефти, растекающейся толстым слоем, могут фиксироваться при съемке в видимом диапазоне. Но главный метод — радиолокация, дающая возможность определять границы нефтяных загрязнений при аварийных разливах нефти, когда на снимках четко выделяются так называемые

слики — пятна гладкой морской поверхности, где наблюдается гашение волнения нефтяной пленкой.

**Изучение распространения морских льдов, ледовая разведка.** Космические снимки издавна используются как средство оценки ледовой обстановки. Они позволяют количественно и качественно определять состояние ледового покрова морей и его изменение, что возможно делать в условиях полярной ночи, используя тепловую инфракрасную или радиолокационную съемку. На снимках фиксируются границы морских льдов, их структура и состояние. Даже по очень мелкомасштабным снимкам в видимом диапазоне с метеорологических спутников можно определять некоторые характеристики льда, например мощность: изображение тонкого льда толщиной 5 см имеет почти черный тон, как и вода; с возрастанием мощности льда яркость изображения увеличивается и лед толщиной от 70 см до 3 м имеет белый тон изображения. По снимкам определяются положение кромки льда и припая, границы зон различной сплоченности льдов, заприпайные полыньи, крупные каналы, большие ледовые поля и айсберги. Возраст льда, за исключением крупных площадей молодых льдов, на снимках в видимом диапазоне не опознается. По космическим снимкам удастся проследить такие существенные черты динамики ледового покрова, как развитие полыней. Фиксация полыней у Новой Земли, Северной Земли определяет оценку условий навигации по Северному морскому пути.

Для регулярного оперативного анализа ледовой обстановки арктических морей разработаны специальные инструкции по дешифрированию морских льдов на космических снимках. Результаты анализа снимков в виде карт ледовой обстановки в оперативном порядке передаются капитанам ледоколов и судов.

Систематическая, регулярно проводимая оценка постоянно меняющейся ледовой обстановки — жизненно важная проблема, особенно для работы транспорта. Поэтому очень актуально развитие методов автоматического создания карт морских льдов; такие картографические системы работают в США уже с 70-х годов XX в., решая задачи монтажа снимков в определенной картографической проекции, фильтрации облачности на основе метода выбора минимальной яркости изображения, разделения льдов разных типов.

Съемка в видимом диапазоне может производиться только при высотах Солнца не менее  $5^\circ$  над горизонтом. Поэтому наблюдения в Арктике возможны лишь с февраля по сентябрь, а в Антарктике — с сентября по март. В связи с этим для изучения морских льдов существенно применение съемки в тепловом инфракрасном и радиодиапазоне.

При высоте Солнца менее  $5^\circ$  используются тепловые инфракрасные снимки, по которым можно выделять зоны льдов раз-

личной толщины и возраста. Однако облачность и в этом случае представляет препятствие для исследования морских льдов, преодолимое лишь при съемке в радиодиапазоне.

Микроволновые радиометры, позволяющие фиксировать границы льдов и производить их разделение на 2—3 группы по возрасту, используются из-за их малого разрешения в основном для Антарктики. По данным микроволновой радиометрической съемки со спутника *Nimbus-7* смонтированы фильмы, дающие возможность проследить за сезонной динамикой ледовой обстановки в масштабах полушарий за время функционирования спутника на орбите. В последующем составление спутниковых карт морских льдов продолжалось по данным военного метеоспутника США *DMSP*. Для дистанционного изучения морских льдов используется и радиолокационная съемка, выполняемая со спутников *Океан*, *ERS*, *Radarsat*; в программе последнего оценка ледовой обстановки занимает особенно важное место. Определяется положение кромок льда, сплоченность, возраст по основным градациям, заприпайные полыньи, разводья, каналы. Лучше, чем другими методами, выявляются по таким снимкам начальные формы льдов — ниласовых, молодых.

**Изучение рельефа дна; комплексные исследования мелководного шельфа.** Анализ космических снимков в видимом диапазоне показывает, что на них 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. Однако, как отмечалось в гл. 2, просматриваемая зона ограничивается небольшими глубинами: до 20 м в водах средней прозрачности и до 40 м — в прозрачных водах. Таким образом, космические снимки обеспечивают изучение рельефа дна лишь в зоне мелководного шельфа. Для подобного 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. Для изучения рельефа дна глубоководных районов используются косвенные методы, в частности данные о топографии поверхности океана.

### 5.2.2. Снега и льды

Гляциологические объекты характеризуются большой сезонной изменчивостью, распространением в труднодоступных и сложных для наземных наблюдений условиях, что обуславливает необхо-

димось привлечения космической информации для их изучения. Различные виды снежно-ледовых образований очень сильно дифференцируются по своим пространственным и режимным характеристикам, поэтому требуется применение разных видов космической информации, обеспечивающей решение многообразных задач.

**Изучение распределения снежного покрова и его динамики.** Космическая съемка впервые открыла возможность одновременной фиксации на значительных территориях границ распространения снежного покрова, а также изучения его динамики. Обе характеристики являются основными для оперативного картографирования снежного покрова, необходимого прежде всего в целях гидрологических прогнозов. Для этого используются главным образом снимки с метеорологических спутников, обеспечивающих регулярное оперативное поступление информации. Фиксация распространения снежного покрова равнин осложняется в залесенных районах, где трудно судить о наличии снега под пологом леса. Приходится ориентироваться на заснеженность небольших безлесных участков внутри лесных массивов — болот, вырубок, долин рек, озер.

Сезонная динамика снежного покрова, скорость отступления его границ в весенний период важны для гидрологического прогнозирования, что требует оперативных оценок. Одной из первых еще в 60-х гг. XX в. была разработана система автоматического картографирования распространения и динамики снежного покрова, предусматривающая монтаж снимков в картографической проекции, обработку изображений по методу выбора минимальной яркости для фильтрации облачности, осреднение за разные сроки, например подекадно. Это открыло реальные возможности изучения сезонной и годовой динамики снежного покрова в глобальном масштабе. Глобальное изучение динамики снежного покрова континентов и ледового покрова морей оказалось эффективным и для климатологического анализа: с границами этих явлений, особенно морских льдов, связаны процессы образования циклонических вихрей, увеличение ледового и снежного покровов приводит к усилению циклогенеза.

**Толщина снежного покрова.** Важнейшую проблему оценки толщины и водозапаса в снежном покрове приходится решать косвенным способом. Основой служит метод теплового проявления снеготаяния, суть которого состоит в обратном расчете величин максимального снегонакопления по положению границы снежного покрова (фиксируемой на космических снимках) и данным о температурах за период снеготаяния. Эта задача решается на равнинах путем расчета по скорости продвижения границ снеготаяния с учетом сумм положительных температур, а в горных районах — по высоте снеговой границы, также с учетом накопленных

к моменту съемки сумм положительных температур, обуславливающих возможное снеготаяние на данной высоте. Разрабатываются автоматизированные методы таких определений.

Хорошие перспективы для выявления водозапаса в снежном покрове имеет съемка в микроволновом диапазоне. Экспериментально показана принципиальная возможность определения водного эквивалента тающего снега при температуре  $0^{\circ}$  по его излучению в микроволновом диапазоне. Применение этого метода пока ограничено очень малым разрешением съемочных систем, однако энергично разрабатываются алгоритмы определения водозапаса.

**Таяние снега.** Для изучения снеготаяния, определения зон, охваченных таянием, фронта и тыла таяния при гидрологическом прогнозировании некоторые дополнительные возможности открывает использование многозональных снимков. Поскольку отражательная способность тающего снега в ближней инфракрасной зоне резко падает, сравнение изображений, полученных в видимой и ближней инфракрасной зонах спектра, перспективно для определения тающего снега. Практический опыт на примере Казахстана показал, что этот метод обеспечивает выделение районов интенсивно тающего, переувлажненного снежного покрова. Сезонное перемещение зоны таяния по языку горного ледника фиксируется радиолокационными снимками, где яркость изображения снега зависит от его влагосодержания.

**Снежные лавины.** Для изучения лавин требуются снимки самого высокого разрешения, поэтому для таких целей обычно используются аэрофотоснимки; теперь эти требования удовлетворяются и космическими снимками субметрового разрешения. При благоприятных (раннелетних) сроках съемки дешифрируются следы схода лавин в виде крупных лавинных снежников в логах и на конусах выноса, снежных мостов на реках и лавинных прочесов среди лесной растительности на склонах. По этим признакам можно выделить по снимкам сеть лавиносборов и далее получить различные характеристики лавинной опасности, например подсчитать густоту сети лавиносборов.

**Изучение горного и покровного оледенений.** Горные ледники хорошо выделяются на снимках высокого разрешения. Видны не только границы и площади ледников; различаются такие их элементы, как фирновая линия, крупнейшие моренные гряды, зоны крупных ледопадов, окружающие ледник отложенные морены последней стадии оледенения. Поэтому такие снимки целесообразно использовать для уточнения изображения ледников на топографических и общегеографических картах (рис. 5.4) и для составления обзорных гляциологических карт.

Новые возможности дистанционного изучения ледников успешно использованы при создании гляциологами нашей страны Атласа снежно-ледовых ресурсов мира. При неравноценной изу-

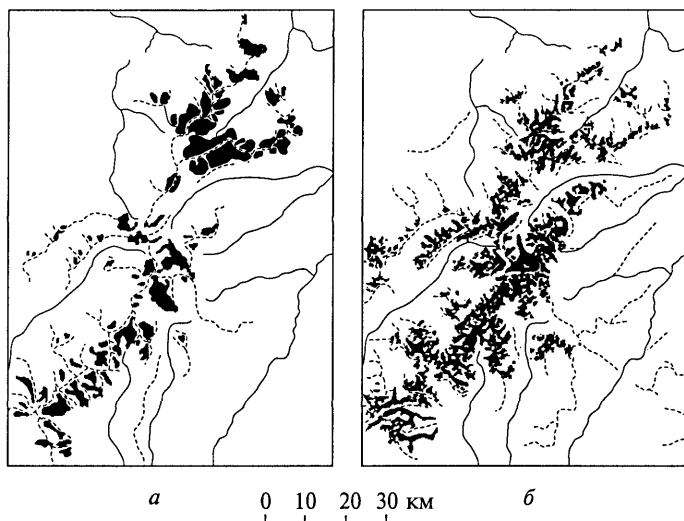


Рис. 5.4. Ледники в Алайском хребте на обзорно-топографической карте (а) и по результатам дешифрирования снимка с космического корабля *Союз-22* (б)

ченности ледниковых районов и динамичности ледников, вызывающей быстрое устаревание картографических источников, космические снимки приобрели значение первостепенных документов при создании гляциологических карт. В Атласе снежно-ледовых ресурсов мира по ним составлены карты морфологии ледников на районы Памиро-Алая, Восточного Памира, Гиндукуша и Каракорума, Центрального Патагонского поля, для которых прежде не было удовлетворительных картографических материалов.

Однако роль космических снимков не ограничивается фиксацией пространственного состояния и морфологии поверхности ледников, важнее их использование для расчетов ряда режимных параметров гляциологических объектов. Решающее значение для этого имеет изображение на снимках границы питания (фирновой линии в конце периода абляции), где накопление снега за год равно его расходу. Определив высоту границы питания, рассчитывают для нее среднюю летнюю температуру воздуха, а по ней — величину таяния, которое на этой высоте равно аккумуляции снега. Таким образом, с помощью космических снимков косвенно можно определить поле аккумуляции для крупных горных систем; это сделано для важнейших районов, наиболее подробно для Памира.

Полученные по космическим снимкам данные о высоте границы питания и аккумуляции на этом уровне используются для анализа целого ряда параметров: баланса массы ледников, интенсивности массообмена и скорости оборота влаги в ледниковых систе-



мах, направления потоков влаги, питающих ледники. Определенные с помощью космической информации величины аккумуляции на ледниках позволяют перейти к твердым осадкам и далее к стоку. Так можно получить количественные характеристики осадков, снегозапасов и стока в высокогорной зоне, где эти данные отсутствуют.

Космические снимки высокого разрешения с успехом применяются для изучения пульсирующих ледников. Выявлены их дешифровочные признаки: моренные петли, потемнение конца ледника во время подвижки в связи с уменьшением альбедо сильно разбитой трещинами поверхности и т. п. По материалам повторных съемок из космоса монтируют фильмы, позволяющие наблюдать пульсирующие ледники в их динамике; например, это сделано для ледника Твидсмюр в Кордильерах. Разработан метод выявления пульсирующих ледников по материалам повторной космической фотосъемки с применением способа псевдопараллакса, который был использован при создании каталога пульсирующих ледников Памира. В результате анализа изображения ледников на снимках уточнена классификация пульсирующих ледников, выполняется прогноз их подвижек. Большую помощь при изучении пульсирующих ледников оказывают визуально-инструментальные наблюдения и съемки космонавтов. Они предусмотрены программой «Ураган», выполняемой экипажем Международной космической станции, который, например, заснял катастрофический отрыв ледника Колка в Северной Осетии в 2002 г.

Спутниковые снимки используются и для изучения покровного оледенения, в частности антарктического. По снимкам со спутника *Landsat*, на которых выделяются выводные и шельфовые ледники, выявляют системы трещин, ежегодно образующихся при их переходе «на плаву», по которым определяют скорость движения льда. По космическим снимкам составлены фотокарты масштаба 1 : 1 000 000, уточнены топографические карты масштаба 1 : 250 000. Новая фотокарта Антарктиды, выразительно подчеркивающая рельеф льда, потоки выводных ледников, создана по радиолокационным снимкам со спутника *Radarsat* (см. рис. 4.5). Радиоальтиметрическая съемка со спутника *ERS* с детальной рисовкой рельефа подчеркнула в рисунке горизонталей контуры подледного озера Восток, обнаружение которого рассматривается как важнейшее географическое открытие XX в. По радиоальтиметрическим данным впервые определена высота центральной части Гренландского ледникового щита.

