

528 (075.8)

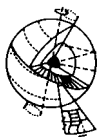
К703

И. И. КОРЧУГАНОВА, А. К. КОРСАКОВ

ДИСТАНЦИОННЫЕ МЕТОДЫ ГЕОЛОГИЧЕСКОГО КАРТИРОВАНИЯ



УНИВЕРСИТЕТ
книжный дом



РОССИЙСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ГЕОЛОГОРАЗВЕДОЧНЫЙ
университет ИМ. Серго Орджоникидзе (РГГРУ)

Н. И. КОРЧУГАНОВА, А. К. КОРСАКОВ

ДИСТАНЦИОННЫЕ МЕТОДЫ ГЕОЛОГИЧЕСКОГО КАРТИРОВАНИЯ

УЧЕБНИК

Допущено УМО по образованию в области прикладной геологии
в качестве учебника для студентов высших учебных заведений,
обучающихся по геологическим специальностям



УНИВЕРСИТЕТ
книжный дом

Москва

2009

УДК 528.94(07)

ББК 26.17я7

K69

Рецензенты:

доктор геолого-минералогических наук *Н. В. Межеловский*;
кафедра динамической геологии Московского государственного университета им. М. В. Ломоносова

На обложке — космический снимок Земли

Фото NASA, Апполон-17

Корчуганова Н. И., Корсаков А. К.

K69 Дистанционные методы геологического картирования: учебник / Н. И. Корчуганова, А. К. Корсаков. — М. : КДУ, 2009. — 288 с.: ил., табл.; [15 с.1: цв. ил.

ISBN 978-5-98227-513-4

В учебнике приведены сведения о видах аэрокосмических съемок в видимом и невидимом диапазонах электромагнитного спектра и съемочных системах. Рассмотрены особенности изображений на аэро- и космических снимках разных уровней генерализации, методические вопросы геологического дешифрирования и интерпретации аэрокосмической информации, способы предварительной и тематической обработки данных дистанционного зондирования. Приведен комплекс признаков дешифрирования вещественного состава и залегания осадочных, магматических и метаморфических горных пород, четвертичных отложений, погребенных геологических объектов, разрывных нарушений разной кинематики, линеаментов, кольцевых структур, парагенезисов структурных форм; охарактеризована информативность космических снимков различных геотектонических областей. Изложены требования к составлению дистанционной основы Гостеолкарты нового поколения и применению материалов дистанционного зондирования при геологическом картировании. Рассмотрены объекты дешифрирования, методы и технологии работ при прогнозно-минералогических исследованиях, при прогнозно-поисковых работах на нефть и газ, при поисках месторождений алмазов и россыпей; приведены примеры космоструктурных прогнозно-поисковых моделей крупных рудных объектов.

Для студентов и аспирантов геологических вузов.

УДК 528.94(07)

ББК 26.17я7

© Корчуганова Н. И.,
Корсаков А. К., 2009

ISBN 978-5-98227-513-4

© Издательство «КДУ», 2009

Оглавление

Введение.....	6
----------------------	----------

ЧАСТЬ I

ВИДЫ АЭРОКОСМОСЪЕМОК. МЕТОДИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ДЕШИФРИРОВАНИЯ МАТЕРИАЛОВ АЭРОКОСМИЧЕСКИХ СЪЕМОК

Глава 1. История развития аэрокосмических методов исследований.....	9
Глава 2. Аэрокосмическая съемка.....	16
2.1. Общие сведения об аэро- и космосъемках.....	16
2.2. Виды аэрокосмических съемок.....	35
Глава 3. Теоретические и методические основы дешифрирования материалов дистанционного зондирования.....	47
3.1. Материалы дистанционного зондирования.....	47
3.2. Обработка и преобразования материалов дистанционного зондирования.....	57
3.3. Дешифрирование материалов дистанционного зондирования.....	71

ЧАСТЬ II

ГЕОЛОГИЧЕСКОЕ ДЕШИФРИРОВАНИЕ МАТЕРИАЛОВ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ

Глава 4. Дешифрирование коренных горных пород.....	83
4.1. Осадочные породы.....	84
4.2. Магматические породы.....	93
4.3. Метаморфические породы.....	105
4.4. Вещественно-структурные комплексы горных пород.....	107

4.5. Дешифрирование погребенных геологических объектов.....	108
Глава 5. Дешифрирование четвертичных отложений и рельефа.....	110
5.1. Генетические типы четвертичных отложений.....	110
5.2. Рельеф как индикатор тектонических структур.....	129
Глава 6. Линейные структуры на материалах дистанционного зондирования.....	134
6.1. Разрывные нарушения.....	134
6.2. Линеаменты.....	147
6.3. Анализ линеаментных полей.....	158
Глава 7. Кольцевые структуры.....	161
7.1. Моногенные кольцевые структуры.....	163
7.2. Полигенные кольцевые структуры.....	182
Глава 8. Применение космических снимков в структурно-геологических исследованиях.....	187
8.1. Изучение тектонических структур и глубинного строения литосферы.....	187
8.2. Геологическая информативность космических снимков.....	192

ЧАСТЬ III

ПРИМЕНЕНИЕ АЭРОКОСМИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ ПРИ ГЕОЛОГИЧЕСКОМ КАРТИРОВАНИИ И ПРОГНОЗНО-ПОИСКОВЫХ ИССЛЕДОВАНИЯХ

Глава 9. Применение материалов дистанционного зондирования при геологическом картировании.....	208
9.1. Виды геологических работ с применением материалов дистанционного зондирования.....	208
9.2. Дистанционная основа геологических карт нового поколения.....	213
9.3. Геолого-экологическое картирование.....	223
Глава 10. Применение материалов дистанционного зондирования при прогнозно-поисковых исследованиях.....	229

