

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

АЭРОКОСМИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ГЕОГРАФИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ

УЧЕБНИК

Допущено

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

2-е издание, переработанное и дополненное



Москва
Издательский центр «Академия»
2011

УДК 91:528.9(075.8)
ББК 26.8:26.17я73
К533

Рецензенты:

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

Книжников Ю. Ф.

К533 Аэрокосмические методы географических исследований :
учебник для студ. учреждений высш. проф. образования /
Ю. Ф. Книжников, В. И. Кравцова, О. В. Тутубалина. — 2-е изд.,
перераб. и доп. — М. : Издательский центр «Академия», 2011. —
416 с., [32] с. цв. ил.: ил.

ISBN 978-5-7695-6830-5

Второе издание учебника (1-е — 2004 г.) подготовлено в соответствии с программой курса по аэрокосмическим методам в рамках дисциплины «Методы географических исследований». Учебник переработан и дополнен с учетом кардинальных изменений в дистанционных методах исследований в первом десятилетии XXI в. В нем рассмотрены физические основы, технические средства и технологии получения аэрокосмических снимков, их информационные свойства и основные типы. Охарактеризованы методы получения географической информации по снимкам — их визуальное и компьютерное дешифрирование и фотограмметрическая обработка. Рассмотрены формирование и современное состояние мирового фонда снимков в световом, тепловом инфракрасном и радиодиапазоне, выполнена географическая оценка фонда снимков. Дан обзор аэрокосмических исследований Земли и планет.

Для студентов учреждений высшего профессионального образования, обучающихся по специальностям «География» и «Картография».

УДК 91:528.9(075.8)
ББК 26.8:26.17я73

*Оригинал-макет данного издания является собственностью
Издательского центра «Академия», и его воспроизведение любым
способом без согласия правообладателя запрещается*

ISBN 978-5-7695-6830-5

© Книжников Ю. Ф., Кравцова В. И., Тутубалина О. В., 2011
© Образовательно-издательский центр «Академия», 2011
© Оформление. Издательский центр «Академия», 2011

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, получение их качественных и количественных биогеофизических характеристик и их изменений во времени. 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 в начале XX в., 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 передавая в считанные дни и часы тысячи снимков.

Мировое космическое сообщество динамично развивается. Ожидается, что уже в первые десятилетия XXI в. мировая группировка превысит тысячу космических аппаратов, среди которых число спутников, предназначенных для аэрокосмического зондирования Земли, приблизится к 20 %. Возрастающей популярности аэрокосмических снимков способствует появление в Интернете поисковой системы Google Earth (<http://maps.google.com>).

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. Важное значение придается аэрокосмической видеоинформации при создании национальной инфраструктуры пространственных данных.

Аэрокосмический снимок — это прежде всего информационная модель изучаемого объекта или явления. Снимки, имеющие десятки

разновидностей, несут разнообразную информацию о географических объектах, о их взаимосвязях и пространственном распределении, состоянии, изменении во времени. Для результативного использования аэрокосмических снимков исследователь должен знать их свойства и владеть специальными способами и приемами эффективного извлечения из снимков необходимой информации. Знание информационных особенностей снимков, правильный выбор компьютерных программ для их обработки — залог успешного получения требуемой географической информации аэрокосмическими методами. Необходимые теоретические знания и практические навыки в данной области будущий географ получает при изучении соответствующего учебного курса.

В современном облике аэрокосмического зондирования как самостоятельной дисциплины отчетливо проявляются следующие тенденции его поступательного развития.

- Космические снимки, оперативно размещаемые в Интернете, становятся наиболее востребованной видеoinформацией о местности как для специалистов-профессионалов, так и для широких слоев населения.

- Разрешение и метрические свойства космических снимков открытого доступа быстро повышаются. Получают распространение орбитальные снимки сверхвысокого разрешения — метрового и даже дециметрового, которые успешно конкурируют с аэроснимками.

- Аналоговые фотографические снимки и традиционные технологии их обработки утрачивают свое прежнее монопольное значение. Основным обрабатывающим прибором для исполнителя стал компьютер, оснащенный специализированным программным обеспечением и периферией.

- Прогрессивное развитие всепогодной радиолокации превращает ее в мощный метод получения метрически точной пространственной геоинформации, который начинает эффективно комплексироваться с оптическими технологиями аэрокосмического зондирования.

- Быстро формируется рынок разнообразной продукции аэрокосмического зондирования Земли. Число зарубежных коммерческих космических аппаратов, функционирующих на орбитах, неуклонно увеличивается, а получаемые ими снимки активно распространяются в России.

Высшее эколого-географическое образование также характеризуется нововведениями, важнейшие из которых следующие.

- Переход к новому Государственному стандарту, предусматривающему двухуровневую форму обучения.

- Основой образовательного процесса в высшей школе становится компетентностный подход.

- Вводится модульный принцип построения учебных дисциплин, вариативный выбор их необходимого набора, а также разделов по каждой дисциплине.

При подготовке второго издания учебника авторы стремились учесть произошедшие изменения и возникшие новые требования. Учебник нацелен на профессиональное формирование будущего специалиста, компетентного в области эффективного применения современных аэрокосмических методов в практике географических исследований, способного оценить достоверность получаемой по снимкам пространственной геоинформации.

В отличие от первого издания второе издание учебника включает не пять, а семь глав.

Первая глава — вводная. В ней изложены основные концепции и сложившийся понятийно-терминологический аппарат дисциплины. Приведена принципиальная схема аэрокосмических исследований в географии, подчеркивающая главенствующую роль снимка — основного источника информации.