Радиофизические методы обеспечивают интересную дополнительную гляциологическую информацию. Так, обнаружены различия микроволнового излучения льда разных гляциологических зон Антарктического континента, а также Гренландии. Этот феномен возможно связан с структурой льда разных зон льдообра-

зования, с разными процессами метаморфизма снега и образования льда. Интереснейшие перспективы для изучения покровных ледников открыло применение радиointерферометрической обработки радиолокационных снимков, что позволяет с высокой точностью фиксировать небольшие изменения высоты поверхности, связанные с таянием льда, определять скорости движения выводных ледников.

Специальные гляциологические спутниковые программы — европейская CryoSat, американская ICESat — предусматривают использование радиоальтиметрии и лазерной альтиметрии для высокоточного определения высоты поверхности ледниковых щитов и ее изменений.

**Изучение наледей и подземных льдов.** Снимки используются не только для изучения обширных поверхностных гляциологических объектов, но и столь малых, как наледи, крупнейшие из которых дешифрируются на снимках высокого разрешения. Поэтому при районировании территории по опасности наледообразования целесообразно привлечение космических снимков.

Подземные льды отображаются на снимках через ландшафтные индикаторы — рельеф, растительный покров. В атласе «Дешифрирование многозональных аэрокосмических снимков» имеется впечатляющий опыт создания серии карт многолетнемерзлых пород для района Центральной Якутии по многозональным фотографическим снимкам на основе мерзлотной интерпретации детальной карты лесной растительности, составленной в результате дешифрирования этих снимков.

**Разделение изображения облачности и снежно-ледовых образований.** Трудности гляциологического использования космических снимков связаны с проблемой разделения изображений облачности и снежно-ледовых образований. Обычно их различают по структуре и рисунку изображения. Однако наиболее эффективный путь — использование снимков в ближней инфракрасной зоне, где яркости облаков и снега резко различаются. Один из каналов гиперспектральной системы MODIS/Terra предназначен специально для этих целей.

### 5.2.3. Воды суши

В исследованиях вод суши космические снимки используются главным образом для гидрологического моделирования, изучения формирования половодья, прогноза стока, решения вопросов снежной гидрологии, наблюдений за катастрофическими наводнениями и борьбы с ними, изучения глобального водообмена.

**Гидрологическое моделирование.** В современной гидрологии расчеты стока все чаще производятся на базе гидрологического моделирования. Оно является основой прогноза стока в бассей-

нах, не обеспеченных наблюдениями. Разработка гидрологических моделей стока учитывает ряд параметров; некоторые из них, относящиеся к общей географической ситуации в бассейне, могут быть получены на основе анализа космических снимков. Такие характеристики водосборов, как озерность, заболоченность, лесистость, распаханность, достоверно определяются по космическим снимкам. Для рек снегового питания (т. е. для большинства рек нашей страны) по снимкам может быть выявлена и степень покрытости бассейна водой в твердом или жидком виде на разных фазах формирования стока: доля площади бассейна, покрытая снегом, во время снеготаяния; водность микроозер и других временных затоплений (их суммарная площадь) для внерусловой фазы стока; водность речных русел для русловой фазы. Таким образом, работы по моделированию стока базируются на использовании космических снимков для прогноза талого стока по динамике схода снежного покрова на водосборе, по изменению площадей внерусловых затоплений, а также на основе оценки запасов воды в речной сети, что требует использования снимков очень высокого разрешения.

Пока был наиболее обеспечен прогноз снегового половодья по данным о заснеженности водосборов и динамике таяния снежного покрова. Появление на рубеже веков оперативной информации высокого разрешения открывает перспективы и для определения изменений водности на стадиях внерусловых затоплений и водности русловой сети.

**Прогноз талого снегового стока.** Прогнозные модели стока по снеготаянию используются в Канаде, скандинавских странах, США, Индии, в нашей стране, особенно в связи с работой гидроэлектростанций и задачами ирригации. Определение заснеженности водосборов проводилось в горах Средней Азии для прогноза стока Амударьи и Сырдарьи, в Горном Алтае для Оби, а также в бассейнах Волги и Дона. Методическую основу исследований по снежной гидрологии составляет установление корреляции между площадью водосбора, покрытой снегом, и стоком через замыкающий створ водосбора для равнинных районов и нахождение зависимости между высотой снеговой линии в бассейне и объемом половодья для горных. Наиболее надежно применение спутниковой информации для оценки стока от снеготаяния в горных водосборах. Здесь положение снеговой линии в каждый момент времени является показателем равновесия основных факторов стока: максимальных снегозапасов и сумм положительных температур воздуха с начала таяния.

**Наблюдения за паводками, наводнениями.** Кроме прогнозирования космическая информация используется для контроля за половодьями, паводками и особенно катастрофическими явлениями. Такой контроль требует оперативной информации. Специальное

подразделение Министерства чрезвычайных ситуаций, оборудованное пунктом приема спутниковых изображений МСУ-СК/*Ресурс-О*, AVHRR/*NOAA* осуществляет мониторинг наводнений на реках. Оперативные карты зон затопления используются при борьбе с последствиями наводнения, для оценки принесенного ущерба, выбора мест для сооружения защитных дамб. Кроме определения фактических границ разливов важно выявление прогностических связей между площадями затоплений и определяющими факторами, например расходами на расположенных выше по течению водомерных постах, осадками в водосборе, что необходимо для разработки прогнозов-предупреждений. По снимкам со спутников *Метеор*, например, удалось установить такую зависимость площади затопления приустьевых участков Енисея от величины расхода воды у поста, расположенного выше на 350 км.

**Изучение озер и других замкнутых водоемов суши по космическим снимкам.** При изучении озер предусматривается их каталогизация, измерение уровня крупных озер (по данным радиоальтиметров), исследование качества вод (по многозональным снимкам): их мутности, зарастания и эвтрофикации, распространения в водоеме взвесей, выносимых реками, и загрязнения вод сбросами промышленных предприятий. Исследование распространения твердого стока Селенги в оз. Байкал установило повышение концентрации выносимых взвесей в глубинных слоях, их быстрое затопление и перемещение на глубине, что может представлять опасность для глубинной фауны. Исследования параметров качества — мутности озерных вод и содержания в них хлорофилла — проведены в США, например для озера Окичоби во Флориде, Великих озер.

При изучении ледовой обстановки на крупных озерах и водохранилищах определяется степень покрытия озера льдом, изменение ее в период очищения озера от льда, скорость перемещения и ветровой дрейф льда. На малых озерах по снимкам возможно установление дат ледостава и очищения от льда, так как их светлые пятна хорошо выделяются на темном фоне окружающих территорий, уже освободившихся от снега.

Космические снимки — надежное средство наблюдения за озерами с переменным режимом, сокращения или расширения площади водоемов. По снимкам МСУ-СК/*Ресурс-О*, ЕТМ/*Landsat*, MODIS/*Terra* реализован мониторинг усыхания Арала — крупнейшей экологической катастрофы нашего времени. Ежегодно подсчитывается площадь водоема и на основе этих данных по выявленным ранее гидрологическим зависимостям определяется уровень воды, ее объем, соленость, что чрезвычайно важно в условиях, когда регулярные натурные наблюдения по ряду причин не проводятся.

Регулярные спутниковые измерения уровня воды позволили проследить за сезонными и годовыми колебаниями уровня крупных внутренних водоемов, например оз. Виктория в Африке.

Дешифрирование космических снимков позволило восстановить контуры проозер в Восточном Казахстане, северо-западном Китае, южной Монголии (Джунгарское море, Хами-Турфанское озеро и др.).

**Проблемы глобального водообмена.** Гидрология, подобно всему комплексу наук о Земле, поставлена перед необходимостью исследования процессов глобального водообмена, которые формируют и направляют развитие региональных процессов. До последнего времени гидрологи вынужденно ограничивались традиционными «точечными» методами измерения; космические исследования открыли принципиально новые возможности получения информации для всей планеты. Исследование пространственно-временных полей различных гидрометеорологических параметров и их статистической структуры, а также взаимодействия атмосферы и гидросферы, выполняемое по спутниковым данным, образует основу для решения проблем глобального водообмена.

### 5.3. Исследования литосферы

#### 5.3.1. Геологическое строение

Исследования литосферы — одна из областей, где космические снимки находят наиболее активное применение благодаря возможности выявления новых черт геологического строения, незаметных на аэрофотоснимках. Свойства обзорности снимков и генерализованности изображения заставили пересмотреть старые взгляды на геологическое строение многих регионов и изменить систему исследований по принципу от общего к частному.

В нашей стране широко внедряются космические методы геологических исследований. Основные направления применения космической информации в геологических целях: геологическое картографирование, создание новых типов «космофотогеологических» карт; исследование стратиграфии и литолого-петрографического состава пород; структурно-тектоническое изучение территории, для которого космические снимки дали принципиально новую информацию, повысив, в частности, глубину исследований; использование космической информации для поисков месторождений полезных ископаемых; изучение геотермальных зон и вулканизма.

**Изучение стратиграфии и литолого-петрографического состава пород.** На космических снимках высокого разрешения в видимом диапазоне породы различного литолого-петрографического состава и возраста в открытых районах дешифрируются по цвету, фототону или рисунку изображения. Осадочные породы обособляются от изверженных магматических и метаморфических, консолидиро-

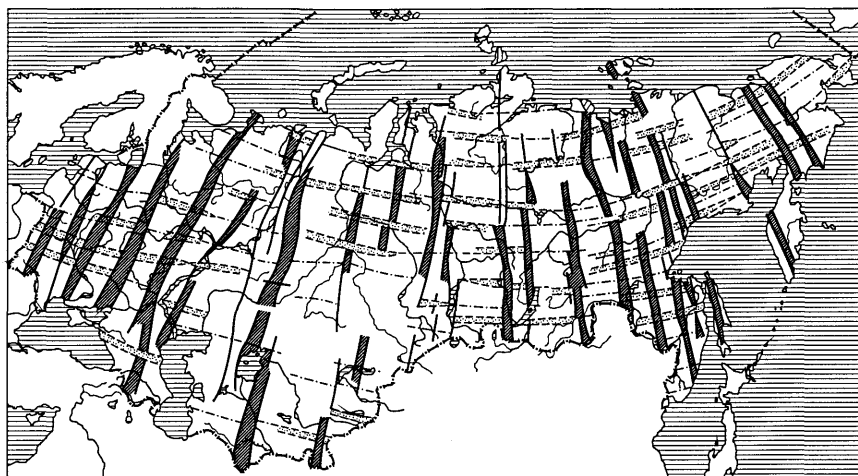
ванные осадки — от рыхлых. Даже на очень мелкомасштабных глобальных снимках выделяются темноцветные пятна древних изверженных пород в Африке и на Аравийском полуострове. Выходы осадочных и метаморфических пород выделяются среди рыхлых четвертичных отложений характерным параллельно-полосчатым рисунком, который может отражать слоистость и дислоцированность пород. Рыхлым четвертичным отложениям обычно свойственна неопределенно-пятнистая структура изображения, а магматические породы часто отличаются наиболее ровным, бесструктурным тоном. В районах с растительным покровом прямые дешифровочные признаки теряют свое значение и возрастает роль косвенного дешифрирования.

Разумеется, изучение по космическим снимкам стратиграфии и состава пород актуально для геологически мало исследованных районов. В условиях же высокой геологической изученности, например территории нашей страны, несравненно большее значение имеет структурно-тектоническое изучение территории, для чего космические снимки дают уникальную информацию.

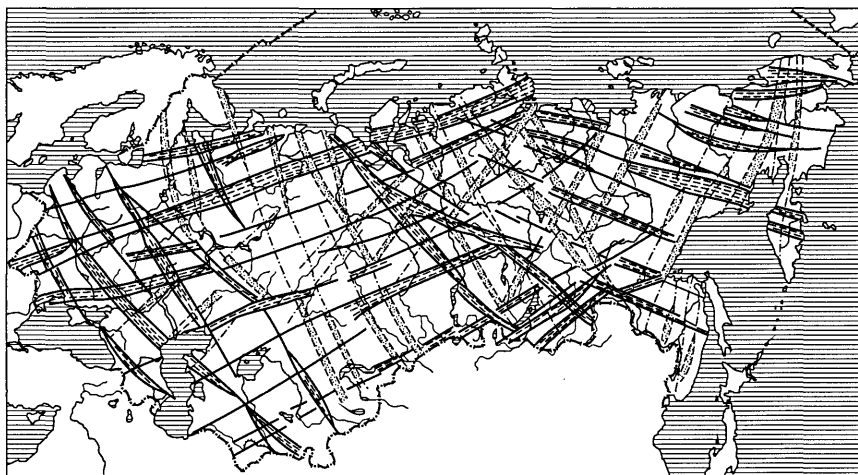
**Структурно-тектоническое изучение территории.** Одно из главных достоинств космических снимков — отображение черт строения территории, незаметных на крупномасштабных снимках, что относится к изображению крупных геологических структур. Фильтрация мелких деталей в результате генерализации изображения способствует объединению разрозненных фрагментов крупных геологических образований в единое целое. Особенно хорошо отображаются линейные разрывные нарушения, отмеченные слабыми перепадами рельефа, прямолинейными участками долин, изломами речных русел и эрозионных форм, прямолинейными контактами и сдвигами горных пород разного литологического состава. По космическим снимкам отдешифрировано очень много таких линейных элементов, обычно представляющих собой зоны тектонических нарушений.

Обнаружены такие зоны огромной протяженности, например трансконтинентальная зона разломов Буждур-Бахария в Северной Африке, выявленная по глобальным фотоснимкам, продолжение которой на запад прослежено в Атлантическом океане и на восток до гор Загроса.

По фотокартам, смонтированным из космических снимков на обширные территории, вырисовывается глобальная сетка линейных элементов. Так, в результате работы над космофотогеологической картой СССР четко выделилась ортогональная система разломов, состоящая из меридиональных и широтных структур, а также диагональная система (рис. 5.5). Оказалось, что между структурами одного направления наблюдаются определенные интервалы. Линии разломов ограничивают блоки земной коры, испытывающие разные вертикальные перемещения.



*a*



*б*

Рис. 5.5. Ортогональная (а) и диагональная (б) системы разломов, выявленные по космогеологической карте СССР масштаба 1 : 2 500 000

Пликативные нарушения — складчатые структуры, сложные антиклинории, кольцевые структуры — также хорошо дешифрируются по снимкам. Выявляются складки горных пород и их взаимоотношения, равно как пластовые фигуры маркирующих горизонтов в складчатых областях. Анализ космических снимков показал очень широкое развитие на Земле кольцевых структур разного ранга (рис. 5.6). Огромное количество кольцевых структур на Земле и других планетах явилось одним из геологических открытий, последовавших из анализа космических снимков.