10.1. Использование материалов дистанционного зондирования при прогнозно-минерагенических исследованиях.....	229
10.2. Применение материалов дистанционного зондирования при поисках месторождений алмазов.....	253
10.3. Применение материалов дистанционного зондирования при прогнозно-поисковых работах на нефть и газ.....	263
10.4. Использование аэрокосмических материалов при поисках россыпей.....	277
10.5. Применение экспертных систем в геологическом прогнозировании.....	283
Заключение.....	286
Литература.....	287

Введение

Дистанционными называют аэрокосмические методы изучения Земли и других космических тел с воздушных и космических летательных аппаратов, оснащенных различными видами съемочной аппаратуры. Материалы дистанционного зондирования давно применяются при геологическом картировании для выявления, изучения и отображения на картах строения земной коры. В связи с появлением изображений Земли из космоса и прогрессирующим развитием съемочной аппаратуры и программного обеспечения по обработке данных дистанционного зондирования возможности геологического дешифрирования значительно расширились. При геологическом картировании дистанционные методы используются в комплексе с другими (геофизическими, геохимическими, структурно-геологическими и пр.) методами и позволяют оперативно получать информацию о геологическом строении значительных территорий, выявлять ранее неизвестные объекты, устанавливать критерии поисков месторождений полезных ископаемых и пр. На базе применения материалов дистанционного зондирования появились новые виды геологических исследований, оформились самостоятельные научные направления — космическая геология, линеаментная тектоника, изучение кольцевых структур и др.

В основу учебника положен одноименный курс лекций, который читается в Российском государственном геологоразведочном университете студентам, специализирующимся в области геологической съемки и поисков месторождений полезных ископаемых. Последние учебники, отвечающие программе данного курса, были изданы в 80-х гг. прошлого века. Основной задачей учебника является ознакомление студентов с методами дешифрирования данных дистанционного зондирования при геологическом картировании; требованиями к составлению дистанционной основы Гостеолкарты нового поколения, методиками и технологиями использования аэрокосмоматериалов при прогнозно-поисковых исследованиях. Наряду с новым материалом приведены ставшие «классически-

ми» сведения о выраженности разных геологических объектов на аэро- и космоснимках, признаках их дешифрирования в регионах с различным геологическим строением. При написании учебника использованы материалы многих исследователей, прежде всего обобщенные в монографиях и методических руководствах, а также из Интернета. Авторы понимали, что при изложении учебного материала этой дисциплины, как нигде, необходима наглядность, поэтому в учебник включено много снимков.

Учебник состоит из трех частей. В первой части рассмотрена история развития аэрокосмических методов исследований; приведены основные сведения о видах аэрокосмических съемок в видимом и невидимом диапазонах электромагнитного спектра, фотографических и нефотографических съемочных системах. Рассмотрены методические основы дешифрирования материалов дистанционного зондирования (в том числе цифрового рельефа), способы их предварительной и тематической обработки и преобразования, виды и методы дешифрирования, порядок работы с материалами дистанционного зондирования при геологическом картировании.

Вторая часть посвящена геологическому дешифрированию материалов дистанционных съемок: вещественного состава и залегания коренных горных пород, погребенных и скрытых геологических объектов, четвертичных отложений, разрывных нарушений, линеаментов, кольцевых структур; приведены примеры геологической информативности космических снимков разных геотектонических областей и возможности изучения глубинного строения литосферы.

В третьей части учебника изложены требования к созданию дистанционных основ Госгеолкарты-200/2 (второе поколение) и Госгеолкарты-1000/3 (третье поколение); рассмотрены виды геологических работ, которые проводятся с применением материалов дистанционного зондирования. Даны методические рекомендации и описаны технологии использования материалов дистанционного зондирования при прогнозировании оруденения, при прогнозно-поисковых работах на нефть и газ, при поисках месторождений алмазов и россыпей.

Следует отметить, что в тексте приняты сокращения:

- АФС — аэрофотоснимки;
- ДДЗ — данные дистанционного зондирования;

- ДЗ — дистанционное зондирование;
- ДО — дистанционная основа;
- ИСЗ — искусственные спутники Земли;
- КС — космические снимки;
- МДЗ — материалы дистанционного зондирования;
- НИИКАМ — Научно-исследовательский институт космоэрогеологических методов.

Учебник подготовлен на кафедре общей геологии и геологического картирования РГГРУ. Замечания и пожелания можно прислать по адресу: Москва, 117997, ул. Миклухо-Маклая, 23.

Часть I

ВИДЫ АЭРОКОСМОСЪЕМОК. МЕТОДИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ДЕШИФРИРОВАНИЯ МАТЕРИАЛОВ АЭРОКОСМИЧЕСКИХ СЪЕМОК

Глава 1

ИСТОРИЯ РАЗВИТИЯ АЭРОКОСМИЧЕСКИХ МЕТОДОВ ИССЛЕДОВАНИЙ

Началом эпохи дистанционных исследований считается 4 июня 1783 г., когда был осуществлен запуск первого аэростата братьев Монгольфье в Анноне, близ Лиона. Уже 12 июля этого года во Франции впервые были применены наблюдения с воздуха в битве при Флерюсе, а в 1855 г. были сделаны первые фотографии с воздуха, которые легли в основу составления точного плана города. В 1858 г. фотографии с воздушного шара с высоты 300 м получены знаменитым французским фотографом и воздухоплавателем Гаспаром Турнашоном, известным под псевдонимом Ф. Надар. В США дистанционные методы исследований с использованием воздухоплавательных аппаратов впервые были применены в войне Севера и Юга в 1861-1865 гг. В геологических целях фотографирование Альп с высоких вершин хребтов впервые осуществил Эме Цивиалье. Начало развития аэрофотосъемки в России датируется 1866 г., когда поручик А. М. Кованько с воздушного шара с высоты 600-1000 м отечественным аэрофотоаппаратом Срезневского

получил снимки Санкт-Петербурга и Кронштадта. Интенсивное развитие дистанционных методов исследований началось в XX в., особенно в военных целях — для составления топографических карт. Лишь со второй четверти XX в. они стали применяться для решения самых разнообразных народно-хозяйственных задач. В развитии дистанционных методов зондирования можно наметить несколько этапов.