Вторая глава содержит минимально необходимые для географа сведения об основных способах современного получения аэрокосмических снимков.

Сравнительно небольшая третья глава по замыслу должна стать центральной в учебнике. В ней изложены информационные свойства аэрокосмических снимков, охарактеризованы основные типы снимков и их особенности.

В четвертой главе рассмотрены важнейшие методы получения географической информации по снимкам — дешифрирование и фотограмметрические измерения, которые обычно нацелены на получение конечного результата в картографическом виде.

Пятая глава характеризует накопленный мировым сообществом фонд аэрокосмических снимков, отражая во многом историю развития космических методов.

Шестая глава посвящена аэрокосмическим исследованиям географических оболочек Земли. Здесь освещен весь спектр практического применения аэрокосмических методов и рассказано о полученных важнейших результатах космической географии.

Завершающая, седьмая, глава учебника раскрывает выдающуюся роль дистанционных методов в познании человеком Солнечной системы.

При постановке конкретных учебных курсов и разработке индивидуальных учебных программ преподаватель может дифференцированно рекомендовать для изучения отдельные теоретические разделы (модули) учебника в зависимости от уровня подготовки и направления будущей профессиональной деятельности обучающихся. Например, бакалавру-географу рекомендуется освоение материала глав 1, 3, 5 и отдельных разделов главы 6, а магистранту-картографу — полный набор материала, включая главы 4 и 7.

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. Работа 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. Особую благодарность авторы выражают профессору А. М. Берлянту, который почти 20 лет возглавлял кафедру картографии и геоинформатики Московского государственного университета им. М. В. Ломоносова, за постоянную поддержку, а также рецензентам — профессору Московского государственного университета геодезии и картографии Т. В. Верещаке и профессору Российского университета дружбы народов В. Д. Скарятину за конструктивные замечания.

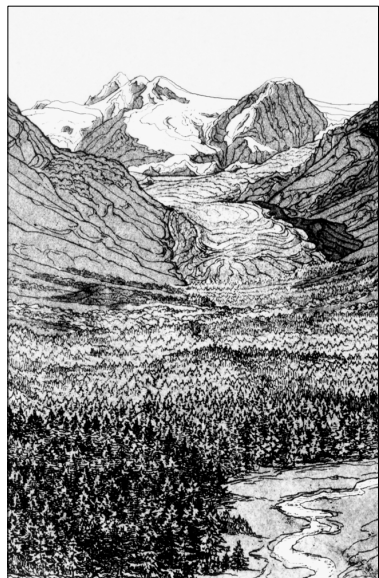
АЭРОКОСМИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ГЕОГРАФИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ. ОСНОВНЫЕ ПРИНЦИПЫ И ПОНЯТИЯ

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 от изучаемого объекта на расстояние от сотен метров до тысяч километров. Эта особенность аэрокосмических методов позволяет отнести их к дистанционным.

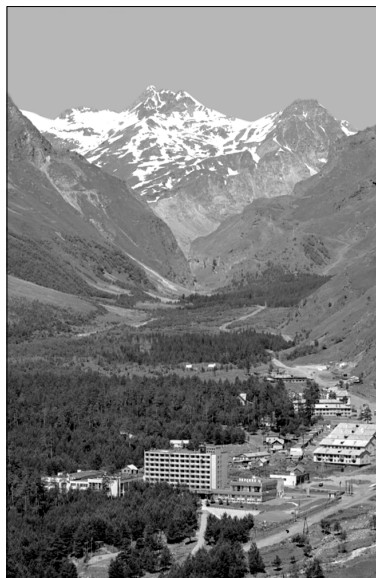
Дистанционные методы применяются в географических исследованиях очень давно. Правда, вначале использовались *рисованные снимки*, которые фиксировали пространственное расположение изучаемых объектов (рис. 1.1). С изобретением фотографии возникла наземная фототеодолитная съемка, при которой по *перспективным 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 информацию 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 англоязычного термина *remote sensing*, который не очень точно переводится как *дистанционные методы*, или *дистанционное зондирование*.

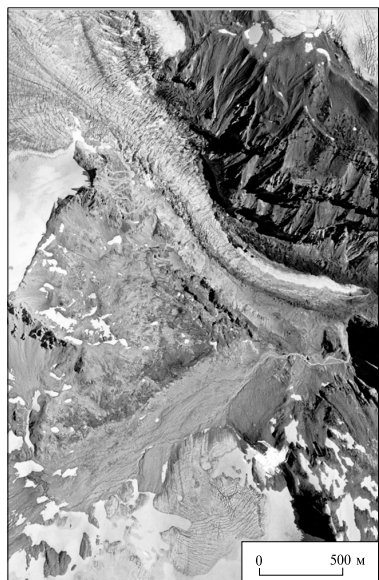
Дистанционные и аэрокосмические методы исследований. Дистанционные методы понимают как любое изучение объекта, осуществляемое на расстоянии, без непосредственного с ним контакта. Например, методы исследования морского дна с применением акустического гидролокатора относятся к дистанционным. При аэрокосмических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



a



б



в



г

ния, которое характеризуется такими параметрами, 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 совершенства регистрирующей аппаратуры, а также от расстояния до них.