0 100 200 км

Рис. 5.6. Кольцевые структуры части Балтийского щита по результатам дешифрирования космических снимков

но использование снимков малого разрешения с метеорологических спутников; по отношению к этим снимкам иногда употребляют термин «просвечивание», имея в виду возможность выявления погребенных геологических образований сквозь толщу рыхлых отложений.

Дешифрирование глубинных структур нередко обнаруживает несогласие их ориентировки с поверхностными структурами, тектоническую расслоенность литосферы. Изучение типа деформаций на разных уровнях особенно важно при исследовании зон современной тектонической активности и при поисках глубинных месторождений полезных ископаемых. Так, анализ фотокарт Сибири показал, что территория Западно-Сибирской равнины разбита разломами и имеет глубинное блоковое строение, что прежде не предполагалось. Этот факт позволил подойти по-новому к планированию поисковых работ на нефть и газ.

**Прогнозирование и поиски месторождений полезных ископаемых.** Сопоставление результатов структурно-геологического де-

**Изучение структуры глубинных слоев литосферы.** Космические снимки открывают принципиально новые возможности для познания глубинного строения литосферы, позволяя выявлять по совокупности признаков структуры разных глубин и сопоставлять их между собой. Это направление использования космических снимков приобретает особенно большое значение в связи с поисками скрытых месторождений полезных ископаемых и задачами выявления глубинных сейсмогенных структур.

Для исследования и сопоставления разноглубинных структурных элементов литосферы используются космические снимки с различным разрешением. Предполагается зависимость между разрешением снимков и глубиной геологических исследований. Очень сильная генерализованность изображения способствует выявлению наиболее глубинных структур, для изучения которых целесообразно



шифрования с пространственным распределением известных месторождений полезных ископаемых способствует выявлению закономерностей их размещения, приуроченности к определенным структурам для прогнозирования возможных месторождений.

При поисках нефти и газа важно установить наличие крупных поднятий, осложненных локальными положительными формами и ограниченными разломами. На основе дешифрирования этих элементов на космических снимках осуществляется прогноз и выбор направлений поисковых работ. Снимки используются также для структурно-металлогенического и других видов прогнозного районирования. Среди важных практических результатов — обнаружение кимберлитовых тел на севере Сибири и европейской части России в связи с выделением по космическим снимкам структур, не проявлявшихся на аэроснимках и неизвестных по наземным геологическим работам. Выделение по снимкам системы протяженных дуговых тектонических зон в Восточном Забайкалье завершилось открытием медного оруденения удоканского типа. Ландшафтно-индикационное дешифрирование снимков центральной части Западной Сибири позволило уточнить контуры известных нефтеносных структур Сургутского и Нижневартовского сводов, расширив перспективы месторождения нефти. Во всех приведенных примерах высокая эффективность использования материалов космических съемок достигается за счет выявления новых, ранее неизвестных закономерностей размещения полезных ископаемых и на основе этого сужения фронта поисковых работ, концентрации их на наиболее перспективных участках.

**Сейсмические исследования, изучение вулканизма.** Благодаря хорошему отображению на снимках структур земной поверхности, зон разломов, нарушений и деформаций, т.е. ослабленных хрупких зон земной коры, признаков новейшей тектонической активности, по снимкам можно определять наиболее сейсмоопасные области, выполняя сейсмотектоническое районирование. Установлена приуроченность эпицентров разрушительных землетрясений к пересечениям тектонических линейментов, выявленных по результатам дешифрирования космических снимков. По снимкам оказывается возможным и определение магнитуды землетрясений. Радиолокационные разновременные снимки, при применении их интерферометрической обработки, дают возможность определять вертикальные смещения блоков земной коры при землетрясениях.

Вулканические явления, особенно крупные, также фиксируются на космических снимках. На тепловых инфракрасных снимках и снимках высокого разрешения в видимом диапазоне выделяются действующие вулканы, термальные проявления. Различаются вулканы активные и полуактивные, дешифрируются их кратеры, лавовые потоки, термальные источники. По радиолокаци-

онным снимкам при их интерферометрической обработке удается следить за изменением рельефа вулканических конусов после схода лавовых потоков.

**Гидрогеологические исследования.** Гидрогеологическая оценка территории, осуществляемая на основании изучения косвенных индикаторов, выполняется по космическим снимкам различного разрешения и масштабов. При этом каждый уровень генерализации обеспечивает решение своего круга задач. Мелкомасштабные обзорные снимки позволяют на основании структурно-геологических признаков решать задачи гидрогеологического районирования, выявления площадей распространения определенных типов подземных вод — трещинных, трещинно-карстовых, поровых. Среднемасштабные снимки на основании геоморфологических и структурных признаков дают возможность выявлять гидрогеологические условия и некоторые характеристики вод: глубину залегания, условия формирования и направление движения, минерализацию грунтовых вод. Детальные космические снимки позволяют по ландшафтным индикаторам определять литологические типы пород с разными гидрогеологическими параметрами, разделять области формирования, транзита и разгрузки линз пресных вод песчаных массивов.

Для изучения погребенных геологических структур, в том числе содержащих линзы пресных вод, оказалась полезной радиолокационная съемка. Так, по снимкам, сделанным радаром SIR-B с возвращаемого космического корабля *Shuttle*, как указывалось, обнаружено погребенное русло Нила, что открывает новые возможности гидрогеологических исследований и поисков подземных вод в условиях песчаной пустыни, где отмечается наилучшая проницаемость пород для лучей радиодиапазона.

### 5.3.2. Рельеф

Стереоскопическое изучение рельефа по космическим снимкам ограничено из-за большой высоты съемки — объемно воспринимается лишь горный рельеф. Однако хорошая передача различных индикаторов рельефа, главным образом почвенно-растительного покрова, позволяет разносторонне изучать рельеф горных и равнинных районов.

Исследование морфологических особенностей рельефа, его генезиса, возраста, динамики развития поддается дистанционным методам в разной степени. Наилучшим образом выражены на снимках морфологические черты рельефа и во многих случаях снимки представляют хороший материал для морфометрических определений. Морфологические особенности и изображающиеся на снимках элементы ландшафта, связанные с рельефом, позволяют по индикационным признакам выявлять генезис рельефа.

Отображение этапов развития рельефа в особенностях его морфологии и в других компонентах природы позволяет изучать динамику рельефа, для чего в ряде случаев целесообразно также сопоставление материалов разновременных съемок. Такой анализ позволяет судить об относительном возрасте рельефа, непосредственно по снимкам не устанавливаемом. Отсюда вытекает целесообразная последовательность изучения рельефа по аэрокосмическим снимкам: морфология и морфометрия — генезис и динамика — относительный возраст и этапы развития.

**Различные генетические типы рельефа.** Своеобразная морфология рельефа разных генетических типов обуславливает свои особенности изображения на космических снимках.

**Флювиальный рельеф** находит яркое отображение как в открытых, так и в залесенных районах. Речные долины в открытых районах выделяются благодаря интразональной пойменной растительности — луговой, болотной в гумидных районах, орошаемым землям — в аридных. Для залесенных горных районов характерно изображение светлой сети долин с незадернованными галечниковыми поймами на темном фоне лесной растительности. На речных поймах четко видны следы меандрирования, блуждания русел, формы рельефа пойм — гривы, старичные понижения (рис. 5.7).

Большие возможности открываются при изучении морфологии дельтовых областей, особенно дельт крупных рек. Сравнение разновременных снимков или современных снимков со старыми картами дает хороший материал для изучения динамики дельт. Таким образом изучена динамика дельт Дуная, Волги, Миссиси-



Рис. 5.7. Пойма р.Виллой. Снимок с космического корабля *Союз-22*

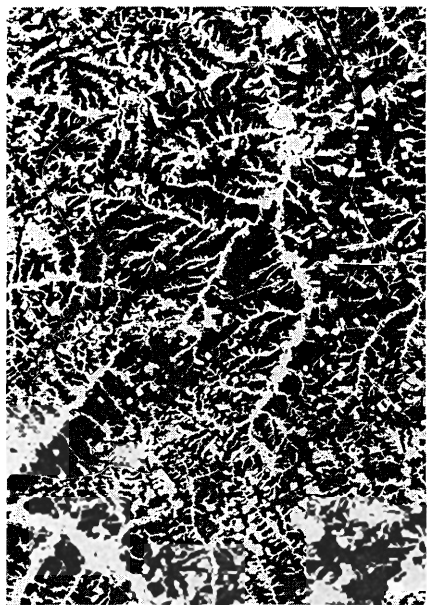


Рис. 5.8. Эрозионный рельеф Центральной Черноземной области. Весенний снимок со спутника *Landsat* в ближней инфракрасной зоне

гребенные речные долины и составлена схема палеодолин Восточной Сахары. Исследование погребенных палеорусел важно для поисков подземных вод и россыпных месторождений.

На снимках четко отражается общая система эрозионного расчленения территории, особенно в степных районах весной и осенью, когда контуры балок с луговой или кустарниковой растительностью четко выделяются среди распаханых полей (рис. 5.8). Однако выделение таких форм линейной эрозии, как овраги, требует использования снимков очень высокого разрешения.

**Эоловый рельеф** находит яркое отображение на космических снимках во всем его разнообразии (рис. 5.9). Снимки позволяют изучать особенности образования и эволюцию различных форм эолового рельефа, выражающиеся в их рисунке, выявлять зависимость ориентировки форм от режима ветров и других условий. По повторным снимкам фиксируются участки интенсивного наступания песков — эоловой трансгрессии.

Космические снимки впервые позволили обнаружить цепи дюн — «сэфов» — в Северной Африке и Аравии протяженностью 150—300 км на участках в сотни тысяч километров, формирование которых связано с постоянными по направлению ветровыми потоками. Гряды дюн имеют высоту 50 м, ширину 500 м и отстоят

пи, Хуанхэ, рек бассейна Средиземного моря, побережья северных морей России. По повторным космическим снимкам исследована динамика дельт рек Каспийского бассейна — Терека, Сулака, Куры, обусловленная колебаниями уровня Каспия.

Космические снимки позволяют изучать и древние флювиальные формы. Например, по ним были отдешифрованы бывшие эрозионные протоки и дельты в ложбинах древнего стока, пересекающих Приобское плато, которые не удавалось проследить по другим материалам. По изображению на снимках старых русел сибирских рек выявлены связи между размерами меандра и водностью потоков и сделаны выводы о расходах воды в реках в прошлом.

По материалам радиолокационной съемки обнаружены по-

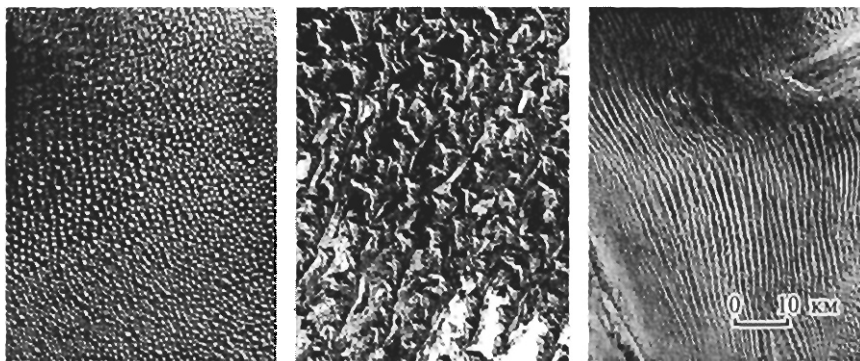


Рис. 5.9. Изображение различных типов эолового рельефа на космических снимках

друг от друга на 1—1,5 км; вершины их нередко осложнены системами более мелких форм, имеющих простираение вкрест основным. Сопоставление результатов дешифрирования эолового рельефа песков с изданными картами масштабов 1 : 500 000 — 1 : 1 000 000 показало несовершенство изображения песков на картах многих районов мира, где генеральное направление форм эолового рельефа не было отражено, поскольку оно маскировалось на местности и аэроснимках осложняющими эти формы деталями (см. рис. 3.2).

По снимкам выполняется анализ пылепесчаных потоков, которые особенно хорошо видны в прибрежных районах при переходе от поверхности суши к акватории. Динамика пылепесчаных потоков в течение нескольких суток прослежена в Северной Африке, Аравии по снимкам с метеорологических спутников. В Приаралье по снимкам исследуются пылесолевые выносы с осохшего дна Арала.

***Карстово-суффозионный и мерзлотно-термокарстовый рельеф.***

В некоторых случаях, главным образом через растительные индикаторы, хорошо отображается на снимках карстовый и просадочно-суффозионный рельеф. Примером могут быть системы просадочно-суффозионных западин, с которыми связана комплексность почвенного покрова на предгорных равнинах Западного Алтая. Эти формы, подчеркнутые различиями в состоянии посевов сельскохозяйственных культур, на космических снимках хорошего качества передаются даже лучше, чем на аэрофотоснимках.

Очень физиономичен мерзлотно-термокарстовый рельеф, характеризующийся массовым развитием термокарстовых озерных котловин и образующихся по мере зарастания озер аласов; хорошее отображение их на космических снимках позволяет не только четко выделять районы распространения термокарстового рельефа, но и анализировать стадии его развития, разделяя молодые фор-

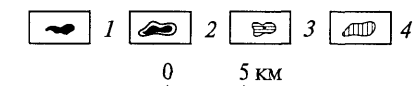
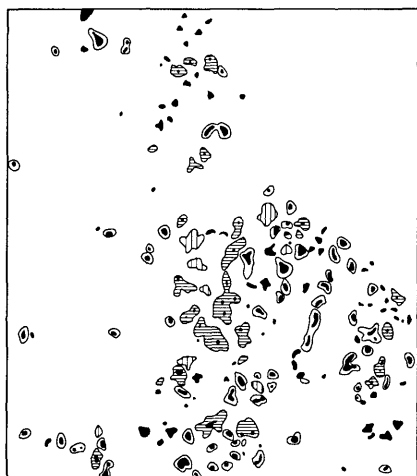


Рис. 5.10. Стадии развития мерзлотно-термокарстового рельефа по результатам дешифрирования снимка с космического корабля *Союз-22*.