Этап становления аэрометодов. Первая аэрофотосъемка в России была проведена в 1918 г. в районе г. Твери на площади 100 км². Систематические съемки для составления топографических карт начались с 1925 г. Этот год считается временем возникновения гражданской авиации, когда было положено начало планомерным аэросъемкам в природоресурсных целях, которые получили широкий размах в начале 1930-х гг.

Для научно-методического обеспечения и координации работ в 1929 г. в г. Ленинграде создается институт аэросъемки. Его первым директором стал известный ученый — академик А. Е. Ферсман, по инициативе которого в период с 1929 по 1935 г. были проведены исследования по изучению природных ресурсов методами аэросъемки. При широком использовании аэрофотоснимков были изучены нефтеносные районы Ферганы и Азербайджана, а с применением аэровизуальных наблюдений — районы Восточной Сибири. Опыт этих исследований обобщен А. В. Гавеманом в 1937 г. С 1938 г. аэрофотосъемки стали обязательными при геологосъемочных работах. В 1946 г. издана книга В. П. Мирошниченко «Аэрогеосъемка».

Этап широкого внедрения аэрометодов. В 40-х гг. при Геологическом комитете были созданы специализированная Аэрофотогеологическая экспедиция, реорганизованная в 1949 г. во Всесоюзный аэрогеологический трест (ВАГТ), который позднее был преобразован в научно-производственное геологическое объединение «Аэрогеология» (ныне ФГУНПП «Аэрогеология»), и Лаборатория аэрометодов «ЛАЭМ» (ныне государственное унитарное предприятие «Научно-исследовательский институт космоаэрогеологических методов» ГУП «НИИКАМ»). В основном эти организации определили дальнейшую историю развития аэрокосмических методов геологических исследований в нашей стране. В результате планомерных работ к 1957 г. была проведена мелко-

масштабная съемка всей территории СССР, и на ее основе создана Государственная геологическая карта масштаба 1 : 1 000 000. По результатам опытно-методических работ 1965-1971 гг. разработаны и внедрены в практику новые виды региональных исследований: групповая геологическая съемка и аэрофотогеологическое картирование. Результаты внедрения аэрометодов в практику геологических исследований нашли отражение во многих тематических сборниках и руководствах.

В 60-х гг. аэросъемка начала проводиться в других диапазонах электромагнитного спектра; появились тепловая и радиолокационная съемки, а также материалы съемок из космоса. Все это существенно расширило возможности изучения природных ресурсов и круг решаемых народно-хозяйственных и научных задач.

Этап совершенствования методов дистанционного зондирования, связанный с развитием космонавтики (с 60-х — начала 70-х гг. XX в.). Первый спутник для метеорологических наблюдений был запущен в 1960 г. в США (Tiros-1), в СССР — в 1966 г. (Космос-122), а в 70-х гг. на орбите Земли уже летали десятки различных спутников. Первые фотографии Земли из космоса были получены американцами еще в 1945 г. при запуске реактивного летательного аппарата ФАУ-2, оснащенного фотоаппаратурой, с высоты 120 км (ракеты ФАУ-2 были созданы в Германии в период Второй мировой войны). В августе 1959 г. в США были получены первые снимки Земли с искусственного спутника «Эксплорер». Первым человеком, увидевшим нашу планету из космоса, был Юрий Гагарин, а впервые сфотографировал ее Герман Титов в 1961 г. с борта космического корабля «Восток».

Появление материалов космических съемок вывело методы дистанционного исследования природных ресурсов на новый уровень. В начале 70-х гг. создаются специальные технические средства, телевизионная съемка, сканерная и др. Расширяется диапазон технических возможностей и решаемых задач. Применение материалов аэрокосмических съемок становится обязательным в системе геологической службы страны при проведении геологосъемочных работ среднего и крупного масштабов. Широкое использование аэрокосмические снимки находят также при прогнозе и поисках месторождений нефти и газа, рудных полезных ископаемых, строительных материалов, подземных вод и др. Большое развитие

получают исследования по изучению мелководных зон морей. Значительные успехи были достигнуты в области использования материалов дистанционного зондирования при изучении состояния природной среды, выявлении уровня и источников ее загрязнения, проведении мониторинга природных систем, подверженных интенсивному антропогенному воздействию.

Наиболее полно теоретические и методические вопросы использования материалов аэросъемок в геологии были обобщены в коллективной монографии сотрудников ЛАЭМ «Физические основы и технические средства аэрометодов» (1967), были опубликованы также работы «Аэрометоды геологических исследований» (1971), «Аэрометоды геологического изучения районов двухъярусного строения» (1979).