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 *снямкам*, поэтому главная задача заключается в целенаправленном получении и обработке снимков. Аэрокосмические съемки выполняются с помощью специальной съемочной аппаратуры, чаще всего — *фотографической, оптико-электронной и радиоэлектронной*, которую иногда объединяют общим названием *сенсоры* (от англ. *sensor* — чувствительный элемент). Съемочная аппаратура, позволяющая одновременно получать снимки в нескольких спектральных зонах, называется *многозональной*, в десятках и сотнях очень узких спектральных зон — *гиперспектральной*, а при различ-



Рис. 1.1. Снимки на разных исторических этапах развития дистанционных методов исследований:

а — рисованный снимок наступающего эльбрусского ледника Большой Азау (1849);
б — фототеодолитный снимок (1981) ледниковой долины в период отступления ледника Большой Азау; *в* — плановый аэрофотоснимок языка ледника Большой Азау (1957); *г* — космический снимок юго-западного участка оледенения Эльбруса со спутника *Cartosat* (2006)

ной поляризации излучения — *многополяризационной (многополяриметрической)*.

Принцип *множественности* 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. Благодаря этому обеспечивается наиболее разностороннее и глубокое исследование изучаемого объекта или явления.

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 основных группах снимков: получаемых с самолетов — воздушных (аэроснимков) и со спутников — космических (орбитальных). Хотя принципиальных различий у этих снимков нет, космические снимки наиболее соответствуют размерности географических объектов и распространенным масштабам географических исследований.

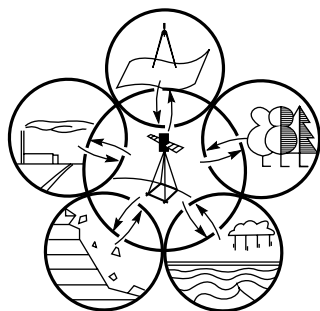


Рис. 1.2. Взаимодействие географических наук с аэрокосмическим зондированием

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. 1.2 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 неодинаково. 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 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 (архивы снимков). Обработку получаемой с помощью спутников видеоинформации принято разделять на *предварительную* (межотраслевую) и *тематическую* (отраслевую). При предварительной обработке материалы съемок приводятся к виду, наиболее пригодному для анализа и интерпретации отраслевыми потребителями в процессе последующей тематической обработки.

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 *Зенит*). Затем начали функционировать косми-

ческие съемочные системы, поставляющие пространственную геоинформацию широкому кругу гражданских потребителей, изучающих недра и морские акватории, оценивающих земельные, лесные и водные ресурсы, составляющих карты. Появились специализированные национальные космические системы природно-ресурсного направления первого поколения, среди которых наиболее известны системы: *Ресурс* (СССР), *Landsat* (США) и французская система *SPOT* (Satellite Pour l'Observation de la Terre). Почти за полвека регулярно запускаемые спутники каждой из этих систем многократно покрыли съемками всю нашу планету, дав десятки миллионов снимков, образовавших их *глобальный фонд*. Архивные космические снимки на различные регионы в открытом доступе можно найти на сайтах сети Интернет, на региональных и национальных геопорталах. Существуют специализированные сайты — галереи космических снимков — фирм, занимающихся коммерческим распространением снимков.

В первое десятилетие XXI в. благодаря эффективной интеграции достижений в области аэрокосмических съемок, компьютерных технологий и телекоммуникационных сетей удалось осуществить простой доступ к разномасштабным и разновременным космическим снимкам, представленным в Интернете, и к созданной по ним единой модели Земли. Беспрецедентная по массовости востребованность у широких слоев населения наглядной снимковой формы географической информации о различных регионах нашей планеты заставила специалистов говорить о появлении нового вида территориальной информации, которую можно назвать *неогеографической*. Некоторые активные сторонники новаций даже утверждают, что зарождаются особые науки — неогеография и неокартография, которые способны принципиально изменить наши общие представления об окружающем мире. Несомненным лидером здесь признаются *Google Earth/Maps*. Сенсационная популярность *Google Earth* заставляет многие крупные компании начать активную разработку аналогичных проектов.

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, обеспечивавшая прежде 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. 1.3). Спутники *Ресурс-Ф* были рассчитаны на детальную фотосъемку местности с высоты 200 — 300 км в течение нескольких недель с возвращением на Землю спускаемого аппарата с отснятой фотопленкой. Спутники оперативного наблюдения *Ресурс-О*, на которых установлены оптико-электронные съемочные системы, работая в течение нескольких лет на орбитах высотой 600 — 900 км, регулярно передавали ви-