1 — развивающиеся термокарстовые озера; 2 — деградирующие термокарстовые озера с каймой аласов; 3 — аласы с остаточными термокарстовыми озерами; 4 — сухие аласы

ты перестройки рельефа береговой зоны отмелых аккумулятивных берегов — формирование барьерно-лагунного комплекса, повсеместное образование лагун, а затем, при стабилизации и снижении уровня моря, — их обмеление и зарастание; расширение зоны тростниковой ветровой осушки и ее смещение в сторону суши. По снимкам залива Кара-Богаз-Гол прослежены стадии формирования современной морской солевой равнины в период падения уровня моря в 70-х гг. XX в. и отчленения залива плотиной в 1980 г., а затем заполнение залива после строительства водопропускных сооружений и ликвидации плотины в последующие годы.

Выше охарактеризована возможность и приведены примеры дешифрирования типов рельефа, обусловленных преимущественно экзогенными факторами. Не менее результативно дешифрирование эндогенного структурно-тектонического рельефа, охарактеризованное в разд. 5.3.1.

**Геоморфологическое картографирование.** На основе космических снимков разных уровней генерализации составляются гео-

мы — озерные термокарстовые котловины, зрелые — термокарстовые озера с каймой окружающих их аласов и дряхлые — сухие аласы с остаточными озерами или без них (рис. 5.10).

**Рельеф берегов.** На космических снимках хорошо разделяются типы берегов: абразионных, характеризующихся резкостью береговых линий, часто обусловленных тектонически, и аккумулятивных с их плавными формами. Четко выделяются формы берегового рельефа — пляжи, косы, бары, отчлененные ими лагуны. Нередко прослеживаются и древние береговые линии. По снимкам района Северо-Восточного Каспия удалось определить с большой детальностью береговые линии 1929, 1940, 1973, 1976 гг., зафиксированные в ландшафтах в период падения уровня моря. Проанализировано изменение рельефа берегов Каспия в 1977—1995 гг. в связи с подъемом его уровня, выявлены основные черты

морфологические карты в масштабе 1 : 200 000 и мельче, отражающие строение и взаимосвязи форм рельефа с морфоструктурами, раскрывающие особенности важнейших этапов рельефообразования, дающие всестороннюю характеристику экзогенных процессов и их связи с эндогенными. Такие карты входят в комплект государственных карт геологического содержания, создаваемых в масштабах 1 : 200 000 и 1 : 1 000 000, для составления которых по космическим снимкам готовят специальную «дистанционную» («фактографическую») основу. С использованием космических снимков получил основательное развитие морфоструктурный анализ рельефа. Эти возможности космических снимков реализованы при создании по ним первой геоморфологической карты мира масштаба 1 : 15 000 000 в серии карт для высшей школы (1988) и геоморфологических карт СССР масштаба 1 : 2 500 000 (1987) и 1 : 4 000 000 (1989).

## 5.4. Исследования биосферы

### 5.4.1. Почвенный покров

Применение космических материалов в исследованиях почвенного покрова охватывает две основные группы задач: одна связана с изучением структуры почвенного покрова и почвенным картографированием, а другая — с изучением динамических свойств почв, гумусности, влажности и других, включая развитие неблагоприятных процессов, таких, как засоление, эрозия почв, а также с разработкой основ почвенного космического мониторинга.

**Изучение структуры почвенного покрова и почвенное картографирование.** Типы почв по космическим снимкам можно дешифровать по прямым дешифровочным признакам лишь на распашанных землях или полях со всходами зерновых и пропашных культур высотой до 10—20 см, или на слабо покрытых растительностью (до 10—15 %) территориях. Фототон изображения почв разного типа меняется от белого тона изображения солончаков и песков и почти белого у пустынных почв — сероземов, буроземов, а также у светло-каштановых до почти черного тона изображения черноземов. Однако при этом на снимках отражается лишь верхний горизонт почвы. Кроме того, очень большое влияние на изображение почв оказывает их состояние в момент съемки, особенно влажность. Это осложняет определение по снимкам типов почв по прямым признакам даже в случаях изображения распашанных земель.

Значительно чаще почвы дешифрируют через косвенные индикаторы — рельеф, растительность (естественную или культурную), — отражающие структуру почвенного покрова и качество



Рис. 5.11. Комплексность почвенного покрова на подгорной равнине Западного Алтая, проявляющаяся благодаря более раннему развитию посевов в увлажненных западинах. Снимок с орбитальной станции *Салют*

почв, их плодородие. При этом на ранних фазах развития растительность не скрывает, а напротив, подчеркивает особенности распределения и структуры почвенного покрова (рис. 5.11).

Косвенными признаками почв иногда служат хозяйственное использование территории, размеры и нарезка полей, типы ведения сельского хозяйства. Так, почвозащитные противодефляционные севообороты с полосной системой размещения сельскохозяйственных культур, опознаваемые на космических снимках, индицируют легкие по механическому составу почвы — супесчаные, легкосуглинистые; их можно наблюдать в Предкавказье, в степях Казахстана (рис. 5.12). На южных склонах хребта Тарбагатай и северных склонах Джунгарского Алатау по размещению пахотных угодий точно выявляются на космических снимках те

участки степных низкогорий, которые перекрыты лёссовым плащом и характеризуются хорошо развитыми почвами. В то же время



Рис. 5.12. Противодефляционные полосные посевы в Северном Казахстане. Снимок со спутника *Ресурс-Ф*





особенности для малообжитых и слабо исследованных ранее в почвенном отношении северных районов Европейской России, Сибири и Северо-Востока. По космическим снимкам составлены карты почвенного покрова многих стран, ранее не имевших их — Судана, Индии, Китая, Аргентины и др. Международное общество почвоведов начинает работы по созданию почвенной карты мира масштаба 1 : 1 000 000.

**Исследование динамических свойств почв и контроль неблагоприятных процессов.** Вследствие усиливающегося воздействия человека на почвы появляется потребность в оперативном изучении динамических свойств почв, испытывающих изменения в связи с их использованием, а также в контроле неблагоприятных процессов для планирования и проведения мелиорации почв. К таким свойствам относятся гумусность, засоленность, влажность, эродированность, которые начинают изучать по космическим снимкам не только на качественном, но и на количественном уровне. Эродированность почв отражается благодаря развитию форм водной эрозии. Плоскостной смыв обуславливает чередование на снимках светлых пятен смытых почв на выпуклых участках склонов и темных пятен намывных почв в понижениях. Дефляция отражается благодаря наличию светлых пятен выдувания почв, вытянутых по направлению ветров, и рисунку микроформ эолового рельефа. Для оценки эродированности почв в геоинформационных системах используется универсальное уравнение потери почв USLE (Universal Soil Loss Equalisation), учитывающее уклон, тип почв, тип растительности, осадки.

Хорошо выделяются на снимках засоленные земли: солонцы и солончаки в сухом состоянии имеют светлый тон, причем оптическая плотность их изображения зависит от степени засоления, для изучения которого целесообразно использовать многозональную съемку, так как засоление особенно хорошо отображается на снимках в голубой зоне. Хорошо отображаются пятна с выцветами солей в районах вторичного засоления.

По снимкам дешифрируется и избыточное увлажнение почв, проявляющееся, в частности, в потемнении фототона изображения.

Благодаря выразительному отображению неблагоприятных динамических свойств почв космические снимки представляют хороший материал для сельскохозяйственной оценки земель, для выявления территорий, нуждающихся в почвенной мелиорации, противоэрозионных мероприятиях и других мерах по предупреждению развития неблагоприятных процессов и борьбе с ними. Они могут быть использованы для разработки систем почвенно-мелиоративных мероприятий и контроля за их действенностью.

**Оценка влажности почв.** Для количественного изучения влажности почв недостаточно использования снимков в видимом диа-

пазоне. Для этих целей используют тепловые инфракрасные снимки и снимки в радиодиапазоне — микроволновые радиометрические и радиолокационные. Имеются экспериментальные разработки по дистанционному определению влажности почв путем регистрации гамма-излучения, правда лишь в самолетном варианте.

Метод контроля за влажностью почв с помощью тепловой инфракрасной съемки основан на фиксации различных температурных характеристик у почв с разным влагосодержанием. В Голландии, Англии, ФРГ выполнены исследования по установлению зависимости между регистрируемой со спутников температурой и определяемой на местности влажностью почв Западной Европы, зоны Сахеля в Африке и других районов. С получением в последние годы тепловых снимков достаточно хорошего разрешения (ETM+ — 60 м, ASTER — 90 м) и выполнением этими системами съемки в среднем инфракрасном диапазоне эти возможности расширились.

Метод пассивной микроволновой съемки также используется в нашей стране и США для оценки влажности почв и грунтов. Этот вид съемки в самолетном варианте успешно применен для контроля за влажностью поливных земель в Средней Азии, Молдове. В перспективе, с повышением разрешения микроволновой съемки из космоса, — ее оперативное использование для этих целей. Развивается и методика применения радиолокации для определения характеристик влажности почв. На это направлены проводимые в Голландии, Бельгии исследования по сопоставлению снимков со спутников *ERS* с данными синхронных натуральных наблюдений. На Курском полигоне ИГ РАН получены уравнения регрессии между объемным содержанием влаги на глубине 0—10 см и отраженным радиолокационным сигналом для разных типов почв; использование таких зависимостей на разных глубинах позволило определять продуктивное содержание влаги в слое до 100 см.

**Определение гумусности почв.** Лабораторными исследованиями, начатыми еще в 50-х гг. XX в., установлены количественные связи между спектральной отражательной способностью почв и их составом, в первую очередь содержанием гумуса. Показано, что содержание гумуса от 0,5 до 10 % коррелирует с их спектральной яркостью, установлена экспоненциальная зависимость спектральных коэффициентов отражения от содержания гумуса.

Возможность контроля содержания гумуса в почвах по космическим снимкам для разных типов почв не одинакова. Удовлетворительная корреляция содержания гумуса и спектральных коэффициентов яркости сохраняется в пределах одного типа или подтипа почв в зонах подзолистых почв (с содержанием гумуса 1—1,5 %), светло-серых и серых лесных почв (где гумусированность пахотного слоя колеблется в пределах 4—5 %), темно-серых лесных почв (5—6 %), а также темно-каштановых (4—5 %) и кашта-

новых (2—3 %) почв, т.е. для почв с содержанием гумуса до 6 %. При малом содержании гумуса эта связь очень четкая, а при содержании более 3 % становится неопределенной. Таким образом, дистанционный мониторинг содержания гумуса возможен для почв лесной, лесостепной и сухостепной зон, и в меньшей мере для северной и южной периферии степной зоны. Центральная же часть степной зоны с черноземами мощными, тучными не дает такой возможности, поскольку уменьшение гумусности не вызывает снижения коэффициентов спектральной яркости почв.

Для определения гумусности почв по яркости изображения на снимках или по коэффициентам спектральной яркости используются связи, выявленные при анализе значительного объема наземных и лабораторных определений. Установлено, что связь спектральной яркости с содержанием гумуса оптимально аппроксимируется экспонентой. Используя экспоненту в качестве градуировочной кривой, можно пересчитывать коэффициенты спектральной яркости почв в величины гумусированности. Такое решение задачи реализовано на примере Курского полигона ИГ РАН. Следующим шагом должна стать отработка методики оперативного картографирования гумусности по космическим снимкам на основе количественных связей этого показателя с яркостью изображения.

#### 5.4.2. Растительный покров

**Изучение структуры растительного покрова и его картографирование.** Растительность, образующая внешний покров земной поверхности, в первую очередь отражается на космических снимках. Именно растительность является индикатором при дешифрировании почвенного покрова, форм рельефа, подстилающих пород и отложений, грунтовых вод, засоления и т.д.

На любых космических снимках, даже самых мелкомасштабных, хорошо разделяются залесенные и безлесные территории. В пределах этих территорий дифференциация типов лесной и безлесной растительности довольно слабая, однако снимки хорошо отражают вариации растительного покрова, вызванные изменением экологических условий: освещения, увлажнения, засоления и т.п. Например, среди сухостепной растительности хорошо различаются на снимках специфичные в изображении эдафические варианты степей (связанные с изменением грунтов): галофитные группировки на засоленных землях, псаммофитные степи песчаных массивов, петрофитные степи в районах мелкосопочника. Эта особенность делает снимки ценным источником для изучения сложной структуры растительного покрова. Карты растительности, составленные с использованием космических снимков, дают более полную информацию о структуре растительного покрова терри-

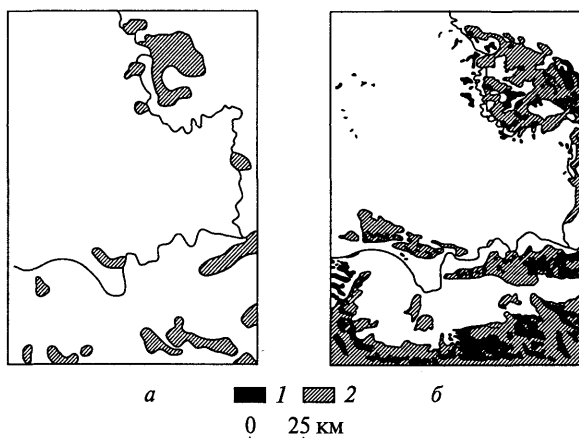


Рис. 5.14. Контуры сосновых лесов участка Центрально-Якутской равнины на изданной карте лесов масштаба 1 : 2 500 000 (а) и по результатам дешифрирования снимка с космического корабля *Союз-22* (б):

1 — сосновые леса; 2 — леса с примесью сосны

тории и отличаются существенно большей детальностью контуров (рис. 5.14).