Начиная с 1975 г. Министерство геологии СССР совместно с Академией наук приступили к геологическому картированию территории страны и отдельных ее регионов по материалам космических съемок. Для разработки методики геологического дешифрирования космических снимков были организованы работы на полигонах, расположенных в различных ландшафтно-климатических зонах. В конце 70-х — начале 80-х гг. XX в. был издан ряд карт: морфоструктур центрального типа СССР масштаба 1:10 000 000, 1977 г.; космическая карта линейных и кольцевых структур территории СССР масштаба 1 : 5 000 000, 1979 г.; космогеологическая карта Арало-Каспийского региона масштаба 1: 2 000 000, 1979 г.; космогеологическая карта СССР масштаба 1: 2 500 000, 1984 г. Материалы исследований из космоса широко публикуются в научной печати. Изданы монографии, научно-технические сборники, обзоры, специальные реферативные журналы («Исследования Земли из космоса»). Появилось большое число обобщающих и методических работ — «Геологическое изучение Земли из космоса» (1978), «Аэрокосмические исследования Земли» (1979), «Космическая геология» (1979), «Космическая информация в геологии» (1983), «Дистанционное изучение Земли» (1988) и др. Выпущена серия методических рекомендаций по использованию материалов космических съемок при региональных геологических исследованиях и поисках полезных ископаемых (отв. ред. Н. В. Межеловский); изданы учебные пособия (Аковецкий, 1983; Кац и др., 1976, 1988; Михайлов и др., 1993; Рябухин и др., 1988; Садов, Ревзон, 1979; Костенко и др., 1999;

Кравцова, 1995, 2000 и др.). В это время по программе исследования Земли проводилось крупномасштабное геологическое картирование (Геокарта-50) и др.

Современный этап развития методов дистанционного зондирования Земли связан с появлением нового поколения цифровых средств получения информации, разработкой компьютерных программ обработки изображений и технологий комплексного анализа разнородных пространственно координированных данных — геоинформационных (ГИС) технологий. ГИС-технологии предоставили широкие возможности для создания значительных по объему баз данных для больших территорий. В современных технологиях геологоразведочного производства аэрокосмическая информация представляет собой составную часть пакета информации (геологической, геофизической, геохимической и др.), которая обрабатывается и интерпретируется совместно посредством ГИС-технологий.

Технические средства дистанционного зондирования нового поколения позволяют получать с космических носителей информацию в нескольких диапазонах электромагнитного спектра с высоким пространственным разрешением. В России в начале 90-х гг. начали функционировать космические многоспектральные и радиолокационные системы получения дистанционной информации в цифровом виде (МСУ-М, МСУ-СК, МСУ-Э, «Алмаз»), а также фотографические системы высокого пространственного разрешения (КФА-1000, МК-4, КФА-3000, ТК-350, КВР-1000). За рубежом широко используются данные многоспектральных и радиолокационных космических съемок системами Landsat MSS (США), Spot XS, P (Франция), ERS (Европа), JERS-1, ADEOS (Япония), RADARSAT (Канада) и др. Выполняются национальные программы для исследования окружающей среды с использованием собственных космических съемочных систем в Китае, Индии, Бразилии, Аргентине. На основе информации, поступающей со специальных геофизических и геодезических спутников, получены глобальные карты магнитного и гравитационного полей. Проведены измерения абсолютного уровня Мирового океана; с помощью лазеров и отражателей, установленных на спутниках, определены амплитуды горизонтальных перемещений литосферных плит. Получена уникальная информация о строении планет

Солнечной системы. Наряду с интенсивным ростом космических методов получают дальнейшее активное развитие аэрометоды. Распространение получают тепловизорные и лидарные методы исследования.

Совершенствуется техника передачи, хранения, интерпретации и обработки данных дистанционного зондирования. Специалистами ВСЕГЕИ разработаны методические рекомендации по приему, архивации, обработке и предоставлению в пользование информации и программа развития ведомственной системы МДЗ МПР России на 2004-2010 гг. Ими разработаны, кроме того, новые методы дешифрирования на основе целевых цифровых обработок масштабного ряда МДЗ, метод глубинного линейamentного зондирования; ГИС-технология мониторинга недропользования; подготовлены соответствующие методические рекомендации и др.

Во второй половине 90-х гг. в НИИКАМ разработаны нормативно-методические рекомендации по созданию дистанционных основ Государственных геологических карт России масштаба 1 : 1 000 000 третьего поколения и 1 : 200 000 второго поколения. В 2000 г. вышла в свет монография «Аэрокосмические методы геологических исследований», которая содержит анализ и систематизацию методических разработок и технологий на основе накопленного в последнее десятилетие опыта использования данных дистанционного зондирования в природоресурсных исследованиях. В 2004 г. (в год 60-летия научной деятельности НИИКАМ) выпущен справочник «Методы дистанционного зондирования Земли при решении природоресурсных задач» для предприятий МПР России, содержащий сведения по вопросам получения, обработки и тематической интерпретации данных аэрокосмических съемок. В настоящее время в НИИКАМ в рамках подпрограммы ФЦП «Экология и природные ресурсы России» (2002-2010) выполняются проекты «Разработка технологии обработки материалов дистанционного зондирования Земли нового поколения для повышения эффективности работ общегеологического и специального назначения и контроля недропользования на территории РФ», «Создание атласов сводных карт для территории России: Космический образ России», «Разработка технологии выявления рудоперспективных площадей на основе применения мно-

госпектральных материалов космических съемок», «Обеспечение геологоразведочных работ по мониторингу и охране окружающей среды ретроспективными материалами дистанционного зондирования Земли» и др.

В Научном геоинформационном центре РАН разработаны концепция создания региональных геоинформационных комплексов (программно-аппаратных средств для приема, накопления, систематизации, анализа и синтеза информации и передачи ее потребителю) и геоинформационные технологии для решения крупных природно-хозяйственных задач (проблем урбанизированных территорий на примере Москвы, прогноз весенних паводков в бассейне р. Волги, оценки состояния и динамики природной среды Прикаспия и др.).

Крупными мероприятиями в сфере дистанционного зондирования Земли в России являются международные конференции (ИКИ РАН, ИТЦ СканЭкс, Совзонд и др.). Много интересной и полезной информации о различных видах аэрокосмосъемок, ДДЗ, предлагаемых пользователям, результатах их применения для решения различных природоресурсных и природоохранных задач можно найти сейчас в Интернете. Некоммерческим партнерством «Прозрачный мир» создан для студентов и школьников интернет-атлас изображений Земли из космоса, а ИТЦ СканЭкс запустил новый проект «Галерея».