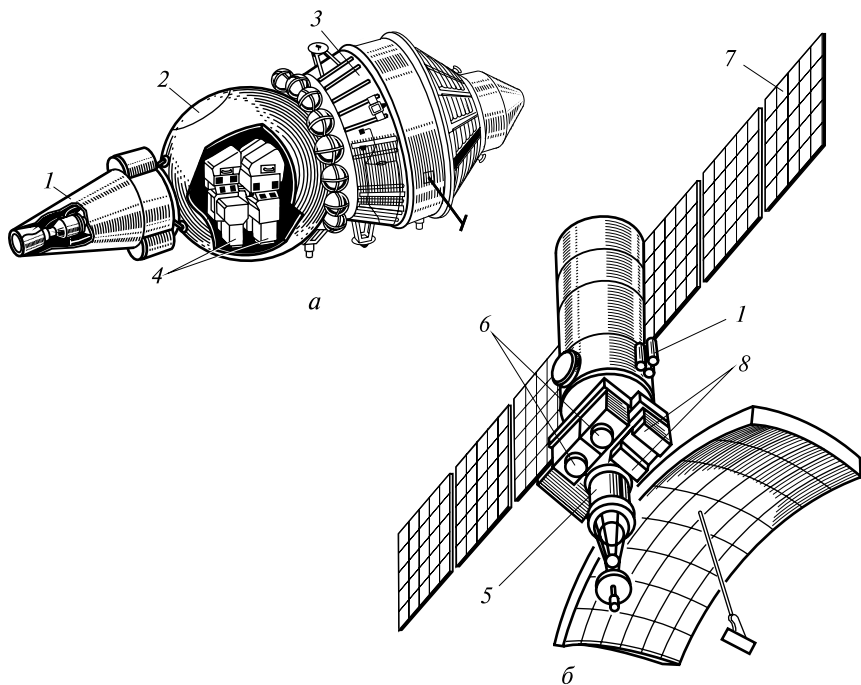


Рис. 1.3. Космические аппараты первого поколения *Ресурс-Ф* (а), *Ресурс-О* (б):

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

деоинформацию не столь высокой детальности по радиоканалам на наземные пункты приема (рис. 1.4, 1.5). Подсистема *Ресурс-Ф* функционировала четверть века. За это время запущено более 100 фотографических спутников, с помощью которых получены детальные снимки всей территории России и отдельных районов на различных континентах, включая Антарктиду. Со временем детальность космических снимков, поставляемых оптико-электронными съемочными системами, повысилась, и необходимость в фотографических спутниках отпала.

В соответствии с Федеральной космической программой России на 2006 — 2015 гг., которая финансируется из федерального бюджета, помимо начавших работать отечественных спутников *Ресурс-ДК*¹ (рис. 1.6) и *Метеор-М № 1* планируется запустить серию метеорологи-

¹ Спутник назван в честь выдающегося конструктора космических аппаратов Д. И. Козлова (1919 — 2009).

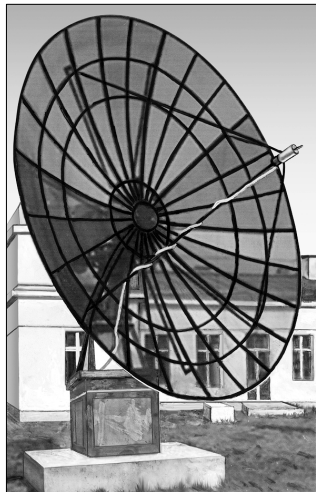


Рис. 1.4. Антенна наземного пункта приема видеoinформации

ческих спутников и геостационар *Электро-Л*, а также новые ресурсные спутники *Ресурс-П* и *Канопус-В*. В эти годы предполагается также запуск и радиолокационных спутников.

Американская космическая система Landsat начала функционировать в 1972 г., ее эксплуатация предусматривала поочередный вывод на орбиту высотой 900 (700) км серии спутников с расчетным сроком функционирования несколько лет (рис. 1.7). За 16 дней спутник может покрыть многозональной съемкой всю поверхность Земли. Цифровая информация со спутников по радиоканалам передается на наземные пункты приема. Служба распространения архивированных снимков через сеть Интернет делает их доступными потребителям разных стран.

формация со спутников по радиоканалам передается на наземные пункты приема. Служба распространения архивированных снимков через сеть Интернет делает их доступными потребителям разных стран.

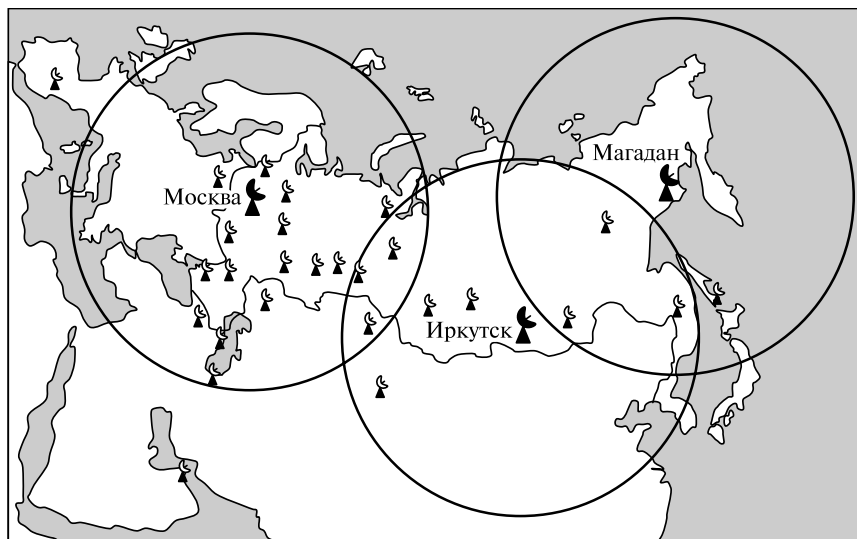


Рис. 1.5. Наземные пункты приема космической видеoinформации Инженерно-технологического центра «СканЭкс». Окружностями отмечены зоны радиовидимости основных коммерческих станций

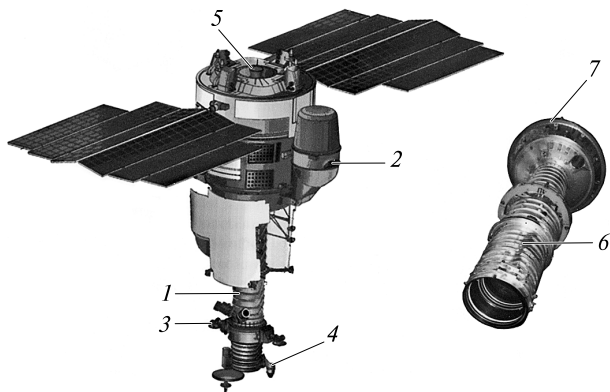


Рис. 1.6. Космический аппарат *Ресурс-ДК* и оптико-электронная съемочная система *Геотон*:

1 — многозональный сканер *Геотон*; 2 — контейнер с научной аппаратурой для регистрации предвестников землетрясений и изучения потока античастиц; 3 — антенна высокоскоростной радиолинии; 4 — инфракрасный построитель местной вертикали; 5 — двигательная установка; 6 — линзовый объектив *Актиний* с фокусным расстоянием $f = 4$ м; 7 — система преобразования оптического изображения земной поверхности в цифровой электрический сигнал

Снимки со спутников *Landsat*, накопленные за более чем 30-летний период функционирования системы и хорошо отображающие природно-территориальные комплексы, применяются во многих странах мира для геологических, географических, экологических исследований и тематического картографирования.

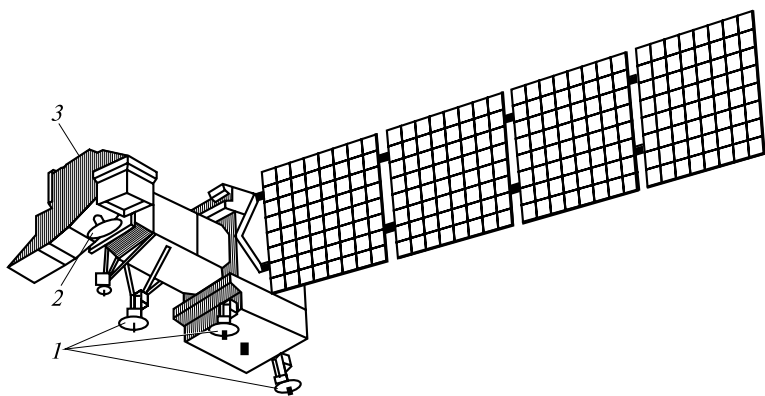


Рис. 1.7. Спутник *Landsat-7*.

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

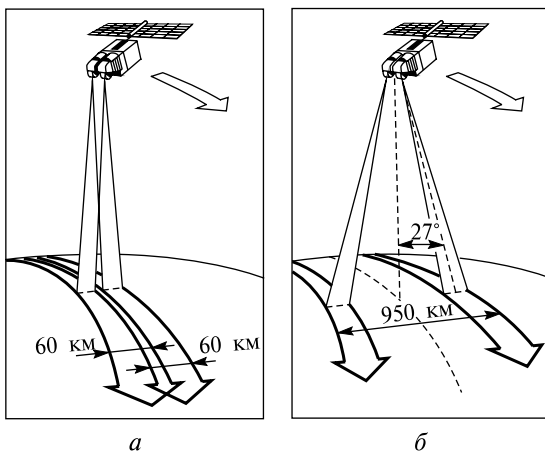


Рис. 1.8. Космическая съемка земной поверхности со спутника *SPOT*:
a — в нади́р; *б* — с отклонением направления съемки

Французская космическая система *SPOT* начала работать в 1986 г. Съемка с первых четырех спутников выполняется с высоты 800 км двумя оптико-электронными сканерами в нади́р или в сторону от траектории полета спутника, что позволяет более часто производить повторную съемку (рис. 1.8). Информация, передаваемая по радиоканалам, принимается двумя основными (во Франции и в Швеции) и многими региональными станциями приема. Снимки имеют относительно высокое разрешение — на них можно распознать отдельные городские здания. Они нацелены на создание разнообразных карт, а пятый спутник с повышенным разрешением снимков и выполнением стереосъемки уже позволяет решать топографические задачи.

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 отличают 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.

Космические системы нового поколения. Перспективы. Космические технологии развиваются быстро: совершенствуются спутники, съемочная аппаратура, технологии съемки и обработки снимков. Каждый новый спутник поставляет снимки более совершенные, чем предыдущий.

Число стран, развивающих национальные космические программы, неуклонно увеличивается. Как уже отмечалось, начало было положено в 1957 г. в СССР и США, а затем Франция запустила свой первый спутник для исследования ветров. В Западной Европе в 1973 г. было создано Европейское космическое агентство (ЕКА). Уверенно вошли в мировое космическое сообщество страны Азиатско-Тихоокеанского региона — Япония и Китай, запустившие спутники в 1970 г., Индия в 1980 г., Израиль в 1988 г. Число стран, имеющих свои спутники, непрерывно увеличивается.

Во всем мире наблюдается тенденция создания спутников-съемщиков двойного назначения — военного и гражданского, обеспечивающих потребности как национальной безопасности, так и социально-экономического развития страны. Важное направление их совершенствования — повышение разрешения космических снимков. Недавно стояла задача получения снимков с субметровым разрешением, а сейчас стремятся к съемкам дециметрового разрешения со спутника, летящего на высоте в несколько сотен километров.

Таким образом, современные космические снимки по детальности близки к традиционным аэрофотоснимкам, получаемым при высоте полета самолета лишь в несколько километров. Освоение высокого разрешения расширило практическое применение космических *стереоскопических* снимков. Точность определения высотных отметок точек земной поверхности, получаемых с помощью таких снимков, оказалась достаточной для создания ортоизображений и цифровых моделей рельефа.