Особенно ценно использование космических снимков для картографирования растительности труднодоступных районов. По ним созданы карты растительности маршей — приливно-отливной зоны прибрежных районов, мангровых лесов. Для картографирования болот в бореальных лесах Северо-Американского континента используется фотокарта из радиолокационных снимков со спутников *ERS* и *JERS*; такая же фотокарта создается на территорию Евразии для обеспечения проекта по оценке состояния лесов. Компьютерная обработка снимков со спутника *Landsat* позволила составить карты тундровой растительности оленьих пастбищ Аляски в масштабе 1 : 250 000.

Имеются примеры картографирования растительного покрова обширных территорий. По снимкам со спутника *Landsat* создана в цифровом варианте карта растительности США, в расчете на представление в масштабном ряду от 1 : 1 000 000 до 1 : 10 000 000. Обзорные снимки со спутников *NOAA* и создаваемые по ним карты вегетационного индекса послужили основой для составления карт лесов Европы, Африки, Юго-Восточной Азии, Южной Америки в масштабах 1 : 5 000 000 — 1 : 10 000 000 и анализа процессов обезлесивания на основе сопоставления разновременных снимков. Начат проект по созданию карт лесов Канады в масштабе 1 : 250 000, которые должны отразить их состояние в 1990 г. (ретроспективно, по снимкам *Landsat-5*), в 2000 г. (по снимкам *Landsat-7*) и изменения за этот период с перспективой продолжения картографи-

ческого мониторинга в дальнейшем с интервалом 5—10 лет. Для территории Евразии создается карта типов бореальных экосистем по данным *Vegetation/SPOT4* с детальной характеристикой соотношения хвойных и лиственных пород, которая является частью глобальной базы данных по земным покровам.

В связи с привлечением внимания к исследованиям Земли как системы большое значение имеет глобальное картографирование земных покровов, осуществляемое по обзорным снимкам. Из 17 типов выделяемых на них земных покровов 11 относятся к растительности. Базы данных и карты GLC (Global Land Cover) созданы на 1992—1993 гг. по материалам съемки *AVHRR/NOAA* и на 2000 г. по материалам *Vegetation/SPOT* с разрешением около 1 км. Предусмотрено их представление в разных масштабах на нескольких уровнях генерализации.

**Оценка растительных ресурсов.** Ресурсный аспект изучения растительности включает оценку ее продуктивности. Опыты в этом направлении, касающиеся растительности прерий и лесов в США и полупустынных и пустынных пастбищ в нашей стране, основываются на изучении их спектральной отражательной способности и нахождении корреляций между биомассой растительности и яркостью ее изображения на снимках. Оперативная оценка биомассы растительности базируется на определении таких спектральных характеристик, как вегетационный индекс, и других показателей, связанных с содержанием хлорофилла в растениях. Автоматизированная обработка снимков с околоземных и геостационарных метеоспутников позволяет получать производные изображения — карты вегетационного индекса с необходимой повторяемостью, проследить по ним за изменениями биомассы в разных районах и выходить на глобальные оценки. Карты вегетационного индекса создаются регулярно с 1988 г. по данным спутников *AVHRR/NOAA*, *Vegetation/SPOT*, *MODIS/Terra* и другим; совершенствуются картографируемые показатели: первоначальный вегетационный индекс VI сменил NDVI (нормализованный разностный вегетационный индекс), а затем EVI (усовершенствованный вегетационный индекс); составляются также карты листового покрытия LAI. Они используются для оценки биомассы суши в связи с исследованиями глобального углеродного цикла.

**Оценка состояния растительности.** Космические снимки представляют объективное средство контроля состояния растительности в районах интенсивного промышленного воздействия, где под влиянием промышленных выбросов в атмосферу растительный покров трансформируется вплоть до полной деградации. Особенно актуальна такая задача для северных районов с легко ранимой и трудно возобновимой растительностью. По космическим снимкам выделены зоны с разной степенью деградации растительности в районах действия медно-никелевых комбинатов в Мончегор-

ске, Печенга-Никеле, Норильске. Разработаны специальные алгоритмы компьютерной обработки снимков, в частности, с введением фенологической коррекции, т.е. с учетом различий в фенологическом состоянии растительных сообществ на снимках, сделанных в разные сроки периода вегетации растений, что весьма актуально для северных территорий. По разновременным снимкам выявлены особенности динамики растительности в зонах промышленного воздействия, например, обнаружена чрезвычайная изменчивость растительного покрова, сложное чередование участков его возобновления и гибели в зонах, пограничных с территориями полной деградации растительности.

Не обеспечивая полной таксационной информации о лесах — их породном составе, возрасте и полноте насаждений, бонитете и запасах древесины — космические снимки четко регистрируют лесопокрываемые площади и позволяют изучать динамику распространения лесов. Исследования изменений в распространении лесов за длительный период на основе сравнения картографических материалов середины XIX в. с современными космическими снимками выполняются для районов Европейской России и др. Эти работы показали, например, что за последнее столетие в северной части лесной зоны Европейской России и в лесостепной зоне площади лесов сокращаются, в южной они стабильны, а в западных районах даже увеличиваются.

**Геоботаническое районирование.** Мелкомасштабные снимки с метеоспутников, особенно зимние, на которых хорошо прослеживается макроструктура растительного покрова умеренных широт, используются для почвенно-геоботанического районирования крупных территорий. Например, имеется такой опыт районирования Западно-Сибирской низменности по обзорным зимним космическим снимкам. При этом по сравнению со схемами, составленными традиционными методами, удается наиболее полно учесть горизонтальную структуру почвенно-растительного покрова, что значительно повышает уровень детальности районирования и максимально приближает выявляемые границы к естественным природным рубежам.

Глобальное картографирование земных покровов, создание карт GLC послужило одной из основ для разработки глобальной карты экорегионов суши, на которой в рамках 14 биомов выделено 867 экорегионов, детально характеризующихся в базе данных. Эта карта и база данных рассматриваются как важное средство реализации стратегии сохранения биоразнообразия.

### 5.4.3. Животный мир

В отдельных случаях прямые спутниковые наблюдения используются для слежения за миграцией крупных животных, на теле

которых укрепляются радиопередатчики, передающие информацию о перемещении и состоянии животных. Такие эксперименты проводились с лосями, белыми медведями, касатками, тюленями, морскими черепахами. Но это экзотическое применение космических методов не является в зоогеографии основным.

Космические снимки, отражая природно-территориальные комплексы как различные местообитания животных, представляют оптимальную основу зоогеографического картографирования, объектом которого является совокупность определенного местообитания и его животного населения.

Преобразование геоботанической или ландшафтной карты в карту местообитаний животных (узловой) — наиболее ответственный и трудоемкий этап зоогеографического картографирования. Эти работы существенно облегчаются при использовании космических снимков высокого разрешения.

Опыт работы по снимкам степной части Приобского плато, полученным с орбитальной станции *Салют*, показал, что на них отражаются некоторые черты морфологической структуры местообитания, которые не удастся изучить по другим источникам. Распространение внутрь леса зоны опушечного эффекта в связи с фрагментарностью лесонасаждений на песках с эоловым рельефом объясняет широкое проникновение в глубь леса опушечных птиц.

Чередование сухих лишайниковых сосняков на грядах с заболоченными березняками в понижениях, благоприятное для лося и косули, делает понятным исключительно высокую численность этих животных в борах ложбин древнего стока на Приобском плато. Изображение балочных лесов позволяет локализовать места распространения иксодовых клещей и т. п.

Карта местообитаний, построенная с привлечением космических снимков, сможет служить исходной основой для создания взаимосогласованной серии карт животного мира, а также медико-географических карт — региональных и обзорных.

Большое практическое значение имеет использование карт вегетационного индекса, составляемых по снимкам со спутника *NOAA* на обширные районы Африки, Юго-Восточной Азии и Ближнего Востока для оценки биомассы растительности и ее изменений в местах возможного распространения саранчи. Данные об изменении биомассы повышают эффективность контроля за популяциями саранчи и используются международной организацией по борьбе с ней.

Наряду с таким региональным использованием космических снимков для зоогеографии важно создание глобальных карт, отражающих биоразнообразие, в частности уже упомянутой карты экорегионов мира, отражающей весь диапазон флоры и фауны материков и используемой для сохранения биоразнообразия.



#### 5.4.4. Ландшафты

Поскольку на космических снимках одновременно изображаются все компоненты природной среды и отражаются их взаимосвязи, они ценны для ландшафтоведения. Очень важно изучение по космическим снимкам ландшафтов как индикаторов других черт и свойств природы. Достаточно напомнить о ландшафтном индикационном методе дешифрирования, используемом при отраслевых и комплексных исследованиях природы, наиболее развитом в геологических, гидрогеологических, почвенных, криолитологических исследованиях. Особенно велика роль космических снимков в изучении региональной ландшафтной структуры, ее современных естественных тенденций — развития, антропогенных преобразований и динамики.

**Космические снимки как ландшафтные модели действительности.** Если в прошлом основной моделью в региональных ландшафтных исследованиях служила ландшафтная карта, составленная приближенно на основании синтеза отраслевых карт и маршрутных исследований с затратой большого труда, то с появлением региональных космических снимков ландшафтоведы получили в свое распоряжение другую, более точную, модель. Ее наиболее важные свойства: адекватность по геосистемной размерности объектам мелкомасштабных исследований — ландшафтам и вышестоящим единицам физико-географического районирования; целостность и структурная дифференцированность; отражение благодаря оптической генерализации главных свойств ландшафтной структуры; не только пространственная, но и пространственно-временная информативность; многоярусность, иерархичность, широкий охват диапазона геосистемных уровней.

**Изучение структуры ландшафтов.** Наиболее распространенные космические снимки с разрешением в несколько десятков метров — хороший материал для анализа ландшафтной структуры территории. Оказалось, что они скрадывают элементарные черты структуры ландшафтов фациального уровня и отчасти уровня подурочищ, отражая неоднородность строения ландшафтов на более высоких уровнях — урочищ и местностей. Это свойство космических снимков придает им особенную ценность при выявлении внутреннего единства ландшафтов на основании структурно-морфологического анализа.

Эксперименты, выполненные в районах Балхаш-Алакольской впадины и Северо-Тургайской степи, позволили отработать методику анализа ландшафтной структуры по космическим снимкам с использованием критериев контрастности изображения морфологических составляющих ландшафтов, их спектральных образов, структуры и рисунка космического изображения как морфологической памяти ландшафта, географического соседства, структу-

ры сельскохозяйственных угодий. Последний признак, особенно ярко проявляющийся на снимках из космоса, способствует развитию сельскохозяйственной индикации ландшафтов. Каждому виду ландшафтов свойственно особое плановое размещение сельскохозяйственных угодий, свой тип землеустройства, что ясно прослеживается не столько на местности, сколько на космических снимках. Через структуру угодий читаются как рельеф, так и ландшафты в целом. Карты, создаваемые по космическим снимкам, заметно отличаются большей точностью и детальностью изображения ландшафтной структуры от составлявших ранее.

**Исследование динамики ландшафтов.** По космическим снимкам вместе с морфологией ландшафтов выявляется и их динамическое состояние — определяется остепенность лесов и пойменных лугов, стравленность пастбищ, эродированность пахотных земель. Установление динамической фазы, в которой находится природный комплекс, — необходимый этап для выработки рекомендаций по рациональному использованию земель и их мелиорации. Анализ динамики ландшафтов возможен даже по материалам одноразовой съемки с учетом пространственно-временных рядов развития ландшафтов.

Для выявления многолетних тенденций развития ландшафтной структуры регионов используют сопоставление разновременных космических снимков или современных снимков со старыми картами (например, среднемасштабными обзорно-топографическими картами, созданными 40—50 лет назад). Такой анализ динамики ландшафтов Прибалхашья и Алакольской впадины за 1940—1970 гг. показал увеличение гидроморфизма прибрежных районов озер Балхаш и Алаколь, возрастание роли солончаковых комплексов, появление новых ландшафтов пустынь с «чуротами» и фильтрационными озерами. Эти изменения связаны с трансгрессией озер Балхаш и Алаколь и подъемом уровня грунтовых вод.

Космические снимки — объективный источник сведений об антропогенных преобразованиях и нарушении ландшафтов. Ландшафтные карты, созданные по космическим снимкам, оказываются существенно богаче карт, составленных при маршрутно-ключевых наземных исследованиях. Материалы космической съемки обеспечивают составление специализированных эволюционно-динамических ландшафтных карт, ценность которых особенно велика для решения задач рационального использования земель и охраны природы.

**Физико-географическое районирование.** Съемка земной поверхности из космоса дает хороший материал для физико-географического районирования. Интегрированное космическое фотоизображение географической оболочки позволяет физико-географам дополнить традиционный компонентный подход к выявлению и изучению природных регионов ландшафтно-структурным (геоком-

плексным). Региональные ландшафтные структуры, представляющие собой закономерные пространственные и генетические сопряжения разнородных ландшафтов, должны стать важными показателями в физико-географическом районировании. По космическим фотоснимкам возможно как качественное, так и количественное математико-статистическое их изучение.

## 5.5. Социально-экономические исследования

### 5.5.1. Сельское хозяйство

Космические снимки используются и для решения задач, связанных с хозяйственной деятельностью, прежде всего с сельскохозяйственной. Полученные с космических кораблей фотографические снимки отличаются от карт в первую очередь изображением прямоугольников полей, сетчатой структуры земельных массивов. Острая необходимость в инвентаризации сельскохозяйственных земель в сочетании с яркой выраженностью сельскохозяйственных угодий на снимках обусловили тот факт, что самые ранние примеры географического применения космических снимков были связаны с использованием земель — это карта юго-запада США, составленная по снимкам с космических кораблей *Geminy* и *Apollo* и изданная в 1969 г. Сельскохозяйственные задачи в 70-х гг. XX в. заняли ведущее место в программе ресурсного спутника *Landsat*. При систематической повторяемости съемок он обеспечивал наблюдение за динамикой развития сельскохозяйственных культур и прогнозирование урожайности. Большой объем информации и требование оперативности стимулировали развитие компьютерных методов обработки космических снимков при сельскохозяйственных исследованиях.

В применении космических методов для сельского хозяйства выделилось несколько направлений: определение состава и состояния посевов сельскохозяйственных культур, оценка биомассы, прогноз урожайности и разработка для этого автоматизированных сельскохозяйственных информационных систем; изучение и оценка пастбищных ресурсов; инвентаризация и картографирование земельных угодий, изучение динамики сельскохозяйственного использования земель; контроль за проведением агротехнических мероприятий; изучение систем земледелия, типов организации сельскохозяйственной территории.