Актуальными проблемами современного этапа являются обеспечение оперативного получения информации из космоса (в том числе в режиме, близком к реальному времени) и к архивам МДЗ, разработка и внедрение программ получения, обработки и тематической интерпретации МДЗ Федеральное агентство Роснедра среди приоритетных направлений в начале XXI в. называет: создание мелкомасштабных геологических карт как на всю территорию страны, так и на отдельные регионы, государственных геологических карт нового поколения масштабов 1 : 1 000 000 и 1 : 200 000, проведение прогнозно-поисковых работ в пределах важнейших и потенциально перспективных горнорудных районов и нефтегазоносных провинций, геоэкологическое картографирование. Необходимым информационным блоком при создании таких карт являются материалы аэрокосмических исследований.

Глава 2

АЭРОКОСМИЧЕСКАЯ СЪЕМКА

2.1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ ОБ АЭРО- И КОСМОСЪЕМКАХ

При аэрокосмических съемках регистрируются в аналоговой или цифровой форме отраженная от поверхности Земли солнечная радиация и собственное электромагнитное поле системы земная поверхность — атмосфера. Электромагнитным излучением называют распространение энергии в пространстве в виде волн или прямолинейного потока световых частиц (фотонов). Электромагнитные волны распространяются в вакууме со скоростью света и отличаются друг от друга длиной волны.

В природе главным источником электромагнитного излучения является Солнце. Максимум солнечного излучения приходится на видимую человеческим глазом часть спектра. Распределение энергии асимметрично: она резко убывает в ультрафиолетовую и более плавно — в инфракрасную область. При прохождении солнечной радиации к поверхности Земли происходят поглощение, рассеяние, рефракция и суммирование собственного излучения атмосферы с солнечным излучением (рис. 2.1). Кроме того, все природные объекты имеют собственное тепловое излучение. Граница спектральных областей отраженного и собственного излучения находится вблизи 3,5 мкм. На длинах волн, меньших 3,5 мкм, собственное излучение природных объектов пренебрежимо мало по сравнению с отраженной солнечной радиацией, а на длинах волн, больших 3,5 мкм, интенсивность собственного излучения природных образований выше отраженной солнечной радиации. Атмосферное пространство между летательным аппаратом и снимаемыми им объектами представляет собой гигантскую «линзу», обладающую эффектом избирательного отражения и поглощения электромагнитных волн, а для части из них она вообще непрозрачна. Атмосфера задерживает большую часть гамма-излучения, рентгеновское и почти все ультрафиолетовое излучение, а также ряд участков видимого и инфракрасного (особенно среднего и дальнего) диапазонов спектра. Поэтому регистрирующая аппаратура, как правило, фиксирует не весь диапазон излучений, а выборочные, наиболее проницаемые его интервалы.

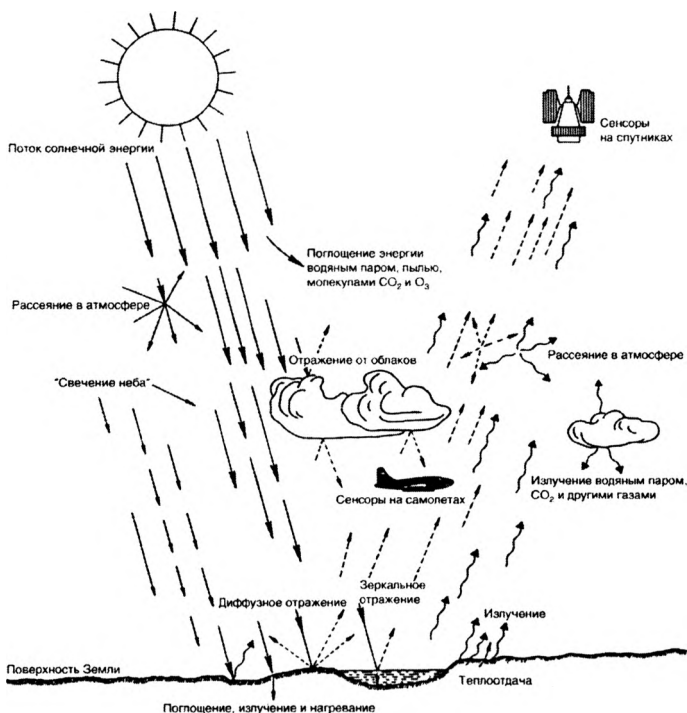


Рис. 2.1. Схема процессов отражения, рассеяния и поглощения солнечной энергии в атмосфере и на поверхности Земли (по П. Кронбергу)

Для дистанционного зондирования используют видимую (0,4-0,75 мкм), инфракрасную (0,75-1000 мкм) и микроволновую (3,5-1000 мм) зоны спектра электромагнитных волн. Максимум кривой видимости приходится на длину волны 0,55 мкм. В видимом и инфракрасном (ИК) диапазонах съемки проводят фотографическими, телевизионными и сканерными системами, в которых используются естественное, обусловленное внутренним теплом Земли, и вторичное тепловое излучение объектов, обусловленное солнечной радиацией (рис. 2.2). Эти методы называют *пассивными*. Съемки, для которых необходим искусственный источник излучения направленного действия (радар или лазер), *активными* (радиолокационная, лидарная).