Однако фотографические и оптико-электронные съемочные системы, работающие в оптическом диапазоне электромагнитного спектра, не обеспечивают получение снимков земной поверхности при облачном покрове. Здесь на помощь приходит всепогодная радиолокационная съемка. Сейчас на космических орбитах функционируют радиолокационные спутники различных стран, которые могут поставлять снимки метрового разрешения днем и ночью, при ясной погоде и при сплошной облачности. Новые возможности открывает также радиолокационная съемка тандемом — двумя спутниками. *Интерферометрическая* пара получаемых таким способом радиолокационных снимков позволяет определять не только плановое положение объектов и их высоты, но и смещения земной поверхности.

Космические системы нового поколения можно разделить на системы, выполняющие съемки для исследования и мониторинга Земли в целом, и специальные — для удовлетворения практических запросов. Примером системы первого типа может служить разработанная 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 — си-

стема наблюдения Земли), которая функционирует 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.

Примером специализированной космической системы агрохозяйственного назначения может служить коммерческая система *Rapid Eye* (Германия), включающая пять идентичных спутников, которые запущены в 2008 г. с определенным временным интервалом на одну орбиту. Каждый спутник оснащен сканером с оптико-электронной съемочной системой, выполняющей многозональную съемку с пространственным разрешением 5—6 м полосы местности 78 км, при работе всех спутников число таких полос увеличивается, а за 5 дней обеспечивается покрытие съемкой Европы и Северной Америки. В этой системе спектральные диапазоны, разрешение снимков и частота съемки установлены оптимальными для решения задач сельскохозяйственного и лесного мониторинга в интересах современного бизнеса и управления.

Для нужд отечественной картографии разработан проект прецизионной космической съемочной системы «*Ковчег*», рассчитанной на создание геометрически точных геоинформационных продуктов, в частности топографических и навигационных карт масштаба 1 : 10 000 и мельче. Будущая картографическая система — четырехспутниковая. Один спутник будет поставлять метрически точные стереоскопические снимки, предназначенные для изготовления цифровых моделей рельефа; другой — сверхдетальные моноскопические снимки для получения содержательной информации, а два одинаковых спутника, работающие в тандеме, должны поставлять интерферометрические пары радиолокационных снимков для картографирования северных территорий страны, которые характеризуются плохими метеорологическими условиями для съемки.

Предварительная обработка и хранение космической видеоинформации. В последние десятилетия основной поток видеоинформации с космических орбит стал поступать от оптико-электронных сканеров и радиолокаторов. Видеоинформацию со спутников регистрируют наземные станции приема, которых в мире насчитывается несколько сотен. Станции приема не только обеспечивают получение цифровой информации от спутника-съемщика, но и обязательно выполняют ее предварительную обработку с помощью специального фирменного программного обеспечения. Уровень и глубина предварительной обработки зависят от конструкции спутника, его съемочной аппаратуры и ряда других технических факторов, а также от коммерческой политики фирмы, эксплуатирующей спутник. В настоящее время виды предварительной обработки весьма многочис-

ленны и разнообразны и, к сожалению, пока не унифицированы. Для обобщенного представления можно принять следующие три условные группы уровней предварительной обработки космической видеоинформации.

Уровни первоначальной обработки. Обычно поступающая от спутника исходная информация содержит как изображение земной поверхности, так и служебную вспомогательную информацию о движении и ориентации космического аппарата, режимах работы съемочной аппаратуры и т. д. Вначале требуется разделить эти виды информации, а также устранить помехи и сбои, вызванные передачей информации по радиоканалу, несовершенством съемочной аппаратуры и другими причинами.

Уровни средней обработки. Производится *радиометрическая* и *геометрическая* коррекция видеоинформации, в результате которой получают так называемый «сырой» цифровой снимок: в определенном формате, в единицах яркости в условной шкале, без приведения в картографическую проекцию.

Уровни высокой обработки предусматривают улучшение изобразительных и геометрических свойств «сырых» снимков на основе известных параметров съемочной аппаратуры и орбитальной информации. Производятся геометрические преобразования, в частности *трансформирование* перспективных снимков и их *географическая привязка* — приведение в определенную картографическую проекцию. Могут выполняться также радиометрические преобразования, например пересчет значений яркости из условных величин в энергетические единицы.

Видеоинформация, прошедшая предварительную обработку, архивируется и сопровождается *каталогом метаданных* для каждого снимка (сцены), а также его уменьшенной копией — *квиклуком* (от англ. *quick look* — быстрый просмотр). В соответствии с географическим положением каждому космическому снимку отводится определенное место в специально разработанной *системе привязки*. Например, для снимков со спутников *Landsat* такая система организована на основе сетки, образованной трассами полета спутника и параллелями, пересечение которых совпадает с центрами снимков. Такая и подобные системы привязки позволяют потребителю быстро найти и заказать нужный снимок, предварительно оценив его качество по квиклуку. Для успешного выполнения последующей тематической обработки космических снимков, для которой обычно привлекают наземную информацию, желательно располагать необходимым набором метаданных — служебной информацией о снимке.

Космическая разведка. Военными ведомствами многих космических держав выполнялась и выполняется космическая разведка. Для дешифрирования в этой области требуются снимки различного пространственного разрешения (табл. 1.1).