**Определение состава сельскохозяйственных культур.** Состав культур выявляется по материалам многозональных съемок или повторных съемок в течение сезона вегетации, или на основе использования как многозональной, так и многовременной информации, что повышает надежность дешифрирования. Разделение

сельскохозяйственных культур по многозональным сканерным снимкам выполняется с использованием известных характеристик спектральной отражательной способности культур или на основе анализа эталонных участков с известными культурами, причем основные зерновые культуры (озимая пшеница) выявляются с очень высокой точностью (98 %). Наиболее разработана методика опознавания посевов пшеницы, кукурузы, сои.

Методика дешифрирования разновременных снимков опирается на знание временного хода спектральной яркости культур или на многолетние фенологические данные о развитии культур, сроках прохождения основных фенофаз развития (сельскохозяйственного календаря) с учетом метеорологических условий года съемки.

**Оценка состояния посевов, биомассы, прогнозирование урожайности.** По снимкам высокого разрешения возможно распознавание состояния посевов — сомкнутости, пятнистости, пожелтения в связи с засухой, полегания, повреждения вредителями. Оценка состояния посевов по снимкам в тепловом диапазоне и радиолокационным снимкам позволяет судить о степени изреженности посевов, недостатке воды в растениях.

Экспериментальными работами установлена линейная корреляционная зависимость между наземной растительной массой и урожаем озимой пшеницы, исследованы связи между величиной биомассы и урожаем хлопка-сырца. Полученные уравнения связи используются для прогноза урожая хлопка. Для характеристики биомассы растительного покрова используют различные вегетационные индексы (VI, NDVI, EVI), которые получают на основе анализа спектральной яркости в красной и ближней инфракрасной зонах. Составляемые регулярно с 1982 г. по снимкам со спутников *NOAA* карты вегетационного индекса применяются для мониторинга состояния посевов в условиях развития засушливых явлений.

Примером использования космических методов для решения задач оценки состояния сельскохозяйственных культур и прогноза урожая является эксперимент LACIE (Large Area Crop Inventory Experiment) по оценке урожая на больших площадях, выполнявшийся в середине 70-х гг. XX в. в серии подобных экспериментов в рамках программ спутника *Landsat*. Основная задача эксперимента — разработка методики дистанционной оценки площадей, состояния посевов и прогноза урожая пшеницы для крупных регионов. Пшеница выбрана как важнейшая продовольственная культура и в связи с тем, что по отношению к ней проще решаются задачи распознавания. Прогноз урожая базируется на оценке площадей под пшеницей; в модели учитываются метеорологические условия года наблюдений. Для контроля точности прогноза привлекались наземные данные по ключевым участкам на террито-

рии США, которые служили для оценки погрешностей и промежуточной коррекции с целью повышения надежности прогноза.

Сопоставление результатов обработки данных по пшенице для США, Канады и нашей страны показало, что на российской территории задача распознавания и прогноза урожая решается значительно более надежно благодаря большим размерам и регулярной нарезке полей. Предварительная оценка совпала в пределах 6 % с данными об урожае пшеницы, а уточненная после анализа имела погрешность всего 1 %. Для Канады и США погрешность составляла соответственно 15 и 20 %. На территории отдельных штатов в США эксперимент выполнялся и для кукурузы и сои, но с менее успешным результатом (достоверность для кукурузы до 80 %, для сои еще ниже).

В странах Европейского экономического сообщества снимки со спутника *SPOT* используются для контроля за состоянием сельскохозяйственных угодий и урожайностью с целью определения размера помощи фермерам. По снимкам за две даты, соответствующие важнейшим фенофазам развития основных культур, при минимальном объеме наземных работ выполняется компьютерная классификация культур. Погрешность распознавания зерновых по этим снимкам составляет 4 %.

**Изучение и оценка ресурсов пастбищ.** Космические снимки, как следует из обзора их геоботанического применения, пригодны для изучения растительности пастбищ и их инвентаризации. Выполняется оценка биомассы пастбищной растительности прерий США, саванн Африки на основе картографирования вегетационного индекса по данным спутников *NOAA*. По снимкам со спутника *Landsat* впервые на основе их компьютерной обработки проведена инвентаризация и составлены карты оленьих пастбищ Канады, Аляски, Гренландии. В Средней Азии отработана методика оценки состояния пастбищ по снимкам с метеорологических спутников, используемым для определения оптимальных маршрутов перемещения скота.

**Инвентаризация и картографирование земельных угодий.** Снимки высокого разрешения со спутников *Ресурс-Ф*, по опыту Всесоюзного института сельскохозяйственных аэрофотогеодезических изысканий (ВИСХАГИ), обеспечивают составление карт сельскохозяйственных угодий, земельно-кадастровых карт, фотопланов землепользования в масштабах вплоть до 1 : 50 000 и 1 : 25 000. Возможность периодического повторения космических съемок позволяет решить вопрос о регулярном обновлении карт земельных угодий, что крайне важно в связи с их быстрым устареванием. Создаются и обзорные карты земельных угодий на территорию страны и мира; впервые они были составлены в серии карт для высшей школы. Для этого выполнено эталонное дешифрирование угодий на снимках в различных природных и сельскохозяйствен-

ных районах, выявлены признаки разных типов сельскохозяйственных земель; использовалось районирование территории по структуре изображения, характерной для различных типов сельскохозяйственных земель.

В США отработано компьютерное составление по многозональным снимкам со спутника *Landsat* карт земных покровов и использования земель (land cover/land use), на которых выделяются земледельческие массивы, пастбища, леса и т. п. в соответствии со специально разработанной классификацией (классификация Андерсена, предусматривающая выделение от 9 до 116 типов использования земель на разных масштабных уровнях). Такие карты в США составлены для всех штатов.

Космические снимки используют для пополнения сельскохозяйственной статистики и ее регулярного обновления. Сельскохозяйственная администрация Европейского экономического сообщества инициировала работы по проекту, связанному с использованием снимков *SPOT* для этих целей; по этим снимкам получают данные о площадях под культурами разной экономической значимости, продуктивности этих культур, их используют для прогноза урожайности как в странах ЕЭС, так и вне его. Космические методы должны обеспечить сбор статистических данных о сельскохозяйственных площадях в мировом масштабе для международных организаций (например, ФАО). С этой целью для девяти регионов земного шара разработаны таблицы по семи типам землепользования и 25 основным сельскохозяйственным культурам мира. Сведения о земельных угодьях, их площадях, типах сельскохозяйственных культур и площадях, занятых под ними, можно получать непосредственно по снимкам при их компьютерной обработке и без составления традиционных карт.

**Изучение систем земледелия.** Различия в структуре изображения хозяйств разной производственной направленности, например преобладание рисунка пашен в районах зерново-животноводческого направления со стойловым содержанием скота и отсутствие рисунка пашен в районах животноводческого направления с пастбищным содержанием скота, свидетельствуют о возможности использования космических снимков для анализа особенностей сельскохозяйственного производства в масштабах отдельных стран и мира.

Выразительный рисунок сельскохозяйственных угодий делает снимки хорошей основой для сельскохозяйственного районирования территории, которое обычно выполнялось с использованием материалов сельскохозяйственной статистики и получило теперь возможность точной территориальной привязки статистического материала.

Работа с космическими снимками, четко отображающими сельскохозяйственную деятельность в единстве с природной средой,

вызвала к жизни учение о природно-производственных агроландшафтных системах, являющееся основой для разработки рекомендаций по повышению эффективности их использования.

Таким образом, информация космических снимков не ограничивается оперативными сведениями о состоянии посевов сельскохозяйственных культур, а включает широкий круг вопросов, таких, как формы территориальной организации сельского хозяйства, применяемые системы земледелия, производственная направленность хозяйств, что дает возможность проводить многосторонний анализ особенностей сельскохозяйственного производства обширных территорий.

### 5.5.2. Лесное хозяйство

С 40-х гг. XX в. аэрофотометоды традиционно применяются в лесном хозяйстве; в 70-х гг. к ним добавились космические методы. Основные направления их применения — инвентаризация лесов, мониторинг лесных пожаров, контроль за порядком лесопользования и восстановлением лесов, воздействием стихийных бедствий, насекомых-вредителей, промышленных выбросов.

**Изучение лесного фонда и инвентаризация лесов.** Лесной фонд нашей страны изучен пока недостаточно — он имеет лесоустройство, осуществляемое методами наземной таксации в сочетании с дешифрированием аэрофотоснимков, на площади немного более 50 %, остальная часть обследована упрощенными аэротаксационными методами. Материалы космической съемки позволяют восполнить этот пробел. Не охваченные лесоустройством резервные леса европейского Севера, Сибири и Дальнего Востока, более однородные, чем леса освоенных районов, и менее подвергнутые антропогенному воздействию, исследуются по снимкам из космоса с выборочным производством аэрофотосъемки. Таким образом, осуществляется дифференцированный подход к изучению и картографированию лесного фонда с выделением двух зон: а) лесоустройства, с выполнением работ на местности — для районов интенсивного хозяйственного освоения и б) лесоинвентаризации для территории, лесной фонд которой не намечается в ближайшие годы вовлекать в активную лесопромышленную или лесохозяйственную деятельность. Для лесоинвентаризации используются два основных метода — фотостатистической и картографической инвентаризации; оба они связаны с применением космических снимков в комплексе с другими методами.

*Фотостатистическая инвентаризация* основана на сплошном дешифрировании космических снимков, по которым осуществляется стратификация территории (разделение ее на однородные выделы-страты), и на дешифрировании выборочных участков небольшой площади (1 га) по аэроснимкам масштабов 1:5000—

1 : 10 000 (так называемых фотопроб) для получения средних таксационных характеристик (высота, диаметр крон, сомкнутость полога) по стратам и для контроля правильности дешифрирования космических снимков. Часть фотопроб обследуется на местности. В результате составляются планы лесонасаждений и карты лесхозов в масштабе 1 : 50 000 — 1 : 100 000.

*Картографическая инвентаризация* (без определения таксационных показателей) также основана на дешифрировании космических снимков, сопровождаемом выборочным аэровизуальным и наземным обследованием. Она завершается составлением тематических карт лесов масштабов 1 : 100 000 — 1 : 200 000.

Таким образом, предусматривается трехступенчатый метод получения информации: космическая съемка — выборочные аэрофотосъемки — выборочные наземные обследования. Такая методика обеспечивает большой экономический эффект. Сходные методы обновления данных инвентаризации лесов используются в Финляндии и Канаде.

**Контроль за состоянием лесов.** Космическая съемка позволяет организовать регулярное слежение за состоянием лесов, включая регистрацию изменений в лесном фонде — благоприятных и неблагоприятных, под воздействием природных факторов и в результате хозяйственной деятельности. Это создает основу для контроля за хозяйственным воздействием на лес, оценки соблюдения нормативов при использовании лесных ресурсов.

Космические снимки высокого разрешения, по которым выявляются контуры вырубок, позволяют контролировать выполнение правил рубок (соответствие фактических мест рубок проекту эксплуатации лесов, размеры лесосек, их направление по отношению к склонам), следить за лесовосстановлением на старых вырубках.

Учет лесных площадей, подвергшихся воздействию стихийных бедствий, обычно требует применения крупномасштабных аэроснимков. По ним дешифрируются ветровалы, повреждения лесов энтомовредителями. Космические снимки в этих целях используются лишь в отдельных случаях.

**Охрана лесов от пожаров.** Большую роль играют космические съемки в деле охраны лесов от пожаров, помогая разумно использовать лесную авиацию, насчитывающую только в нашей стране тысячи самолетов и вертолетов. По снимкам с метеоспутников выполняется прогнозирование пожароопасной обстановки в лесу в связи со сходом снежного покрова. Данные о динамике его схода позволяют экономить средства на полеты противопожарной авиации. Прогнозирование районов возможного возгорания лесов производится путем дешифрирования грозовой облачности. По снимкам выявляется и конвективная облачность, перспективная для вызывания искусственных осадков при борьбе с пожарами. Созда-



ны автоматизированные системы по охране лесов от пожаров, составлению оперативных карт координат пожаров и площадей гарей.

Крупные лесные пожары надежно дешифрируются на снимках с метеорологических спутников малого и среднего разрешения по дымовым шлейфам, однако оперативные задачи обнаружения и организации тушения пожаров на ранних стадиях их возникновения по ним не решаются. Для этого используется многозональная информация в среднем и тепловом инфракрасном диапазоне, обеспечиваемая системой MODIS/*Terra*. Крупные пожары регистрируются датчиками среднего и теплового инфракрасного диапазона даже с геостационарных спутников. В числе продуктов первичной обработки снимков MODIS предусмотрено создание фотокарт очагов возгорания, оперативно выставляемых в Интернете. Таким образом практически реализован мониторинг лесных пожаров.

### 5.5.3. Расселение

**Выявление границ городов и их изменений.** Космические снимки высокого разрешения в комплексе с материалами аэросъемки позволяют решать многие задачи изучения и картографирования городов, прежде всего определение фактических границ городов и их изменений. Изучение городов активизировалось появлением материалов со спутника *SPOT*, в первый год работы которого была выполнена съемка всех столиц мира. В ФРГ по снимкам со спутников *Ресурс-Ф*, *SPOT*, *Landsat* определен природный природный площади городов и транспортных магистралей за 1981—1989 гг., составлены карты динамики городских площадей. По космическим снимкам делаются попытки определения численности населения в городах на основе установленных эмпирических зависимостей между численностью населения и выявляемой по снимкам площадью городов разных типов.

**Изучение использования городских земель и его динамики.** Интенсивно развиваются исследования по применению космических снимков для изучения использования земель в городах и вокруг них. В США был инициирован проект по инвентаризации городских земель для определения по космическим снимкам изменений после переписи 1970 г. В рамках этой программы первоначально была проведена высотная аэросъемка 26 городов, чтобы иметь базовые снимки для последующих сравнений. Их сопоставление с первыми снимками с ресурсного спутника *ERTS* 1972 г. дало возможность отработать дешифровочные признаки для определения по космическим снимкам основных категорий городских земель (жилых, промышленных, торговых, деловых, рекреационных и т.д.). Для мониторинга изменений в использовании городских зе-

мель разработана методика автоматического составления карт использования городских земель за разные сроки и изучения динамики использования городских земель с получением по снимкам статистических данных. Один из результатов — карты Вашингтона с выделением 11 категорий городских земель. Подобные данные для других городов должны лечь в основу Атласа динамики городов США.