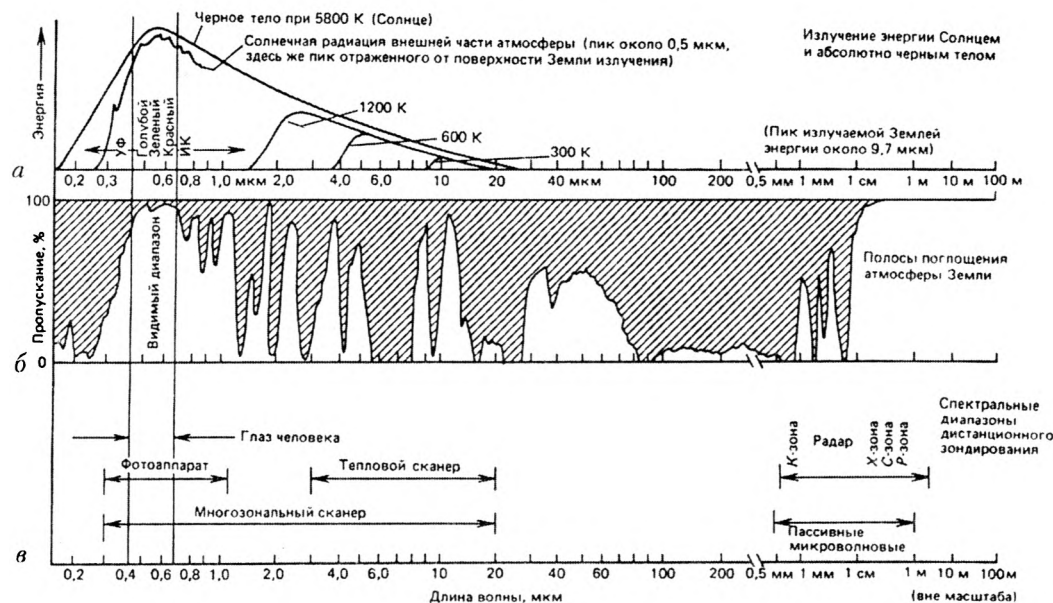


Рис. 2.2. Спектр электромагнитной энергии (а), прозрачность атмосферы (б) и используемые в дистанционном зондировании диапазоны электромагнитных волн (в) (по П. Кронбергу)

Съемку Земли проводят с воздушных и космических летательных аппаратов (КЛА). В видимой области спектра получается самый полный объем информации. К недостаткам измерений в этом диапазоне относятся существенная зависимость результатов от помех (облачность, атмосферная дымка и др.) и возможность проведения съемки только при освещении земной поверхности Солнцем. В видимом спектральном диапазоне, кроме аэро- и космофотосъемок, проводят также визуальные наблюдения.

АЭРОСЪЕМКА

Аэросъемка земной поверхности осуществляется с самолетов (отечественных АН-2, АН-30, ИЛ-14 ФК (ФКМ), ТУ-134 СХ, АН-28 ФК) и вертолетов (отечественных МИ-2, МТИ-81, К-26); ограниченно используются аэростаты и мотодельтапланы для съемки небольших площадей. Аэросъемка проводится с использованием съёмочных систем, работающих в различных участках спектра электромагнитных волн. Различают фотографическую (аэрофотосъемку), телевизионную, тепловую, радиолокационную и многозональную аэросъемки.

Аэрофотосъемка. Основными характеристиками аэрофотосъемки являются высота и масштаб, предпочтительные сезон и время съемки, а также благоприятные метеоусловия. Аэрофотосъемки выполняются с малых и больших высот. При этом нижняя граница регламентируется требованиями безопасности полетов, а верхняя — потолком полета авианосителей. От высоты полета зависит масштаб аэросъемки. Чем меньше высота, тем выше разрешающая способность съемки и, соответственно, крупнее масштаб снимков. При большой высоте аэрофотосъемки ее разрешающая способность снижается и, следовательно, уменьшается масштаб снимков. При съемке с самолета несколькими аппаратами с разным фокусным расстоянием обеспечивается получение снимков разного масштаба при одинаковой высоте полетов.

Как правило, аэрофотосъемка выполняется по сети параллельных трасс, равномерно покрывающих снимаемую площадь. Съемка ведется с продольным (не менее 60 %) и поперечным (30 %) перекрытиями соседних снимков (рис. 2.3), что позволяет получить объемную модель местности.

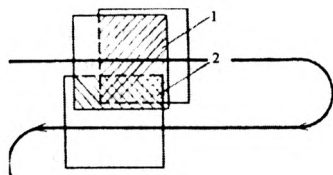


Рис. 2.3. Продольное (1) и поперечное (2) перекрытия снимков при аэрофотосъемке

КОСМОСЪЕМКА

Для съемок из космоса используются межпланетные автоматические станции (МАС), автоматические и пилотируемые искусственные спутники Земли (ИСЗ), пилотируемые космические корабли (ПКК), орбитальные станции (например, ОС «Мир», выработавшая свой ресурс и затопленная в Тихом океане) и международные космические станции (МКС).

ИСЗ в зависимости от решаемых задач подразделяют на исследовательские и технические. Исследовательские спутники — это геофизические, предназначенные для изучения верхних слоев атмосферы и ближнего космического пространства; астрономические, предназначенные для наблюдений за звездами, планетами и Солнцем; геодезические для определения местоположения объектов; метеорологические для изучения циркуляции атмосферы и процессов формирования погоды; ресурсные для всестороннего изучения Земли (например, американский Landsat, французский Spot, отечественные спутники серии «Метеор-Природа» и «Космос» и др.). Технические — это спутники связи и навигационные.

Орбиты полета КЛА различаются по форме, наклонению (определяемому величиной угла, образованного плоскостью экватора и плоскостью орбиты полета), высоте.

По *форме* различают эллиптические и круговые орбиты (рис. 2.4). При круговых орбитах достигаются одинаковые масштабы снимков по всей трассе полета летательного аппарата. На близкие к круговым орбитам были выведены ПКК «Союз» и американский ИСЗ Landsat. Сильно вытянутую эллиптическую орбиту имеет ИСЗ связи «Молния».