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

Объекты	Обнаружение	Детальное опознавание	Выявление характеристик
Железнодорожные узлы	30	6	1,5
Мосты	6	2	1,0
Автомшины	1,5	0,3	0,1
Аэродромы	6	2	0,3
Самолеты	5	1	0,2
Порты	30	6	3
Корабли	8	0,6	0,3
Минные поля	6	1	0,03
Ракетные установки	1	0,15	0,05

С помощью видовой разведывательной аппаратуры (фотографической, оптико-электронной, радиолокационной) получают космические снимки небольшого охвата, но очень 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 бизнес-разведки (поставка сырья, отгрузка продукции и т. д.), 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. Другая задача военной разведки — предупреждение о ракетном ударе — решается путем организации непрерывного глобального мониторинга ракетоопасных районов с помощью системы спутников — геостационаров, оснащенных аппаратурой, регистрирующей тепловое излучение. Помимо решения основной задачи — обнаружения пуска ракет — инфракрасная аппаратура позволяет получать полезную информацию и в гражданской области — о лесных пожарах, авариях на нефте- и газопроводах и даже о метеорах, вле-

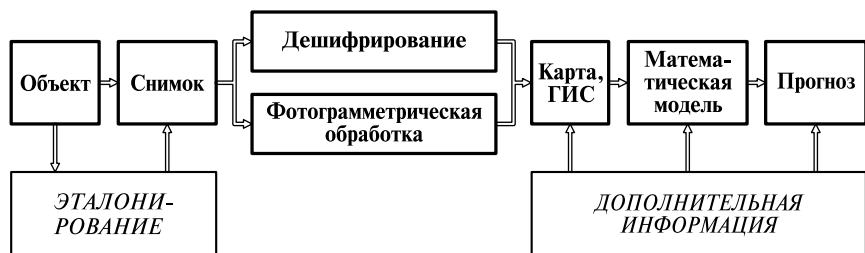


Рис. 1.9. Принципиальная схема аэрокосмических исследований, показывающая основные технологические этапы и конечную цель

тающих в атмосферу Земли и обычно быстро сторающих на высоте 20—30 км.

Принципиальная технологическая схема географических исследований с использованием аэрокосмических снимков. Несмотря на различие в снимках, способах и приемах их обработки, аэрокосмические методы позволяют решать в физической и экономической географии такие общие задачи, как инвентаризация различного рода территориальных систем, оценка их состояния и возможностей использования, изучение динамики, географическое прогнозирование. Аэрокосмические снимки полезны при различных видах районирования территории.

На рис. 1.9 в обобщенном виде представлена принципиальная схема выполнения аэрокосмических географических исследований. Необходимым элементом исследований по снимкам является оценка достоверности и точности полученных результатов. Для этого приходится привлекать другую информацию или выполнять повторную обработку иными методами, что требует дополнительных затрат.

Объект исследований. На схеме обозначение «объект» относится как к объекту съемки — участку территории, местности, так и к объекту изучения, исследования — определенным типам поверхности, явлениям на местности или протекающим на ней процессам. С точки зрения аэрокосмических методов объект изучения целесообразно рассматривать как пространственно-временную категорию иерархического строения: мелкие объекты включены в более крупные, кратковременные процессы — в долговременные. Важнейшая характеристика объектов съемки, освещенность которых закономерно меняется в течение дня, — их отражательно-излучательная способность. Аэрокосмические методы позволяют прямо или косвенно получать только ту географическую информацию о местности, которая заложена в особенностях излучения, идущего от объекта съемки.

Аэрокосмические снимки — основной результат аэрокосмических съемок, для выполнения которых используют разнообразные авиа-

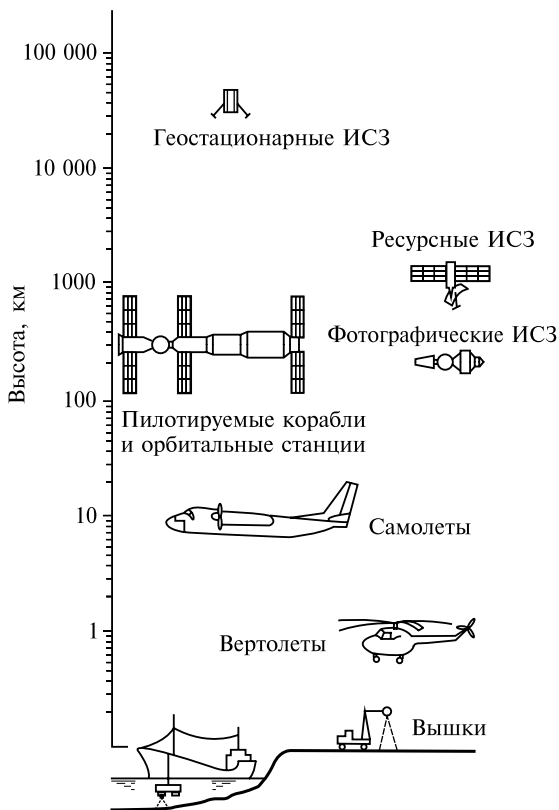


Рис. 1.10. Различные виды носителей съемочной аппаратуры. Рисунок иллюстрирует также многоярусный принцип исследования Земли, предусматривающий космические, авиационные и наземные (надводные) наблюдения

ционные и космические носители (рис. 1.10). Аэрокосмические съемки делят на *пассивные*, которые предусматривают регистрацию отраженного солнечного или собственного излучения Земли, и *активные*, при которых выполняют регистрацию отраженного искусственного излучения.