Внутри городов разделяются районы с разной густотой застройки, выделяющиеся даже на сканерных снимках с ресурсных спутников. Имеется опыт определения динамики густоты застройки в Москве по снимкам, полученным системами «Фрагмент»/Meteor-30 и MSS/Landsat с интервалом 5 лет.

Хорошее отображение зеленых массивов и других рекреационных объектов города, густоты застройки, расположения промышленных зон дает возможность использовать снимки для оценки условий жизни населения. Появление оперативной космической съемки очень высокого разрешения расширяет перспективы изучения городов вплоть до решения актуальных транспортных проблем. Правительство Москвы, например, опробует применение для этих целей снимков со спутника *Ikonos*.

**Изучение производственно-функциональных типов населенных пунктов и систем расселения.** Исследования по определению производственно-функциональных типов сельских поселений основаны на том, что по снимкам выявляются планировочные особенности населенных пунктов, их расположение относительно транспортных путей, изображаются природные особенности и различные объекты хозяйственной деятельности на окружающих территориях (сельскохозяйственные поля, лесозаготовки, карьеры добычи минерального сырья и т.п.), а также транспортные связи с ними.

Одно из нетрадиционных направлений использования космических снимков состоит в изучении по ним систем населенных пунктов. Анализ снимков позволяет выделить взаимосвязанные группы поселений, местные центры и ареалы их влияния, линии раздела связей, т.е. сложившиеся системы населенных пунктов.

Интересную информацию о населенных пунктах дают космические снимки, полученные в ночное время. На снимках с военных метеоспутников США *DMSP* четко видны огни городов и рисунок городских огней хорошо отображает распределение плотности населения (рис. 5.15). Имеются программы экспериментов по определению потребностей в энергии на основании сравнения освещенности городов по космическим снимкам. Кроме световых полей городов изучаются также тепловые поля и зоны пониженного альбедо снега вокруг городов, особенно четко выраженные в весенний период. Тепловая инфракрасная съемка показывает города как значительные по площади «горячие острова», имеющие



Рис. 5.15. США ночью по материалам съемки со спутника *DMSP*

тепловые контрасты с окружающим фоном до нескольких градусов, что, в частности, ускоряет сход снежного покрова.

Таким образом, космические снимки представляют новый источник для изучения расселения, хотя, разумеется, они не могут заменить традиционных статистических материалов, без анализа которых невозможно получение информации о демографических, этнографических и социально-экономических особенностях структуры населения.

## **5.6. Антропогенное воздействие на природную среду и экологические задачи**

**Отображение воздействия человека на природу.** Многие виды антропогенного воздействия на природную среду хорошо передаются на снимках. Своеобразное выражение имеет промышленное, селитебное, сельскохозяйственное воздействие на природу. Дешифрируются места открытой добычи полезных ископаемых: карьеры и горные выработки, отстойники и хвостохранилища обогатительных предприятий горно-добывающей промышленности, отображаются другие виды промышленного природопользования. Застроенность городских и пригородных земель, густота застройки находят отображение на снимках и могут быть количественно определены по ним. Сельскохозяйственная деятельность выявляется по распаханности территории, сетке сельскохозяйственных полей, размеры, форма и плотность изображения которых позволяют судить

о формах земледелия, производственной направленности хозяйств, возделываемых культурах, применяемых севооборотах и т. п. На снимках отображаются не только сами формы хозяйственной деятельности, но и различные изменения природной среды, связанные с этой деятельностью. К неблагоприятным изменениям относятся: эродированность почв, проявляющаяся благодаря чередованию пятен осветленных смытых и темных намытых почв, развитие эрозионного рельефа, ветровой эрозии. Очень четко проявляется пастбищная дигрессия, особенно сбитость пастбищ в местах перевыпаса у источников воды, вокруг колодцев. Выявляются на снимках и нарушения лесной растительности: вырубленность лесов, следы лесных пожаров в виде гарей, замена коренных лесообразующих пород менее ценными вторичными породами в результате несоблюдения мероприятий по лесовосстановлению после вырубок и лесных пожаров. Вокруг городов на зимних снимках выделяются зоны загрязнения снежного покрова. Определяются зоны повреждения растительности дымами промышленных предприятий, деградации растительности вокруг площадок нефтескважин и линий нефтепроводов, сброса промстоков в водоемы.

Выявляются на космических снимках и формы благотворного воздействия человека на природную среду, его деятельность, направленная на восстановление утраченных природных богатств или улучшение неблагоприятных условий. Дешифрируются системы лесополос, оросительные системы, применение таких мер агротехнического воздействия, как противоэрозионные севообороты, полосные посевы, полевые севообороты с выводным клином паров или многолетних трав, результаты рекультивации карьеров и отстойников.

Благодаря четкой фиксации рассмотренных особенностей использования и охраны природы снимки могут выполнять ревизионную роль, т. е. применяться при контроле за отрицательным антропогенным воздействием и за мероприятиями по восстановлению природных богатств, в частности по рекультивации земель, лесовозобновлению и т. п.

В разработанном в Московском университете атласе «Космические методы геоэкологии» (1998) освещены методические вопросы использования космической информации в различных направлениях геоэкологических исследований.

**Загрязнение воздуха.** На снимках хорошо выделяются дымовые факелы крупных заводов, а в зимних условиях заметна зона общего задымления и загрязнения атмосферы над крупными городами и промышленными районами. Космическими съемками выявлены ареалы мощных дымовых загрязнений атмосферы вокруг городов, получены ранее неизвестные данные о региональных перемещениях дымовых облаков на сотни и даже тысячи километров от источников дыма.

Хорошим индикатором распространения загрязнения служит снежный покров вокруг городов. Он представляет собой естественный накопитель загрязняющих веществ, выпадающих из атмосферы в сухом виде или с осадками. При сопоставлении спутниковых и наземных наблюдений установлена четкая зависимость яркости изображения снега на снимке от степени загрязнения его поверхности. Снижение альбедо от 0,70—0,90 для чистого снега до 0,20—0,30 для загрязненного позволяет выделить на зимних снимках с метеоспутников зоны влияния промышленных центров и городов. Это сделано для всех городов нашей страны, для некоторых из них прослежена динамика загрязнения за 5 лет и в результате составлена карта ореолов загрязнения на всю страну. Сопоставление площадей городов с размерами зон их влияния показывает, что зона загрязнения снега вокруг города многократно превышает его площадь.

**Загрязнение вод.** На снимках из космоса фиксируются выбросы в водоемы стоков промышленных предприятий, содержащих минеральные взвеси. Так, сброс в оз. Имандра нефелиновой пульпы обогатительных фабрик комбината «Апатит», как следует из анализа снимков, сделанных в 1978 г., загрязнял почти всю акваторию озера. Снимки 1986 г. и более поздние показывают, что перевод фабрик на внутренний водооборот существенно улучшил ситуацию.

Тепловые инфракрасные снимки фиксируют температурные аномалии в акваториях, примыкающих к городским агломерациям, связанные с тепловым воздействием сточных вод от городов. Повышение температур вод может быть вызвано биохимическими реакциями (при сбросе канализационных вод), сбросом вод энергосистем и т. д. Нефтяные пленки также могут отличаться температурой от окружающей водной поверхности. Однако пока нерешенной проблемой остается определение качественного и количественного состава загрязнителей. Такой поиск ведется на основе изучения их оптических характеристик.

**Проблема истощения озонового слоя.** Истощение озонового слоя, защищающего Землю от жесткого ультрафиолетового излучения, появление «озоновой дыры» над Антарктидой обнаружено по данным наземных и космических спектрометрических наблюдений в ультрафиолетовом диапазоне, проводившихся с 1972 по 1989 г. с помощью аппаратуры TOMS/*Nimbus-7*, а с 1990 г. — со спутника *Метеор-3*. По данным спектрометрирования строятся компьютерные глобальные ежедневные карты распределения озона в стратосфере, позволяющие давать оперативную оценку областей разрушения озонового слоя, исследовать их сезонную и годовую динамику.

**Оценка биомассы суши и океана.** Серьезные глобальные экологические проблемы связываются с нарушениями углеродного цик-

ла, увеличением концентрации углекислого газа в атмосфере, что приводит к нарушению теплового баланса Земли на основе «парникового эффекта». Поэтому распределение биомассы суши и океана и его нарушения, важные сами по себе как показатель биопродуктивности Земли, учитываются и при оценках углеродного цикла. Космические исследования обеспечили данные для таких оценок в виде карт вегетационного индекса (получаемых по результатам съемки AVHRR/NOAA, MODIS/Terra и с геостационаров), коррелирующего с показателями фитомассы суши, и карт цветового индекса океанов (получаемых по данным CZCS/Nimbus-7, SeaWIFS/SeaStar), коррелирующего с концентрацией фитопланктона. Последние представляют большой интерес и для оценки условий жизни в океане, и для оценки океана как источника продуктов питания и регулятора содержания углекислого газа в атмосфере.

**Исследование опустынивания, обезлесения, техногенного воздействия на природную среду.** Космические снимки представляют эффективное средство прослеживания за процессами опустынивания, принимающими теперь характер глобальной проблемы, например, опустынивание африканских саванн зоны Сахеля. Угрожающий характер имеют эти процессы и в аридных районах нашей страны, используемых для пастбищного животноводства, где неумеренная пастбищная нагрузка приводит к развитию характерного для таких районов приколлодезного опустынивания — вытаптыванию и сбою растительного покрова, развеиванию почв вокруг колодцев, водопоев, стоянок скота. Очаги приколлодезного опустынивания в Северном и Восточном Прикаспии, а также на плато Устюрт, в Каракумах и других пустынных районах обуславливают особую пятнистую структуру изображения пустынь, прослеживаемую не только на детальных снимках, но даже на снимках среднего разрешения (рис. 5.16). Это дает возможность использовать снимки при фундаментальном и прогнозном картографировании опустынивания, выполняемом в глобальных масштабах по проектам ЮНЕСКО. В рамках международного проекта ФАО-ЮНЕП Институтом пустынь созданы карты современного состояния опустынивания и опасности опустынивания на ближайшие 20 лет. Составленные для пустынь Туркмении в масштабе 1 : 1 000 000 карты должны служить эталоном для создания аналогичной карты мира масштаба 1 : 2 500 000. По космическим снимкам определяются границы подвижных песков, деградация пастбищ, производятся подсчет и измерение площадей пятен опустынивания вокруг колодцев.

Изучение процессов обезлесения, мониторинг изменений границ и площадей лесов также основываются на применении космической информации. Для лесов умеренной зоны такой мониторинг наиболее эффективен с использованием зимних снимков, полученных при наличии снежного покрова, когда благодаря силь-



Рис. 5.16. Пятна приколодезного опустынивания в пустыне Кызылкум. Снимок, полученный сканером МСУ-СК со спутника *Ресурс-О*

ному контрасту между темными контурами лесов и белыми заснеженными безлесными пространствами существенно повышается детальность изображения при достаточно уверенном выделении границ лесопокрытых территорий.

Для охвата значительного временного интервала используется сопоставление современных космических снимков со старыми картами. Исследование динамики распространения лесов с использованием Специальной 10-верстной карты Европейской России, составленной в середине прошлого века, выполненное для ряда районов европейской части территории нашей страны, показало, что изменение лесных площадей за 150 лет в различных районах протекает не однонаправленно. Сокращение лесов, характерное для северо-восточных лесопромышленных территорий и южных лесостепных сельскохозяйственных, компенсируется увеличением лесных площадей в центральных и западных районах, связанным с оттоком сельского населения в города, забрасыванием сельскохозяйственных земель, а также с лесопосадками. Однако эта компенсация площадей нередко сопровождается ухудшением качества лесов. Таким образом, если для тропических лесов по космическим материалам установлено повсеместное резкое сокраще-

ние площадей, то для бореальных лесов картина более сложная и требует исследования с использованием детальной космической информации.

Космические снимки применяются для изучения техногенного воздействия на природу. Воздействие, связанное с использованием самой территории как ресурса, наиболее характерно для горно-добывающей промышленности: вскрышные работы с образованием карьеров, терриконов, хвостохранилищ горнообогатительных предприятий; подземные выработки, вызывающие проблемы просадок грунта; организация сети скважин и нефтепроводов при нефтедобыче. Эти объекты, развитие которых связано с полным уничтожением существовавших на их месте ландшафтов, четко отображаются на космических снимках, что позволяет оценить масштабы техногенных преобразований. Ярко выражено воздействие промышленных выбросов на растительность прилегающих территорий. Например, по снимкам со спутников *Ресурс-Ф* удалось проследить в окрестностях Мончегорска и Норильска зоны с разной степенью деградации лесов под воздействием выбросов  $SO_2$ , распространяющиеся на расстояние до 140 км от комбинатов.

**Аэрокосмический мониторинг.** Возможности изучения по космическим снимкам многочисленных экологических проблем, возникающих в связи с антропогенным воздействием в условиях вечной мерзлоты в тундровых районах, с развитием эрозионных процессов в сельскохозяйственных районах степной зоны, охарактеризованы выше в разделах по применению космических снимков в различных областях исследований Земли. Отображение на космических снимках нарушений среды обитания человека в результате антропогенного воздействия на природу делает их ценным материалом для анализа современной экологической ситуации, составления карт экологической оценки территории, разработки экологических прогнозов.

Оперативное слежение и контроль за состоянием окружающей среды — динамичными природными процессами, за воздействием человека на природу и происходящими в ней изменениями, организованные на основе сочетания наземных, воздушных, космических наблюдений, образуют систему аэрокосмического мониторинга. Мониторинг предполагает не только наблюдение за процессом или явлением, но и его оценку, прогноз распространения и развития, а кроме того разработку системы мер по предотвращению опасных последствий или поддержанию благоприятных тенденций. Таким образом, аэрокосмический мониторинг не только выполняет контрольные функции, но и обеспечивает принятие управленческих решений.



## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

### Основная литература

1. Берлянт А. М. Геоиконика. — М.: Астрейя, 1996. — 209 с.
2. Верещака Т. В., Подобедов Н. С. Полевая картография. — М.: Недра, 1986. — 301 с.
3. Киенко Ю. П. Основы космического природоведения. — М.: Картогеоцентр-Геодезиздат, 1999. — 284 с.
4. Кравцова В. И. Космические методы картографирования. — М.: Изд-во Моск. ун-та, 1995. — 240 с.
5. Кронберг П. Дистанционное изучение Земли: Пер. с нем. — М.: Мир, 1988. — 345 с.
6. Новаковский Б. А. Фотограмметрия и дистанционные методы изучения Земли: картографо-фотограмметрическое моделирование. — М.: Изд-во Моск. ун-та, 1997. — 208 с.
7. Обиралов А. И., Лимонов А. Н., Гаврилова Л. А. Фотограмметрия. — М.: Колосс, 2002. — 240 с.
8. Атласы аэрокосмических снимков:  
Дешифрирование многозональных аэрокосмических снимков. Методика и результаты. — М.: Наука; Берлин: Академи-Ферлаг. — Т. 1. — 1982. — 84 с.; Т. 2. — 1988. — 124 с.  
Космические методы геоэкологии. — М.: Изд-во Моск. ун-та, 1998. — 104 с.

### Дополнительная литература

1. Аэрокосмические методы геологических исследований / Под ред. А. В. Перцова. — СПб.: Изд-во СПб. картфабрики «ВСЕГЕИ», 2000. — 316 с.
2. Гарбук С. В., Гершензон В. Е. Космические системы дистанционного зондирования Земли. — М.: Изд-во А и Б, 1997. — 296 с.
3. Книжников Ю. Ф. Аэрокосмическое зондирование. Методология, принципы, проблемы. — М.: Изд-во Моск. ун-та, 1997. — 128 с.
4. Книжников Ю. Ф., Кравцова В. И. Аэрокосмические исследования динамики географических явлений. — М.: Изд-во Моск. ун-та, 1991. — 205 с.
5. Савиных В. П., Кучко А. С., Стеценко А. Ф. Аэрокосмическая фотосъемка. — М.: Картогеоцентр-Геодезиздат, 1997. — 378 с.
6. Jensen J. R. Remote sensing of the environment: an Earth resource perspective. — Prentice Hall, 2000. — 544 p.
7. Lillesand T. M., Kiefer R. W. Remote sensing and image interpretation. — 4<sup>th</sup> Ed. — Wiley, 2000. — 724 p.
8. Mather P. M. Computer processing of remotely sensed images: an introduction. — 2<sup>nd</sup> Ed. — Wiley, 1999. — 292 p.

## **Интернет-источники**

**The Remote Sensing Tutorial.** <http://rst.gsfc.nasa.gov/start.html>

**The WWW Virtual Library: Remote Sensing.** <http://www.vtt.fi/tte/research/tte1/tte14/virtual/>

## ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие .....	3
Глава 1. <b>Аэрокосмические методы географических исследований. Основные понятия</b> .....	6
Глава 2. <b>Физические основы, технические средства и технологии получения аэрокосмических снимков</b> .....	25
2.1. <b>Физические основы аэрокосмических методов</b> .....	25
2.1.1. Электромагнитный спектр .....	26
2.1.2. Солнечное излучение и его отражение объектами земной поверхности .....	27
2.1.3. Характеристики собственного излучения Земли .....	36
2.1.4. Искусственное освещение местности .....	39
2.1.5. Влияние атмосферы на регистрируемое излучение .....	40
2.2. Методы регистрации излучения .....	44
2.2.1. Фотохимическая регистрация излучения .....	45
2.2.2. Электрическая регистрация излучения .....	50
2.3. Съёмочная аппаратура и ее носители .....	52
2.3.1. Съёмочная аппаратура .....	52
2.3.2. Носители съёмочной аппаратуры .....	63
2.4. Аэрокосмические съёмки .....	66
2.4.1. Аэросъёмка .....	66
2.4.2. Космическая съёмка .....	67
2.4.3. Наземная стереофотограмметрическая съёмка и другие виды съёмок .....	74
2.5. Типы аэрокосмических снимков и их классификация .....	76
2.5.1. Классификация космических снимков .....	76
2.5.2. Характеристика основных типов снимков .....	81
Глава 3. <b>Свойства и обработка аэрокосмических снимков</b> .....	85
3.1. <b>Изобразительные свойства и дешифрирование снимков</b> .....	86
3.1.1. Изобразительные свойства аэрокосмических снимков .....	87
3.1.2. Психологические и физиологические основы визуального дешифрирования .....	98
3.1.3. Виды и методика визуального дешифрирования снимков .....	108
3.2. <b>Радиометрические свойства и компьютерная обработка цифровых снимков</b> .....	125
3.2.1. Радиометрические свойства снимков и компьютерные средства их обработки .....	125

3.2.2. Преобразование снимков и создание производных изображений .....	138
3.2.3. Основные способы компьютерной классификации объектов по снимкам .....	152
3.2.4. Дополнительные способы компьютерной классификации .....	170
3.2.5. Компьютерная обработка разновременных снимков .....	177
3.3. Геометрические свойства и фотограмметрическая обработка снимков .....	182
3.3.1. Одиночный снимок .....	182
3.3.2. Стереоскопическая пара снимков .....	195
3.3.3. Разновременные снимки .....	212
3.4. Аэрокосмическое картографирование при географических исследованиях .....	217
<b>Глава 4. Мировой фонд снимков .....</b>	<b>222</b>
4.1. Снимки в видимом, ближнем и среднем инфракрасном (световом) диапазоне .....	224
4.1.1. Фотографические снимки .....	224
4.1.2. Сканерные снимки .....	231
4.1.3. ПЗС-снимки .....	240
4.2. Снимки в тепловом инфракрасном диапазоне .....	247
4.3. Гиперспектральные снимки в оптическом диапазоне .....	249
4.4. Снимки в радиодиапазоне .....	255
4.5. Электронные фонды космических снимков .....	259
4.6. Географическая оценка фонда снимков .....	261
4.6.1. Задачи, решаемые по снимкам разного пространственного разрешения .....	261
4.6.2. Соотношение пространственного и спектрального разрешения .....	265
4.6.3. Соотношение пространственного и временного разрешения .....	267
4.6.4. Соотношение пространственного и географического разрешения. Показатели географического разрешения .....	269
<b>Глава 5. Аэрокосмические исследования Земли .....</b>	<b>274</b>
5.1. Исследования атмосферы .....	275
5.2. Исследования гидросферы .....	278
5.2.1. Океаны и моря .....	278
5.2.2. Снега и льды .....	285
5.2.3. Воды суши .....	290
5.3. Исследования литосферы .....	293
5.3.1. Геологическое строение .....	293
5.3.2. Рельеф .....	298
5.4. Исследования биосферы .....	303
5.4.1. Почвенный покров .....	303

5.4.2. Растительный покров .....	308
5.4.3. Животный мир .....	311
5.4.4. Ландшафты .....	313
5.5. Социально-экономические исследования .....	315
5.5.1. Сельское хозяйство .....	315
5.5.2. Лесное хозяйство .....	319
5.5.3. Расселение .....	321
5.6. Антропогенное воздействие на природную среду и экологические задачи .....	323
Список литературы .....	329
Основная литература .....	329
Дополнительная литература .....	329
Интернет-источники .....	330

*Учебное издание*

**Книжников Юрий Фирсович,  
Кравцова Валентина Ивановна,  
Тутубалина Ольга Валерьевна**

**Аэрокосмические методы географических исследований**

**Учебник**

Редактор *Л. В. Лисицына*  
Технический редактор *Е. Ф. Коржуева*  
Компьютерная верстка: *Л. А. Вишнякова*  
Корректор *В. А. Жилкина*

Диапозитивы предоставлены издательством.

Изд. № А-925-І. Подписано в печать 05.04.2004. Формат 60×90/16.  
Гарнитура «Таймс». Бумага тип. № 2. Печать офсетная. Усл. печ. л. 23,0 (в т.ч. цв. вкл. 2,0).  
Тираж 3000 экз. Заказ № 13169.

Лицензия ИД № 02025 от 13.06.2000. Издательский центр «Академия».  
Санитарно-эпидемиологическое заключение № 77.99.02.953.Д.003903.06.03 от 05.06.2003.  
117342, Москва, ул. Бултерова, 17-Б, к. 223. Тел./факс: (095)330-1092, 334-8337.

Отпечатано на Саратовском полиграфическом комбинате.  
410004, г. Саратов, ул. Чернышевского, 59.

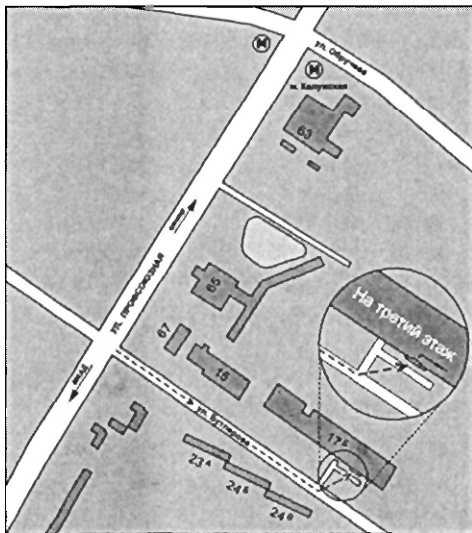
# Книги Издательского центра «АКАДЕМИЯ» можно приобрести

## В розницу:

- Книжный клуб «Олимпийский» (Олимпийский пр-т, 16, 5 этаж, место 20; 3 этаж, место 166)
- Книжная ярмарка на Тульской (Варшавское шоссе, 9, магазин-склад «Марко»)
- Московский дом книги (ул. Новый Арбат, 8)
- Дом педагогической книги (ул. Б. Дмитровка, 7/5; ул. Кузнецкий мост, 4)
- Торговый дом «Библио-Глобус» (ул. Мясницкая, 6)
- Дом технической книги (Ленинский пр-т, 40)
- Дом медицинской книги (Комсомольский пр-т, 25)
- Библиосфера (ул. Марксистская, 9)
- Сеть магазинов «Новый книжный» (Сухаревская пл., 12; Волгоградский пр-т, 78)

## Оптом:

- Москва, ул. Бутлерова, 17-Б, 3-й этаж, к. 328 (здание ГУП «Книгоэкспорт»).  
Тел./факс: (095) 334-7873, 330-1092, 334-8337. E-mail: academia@rol.ru



- Москва, ул. 2-я Фрезерная, 14, 4 этаж, к. 403 (здание ОАО «ЦентрКнига»).  
Тел./факс: (095) 234-0855, 273-1608. E-mail: academph@online.ru
- Санкт-Петербург, наб. Обводного канала, д. 211-213, литер «В».  
Тел./факс: (812) 259-6259, 251-9253. E-mail: fspbacad@comset.net  
(оптово-розничная торговля)

Издательство имеет возможность отправлять заказанную литературу железнодорожными контейнерами, почтово-багажными вагонами и почтовыми отправлениями.



УВАЖАЕМЫЕ ЧИТАТЕЛИ!  
ИЗДАТЕЛЬСКИЙ ЦЕНТР  
«АКАДЕМИЯ»

ПРЕДЛАГАЕТ ВАШЕМУ ВНИМАНИЮ  
СЛЕДУЮЩИЕ КНИГИ:

Ю. Г. ПУЗАЧЕНКО

**МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ В ГЕОГРАФИЧЕСКИХ  
И ЭКОЛОГИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЯХ**

Объем 416 с.

Пособие знакомит с базовыми приемами количественного анализа экологических и географических данных, собираемых в полевых исследованиях. Применение пакета статистических программ Statistica, SPSS, Systat, NCSS позволяет сократить формальные алгебраические выкладки и концентрировать внимание на семантических основаниях применения конкретного метода и описания области и условий его применения. Особое внимание уделяется проблемным областям анализа нестационарных, неравновесных систем и систем с выраженными нелинейными отношениями между переменными.

Для студентов высших учебных заведений, обучающихся по географическим и экологическим специальностям.

Е. Г. КАПРАЛОВ, А. В. КОШКАРЕВ, В. С. ТИКУНОВ и др.

**ОСНОВЫ ГЕОИНФОРМАТИКИ**

Объем: книга 1 — 352 с., книга 2 — 480 с.

В пособии освещены общие вопросы геоинформатики, функциональные возможности географических информационных систем (ГИС), принципы проектирования, аппаратно-программные средства реализации, интеграции данных и технологий, особенности интеллектуализации ГИС и систем поддержки принятия решений. Особое внимание обращено на блоки моделирования и визуализации данных, а также на прикладные аспекты геоинформатики, с изложением международного опыта использования ГИС и анализом литературы.

Для студентов высших учебных заведений, обучающихся по специальности «Экология». Может быть использовано географами, экологами, геологами, почвоведками.







302201016028



**Книжников Юрий Фирсович —**

заведующий лабораторией аэрокосмических методов кафедры картографии и геоинформатики географического факультета МГУ им. М. В. Ломоносова, профессор, доктор географических наук, заслуженный деятель науки РФ. Автор 7 книг и 250 статей по проблемам аэрокосмического зондирования и применения фотограмметрии в географических исследованиях.



**Кравцова Валентина Ивановна —**

ведущий научный сотрудник той же лаборатории, доктор географических наук, заслуженный научный сотрудник МГУ. Автор 15 книг и более 500 статей по тематическому космическому картографированию, космическим методам географических исследований.



**Тутубалина Ольга Валерьевна —**

научный сотрудник той же лаборатории, имеет степень Ph.D. по аэрокосмическим методам Кембриджского университета. Ведет курсы по компьютерной обработке космических снимков в Московском государственном и Кембриджском университетах. Автор 75 научных трудов и книги по этой тематике.

ISBN 5-7695-1529-5



9 785769 515293

**Издательский центр «Академия»**