По *наклонению* орбиты бывают экваториальные, когда наклонение равно 0° , полярные (90°) и наклонные. При полете ИСЗ по экваториальной орбите сокращается полоса снимаемой площади. При

углах наклона орбит до $50-60^\circ$ приполярные области не попадают в поле зрения бортовой аппаратуры. С полярной орбиты возможна съемка поверхности всей Земли.

Орбиты по отношению к Солнцу и Земле делятся на геосинхронные и гелиосинхронные. Геосинхронные (геостационарные) орбиты предназначены для движения спутника вокруг Земли с угловой скоростью, равной скорости вращения Земли, что обуславливает зависание спутника над определенным участком земной поверхности и обеспечивает постоянное наблюдение за ним. Гелиосинхронные орбиты используют для повторных съемок одних и тех же участков земной поверхности при одинаковых условиях освещения через равные промежутки времени.

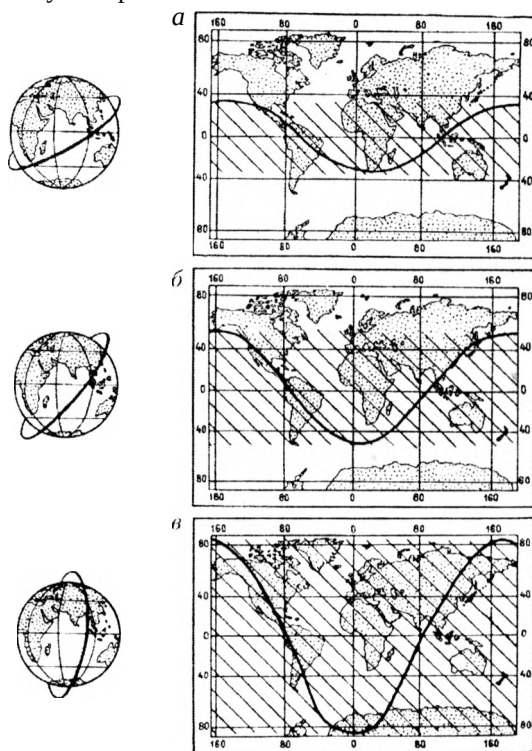


Рис. 2.4. Виды орбит ИСЗ. Круговая и эллиптическая орбиты (по Ю. П. Киенко). Показана зависимость между величиной площади охвата космической съемки и углом наклона орбиты

Трассы полетов КЛА по высоте подразделены на три группы: низкоорбитальные (200-400 км), которые используются при полете ПКК и орбитальных станций; среднеорбитальные (500-2000 км), используемые метеорологическими и ресурсными ИСЗ; высокоорбитальные (30 000-90 000 км), по которым летают телекоммуникационные спутники и станции, предназначенные для исследований космического пространства.

В геологических целях используются материалы, получаемые с низко- и среднеорбитальных трасс. Межпланетные автоматические станции предназначены для проведения космических съемок планет Солнечной системы, а также получения глобальных снимков поверхности Земли. Первый в мире фотографический снимок Земли сделан с космического аппарата «Зонд-5» 18 сентября 1968 г. с расстояния 90 тыс. км. С помощью МАС полнен уникальный материал, позволяющий изучать строение планет Солнечной системы и их спутников (рис. 2.5, 2.6) и тем самым решать вопросы сравнительной и исторической планетологии. Недавно американское космическое агентство NASA опубликовало первые снимки Земли, сделанные с Марса с высоты почти 140 млн км.

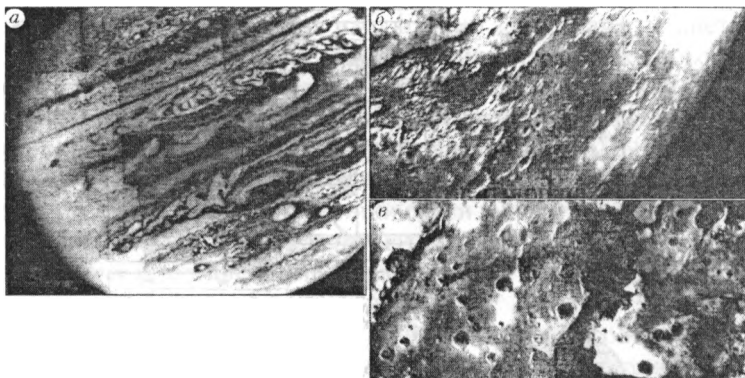


Рис. 2.5. Космические снимки: *а* — Юпитера, NASA; *б, в* — Марса, съемка сканирующим тепловым радиометром, установленным на советском аппарате «Фобос» (по Л. В. Ксанфомалити)

Искусственные спутники Земли предназначены для выполнения массовых разномасштабных съемок для различных отраслей народного хозяйства, прежде всего для метеорологических ис-

следований. ПКК и МКС летают по наклонным орбитам, которая позволяет проводить съемку поверхности Земли только до $\sim 60^\circ$ северной и южной широт.