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 удастся заранее достоверно ответить на вопросы *что* и *как* изобразится на будущем снимке, хотя ясно, что ответ на эти вопросы зависит от конструктивных

особенностей съёмочной системы, параметров использованного излучения и биогеофизических свойств снимаемого объекта.

Диапазон масштабов современных аэрокосмических снимков огромен: он может меняться от 1 : 1 000 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 — *пикселов* (от англ. *picture element — pixel*); яркость каждого пиксела характеризуется одним числом. Аэрокосмический снимок состоит из миллионов пикселов. При выполнении практических работ приходится отличать исходные (первичные) снимки, которые получены непосредственно в результате съемки, от их копий и преобразованных снимков, поступающих к потребителям. Так, аналоговые снимки можно преобразовать в цифровые и наоборот. Наиболее распространено цифрование с помощью специального высокоточного сканера оригинальных негативов аэрофотографической съемки, предназначенных для компьютерной обработки.

Аэрокосмические снимки как информационные модели местности характеризуются рядом свойств, среди которых выделяют изобразительные, радиометрические (фотометрические) 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 съёмочной аппаратурой, существенно различаются. Кадровые снимки, отличающиеся наивысшей геометрической точностью, наиболее пригодны для точных измерений. Снимки, получаемые оптико-электронными съёмочными системами, могут регистрировать больше энергетических уровней излучения, чем фотографические, и обладают наиболее высокой радиометрической точностью. Радиолокационные снимки 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 съёмочной 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 основными методами — это дешифрирование и фотограмметрические измерения¹.

Дешифрирование должно дать ответ на основной вопрос — что изображено на снимке? Оно 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 (измерения) 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 обработки аэрокосмических снимков на персональных компьютерах можно использовать коммерческое программное обеспечение общего назначения, такое, как Adobe Photoshop, Corel PHOTO-PAINT и др. Однако значительно большие возможности предоставляют профессиональные программные продукты, среди которых в России 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, Панорама, Талка, ЦНИИГАиК² (Россия) — «Геосистема» (Украина) или SARscape для обработки материалов радиолокационной съемки. Географ должен уметь выбрать оптимальный вариант обработки из многих возможных, предоставляемых коммерческим программным обеспечением.

¹ Термин «дешифрирование» (от франц. *deshiffrer* — расшифровать, толковать) в отечественной литературе заменил термин «толкование», употреблявшийся в начале XX в.; в иностранной литературе чаще используется термин «интерпретация». Фотограмметрия (от греч. *photos* — свет, *gramma* — запись, *metreo* — измеряю) изучает способы определения пространственного положения, размеров и формы объектов путем измерения их снимков.

² Центральный научно-исследовательский институт геодезии, аэросъемки и картографии.

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 дешифрирования аэрокосмических снимков.

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 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, которое пока остается основным методом извлечения природной и социально-экономической географической информации из аэрокосмических снимков. Более того, в последние годы компьютер чаще рассматривается не как заместитель, а как помощник человека.

Эталонирование. Получить посредством дешифрирования 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 требуется выполнить яркостную (радиометрическую или фотометрическую) калибровку снимков (их эталонирование), а для получения размера объекта фотограмметрическим способом необходима геометрическая калибровка снимка. 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 для 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 остается изготовление по снимкам тематических карт и других картографических продуктов, от качества которых зависит не только их эстетическое восприятие, но и степень доверия к выполненным исследованиям. Многолетний опыт работ свидетельствует о том, что создание геоинформационных продуктов в картографическом виде, интегрированных в географические информационные системы (ГИС), и получение базовой информации инфраструктуры пространственных данных (ИПД) — главнейшее направление практического и научного использования аэрокосмической видеoinформации. Результаты комплексных географических исследований, выполненных с использованием аэрокосмических снимков, наиболее часто представляют в виде серий взаимосогласованных тематических карт, отражающих пространственные закономерности, качественные и количественные характеристики изученной территории.

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, полугодовые 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.

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 **радиовысотометр** (альтиметр), регистрирующий время от послышки 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 радиовысотометра 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 крон деревьев разных ярусов и от земной поверхности, что важно при дистанционном изучении вертикальной структуры растительного покрова.

Точное положение, форму и размер объекта можно определить с помощью **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. Этот новый дистанционный метод позволяет быстро создать точную цифровую модель местности. При крупномасштабном картографировании 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 аэрорадиометрической съемке, при которой регистрируется коротковолновое гамма-излучение над месторождениями радиоактивных руд или на участках радиационного заражения местности. В результате вертолетных обследований европейской части России с помощью *гамма-спектрометра* были закартографированы ареалы выпадения радиоактивных осадков после Чернобыльской катастрофы 1985 г.

Исследование планет. В учебнике основное внимание уделено аэрокосмическим методам исследований Земли. Однако космические съемки представляют также метод изучения и картографирования планет Солнечной системы и других небесных тел. Для их изучения используются все методы съемок — от фотографической съемки, применявшейся для картографирования лунной поверхности, до радиолокационной съемки поверхности Венеры сквозь ее постоянный плотный облачный покров и от исследований с межпланетных орбит до детального изучения и съемки поверхности с помощью луноходов и марсоходов. Съемкой с больших расстояний охвачены дальние планеты Солнечной системы — Юпитер, Сатурн, Уран, Нептун и их спутники Ио, Каллисто, Ганимед, Европа, Тритон. Составлены многолистные топографические и тематические карты Луны, Марса, Меркурия, атласы планет, например Атлас Венеры.

Таким образом, изучение и картографирование планет и других небесных тел составляют важнейшую научную сферу применения космических методов.