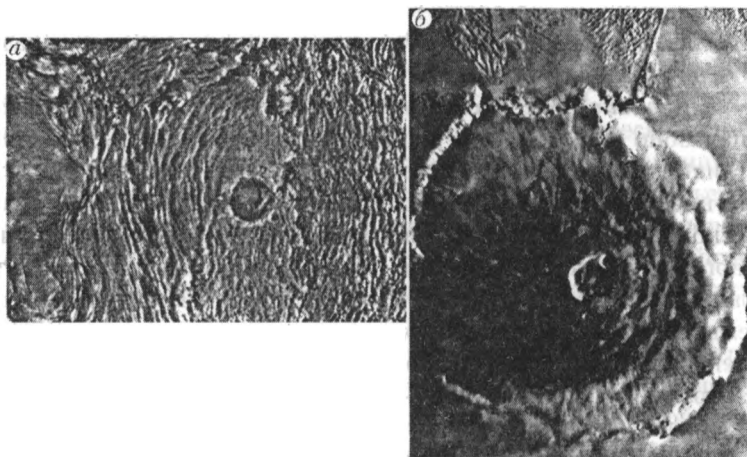


Рис. 2.6. Космические снимки: *а* — высочайшей вершины Венеры — горы Максвелла; *б* — высочайшей из известных в Солнечной системе вершин — горы Олимп на Марсе. Высота от подножия 27,4 км; средний диаметр по основанию — 600 км, вершины — 75 км; на периферии — крутые склоны (по Л. В. Ксанфомалити из работы А. Алисон и А. Мак-Ивена)

С космических летательных аппаратов осуществляют многие виды фотографических и нефотографических съемок, выполняемых в различных зонах спектра электромагнитных волн разной съемочной аппаратурой.

СЪЕМОЧНЫЕ СИСТЕМЫ

Фотографические съемочные системы. Фотографические системы — это фото- или электронные камеры, обеспечивающие одномоментное получение всего кадра снимка. При использовании однообъективных зеркальных аппаратов получают фиксированные, способные сохраняться длительное время изображения. Для съемки земной поверхности с пилотируемых космических кораблей в России используются фотографические системы КАТЭ-200, МК-4, КФА-1000, КФА-3000 и др. Фотографическая камера МК-4,

например, имеет спектральные каналы, работающие в зонах спектра: 0,45-0,51 мкм; 0,52-0,57 мкм; 0,64-0,69 мкм; 0,81-0,90 мкм. В диапазоне 0,58-0,80 мкм используется спектрзональная пленка, в остальных — черно-белая. Космические изображения отличаются высоким разрешением и могут быть увеличены в несколько раз без потери информативности.

Телевизионные системы работают в том же спектральном диапазоне (0,4-0,9), что и фотографические камеры. Основное отличие телевизионных систем от фотографических состоит в том, что вместо фотокамеры используется телекамера. Использование нескольких телекамер со светофильтрами позволяет получать многозональные изображения. Телевизионный аппарат состоит из блока и электронно-лучевой трубки. С помощью оптической системы изображение проецируется на видикон, где накапливаются электрические сигналы, пропорциональные яркости элементов изображения. Сигнал с видикона поступает в электронную систему обработки сигналов либо возвращается по пути прямого луча и затем подается в электронную систему обработки. В последнем случае (видикон с обратным ходом лучей) достигаются большая чувствительность системы и более высокое разрешение.

Сканерные системы регистрируют излучения последовательно по элементам и строкам. Получаемое изображение составляется из отдельных полос — сканов, которые могут перекрывать друг друга. Важнейшей характеристикой сканера являются угол сканирования (обзора) и мгновенный угол зрения, от величины которого зависят ширина снимаемой полосы и разрешение. В зависимости от величины этих углов сканеры делят на точные и обзорные. У точных сканеров угол сканирования уменьшают до $\pm 5^\circ$, а у обзорных увеличивают до $\pm 50^\circ$. Величина разрешения при этом обратно пропорциональна ширине снимаемой полосы. В настоящее время материалы сканерных космических систем являются самыми востребованными.

Сканирующие системы, расположенные на различных спутниковых платформах, имеют разные конструкции и принципы получения данных. Они состоят из сканера с датчиками, укомплектованными детекторами. Присваиваемые им уникальные названия и аббревиатуры позволяют идентифицировать носитель и съемочную систему. Например, Landsat TM (Landsat Thematic Mapper) — это

спутник Landsat со съемочной системой ТМ (тематический картограф), а SPOT — спутник для наблюдения за Землей (Satellite Pour L'observation de la Terre). В отечественной геологии используются материалы сканерных съемок с российских ИСЗ серии «Метеор». На этих спутниках установлены сканирующие устройства различной конструкции: с малым разрешением — МСУ-М, со средним разрешением — МСУ-С, с конической разверткой — МСУ-СК, с электронной разверткой — МСУ-Э. Преимуществом оптических камер с механическим сканированием по сравнению с телевизионными датчиками является более широкий спектральный диапазон съемки (от ультрафиолетового до инфракрасного — 0,3-14 мкм). Основным недостатком таких систем — наличие механического устройства, снижающего долговечность и надежность съемочной аппаратуры в целом.

Радиотепловые системы. Микроволновые (СВЧ) радиометры, регистрирующие радиотепловое излучение земной поверхности с длинами волн 1-700 мм, применяются при радиотепловой съемке. Разрешение радиотепловых систем низкое, зависит от высоты съемки и размеров антенны. Основная область применения — зондирование океанов для определения температуры и солености воды, состояния поверхности морей, определения границ ледяного покрова, определения влагосодержания в атмосфере, выявления нефтяных загрязнений. СВЧ- радиометры устанавливались на ИСЗ «Метеор», «Космос», «Нимбус», «Сиесет».

Радиолокационные системы используются при радиолокационной съемке в зоне электромагнитного спектра от нескольких миллиметров до метров. В воздушной и космической навигации радиолокаторы используют для определения высоты полета. Для радарной съемки обычно используются радиолокаторы бокового обзора (РЛБО), установленные на самолетах и ИСЗ (рис. 2.7). По-сылаемый с носителя пучок микроволнового излучения, выработанный специальным генератором, отражается от изучаемого объекта и фиксируется на приемнике, установленном на борту носителя. В РЛБО зондирующие радиоимпульсы излучаются в боковых направлениях по отношению к полету носителя. Радиолокационные системы имеют ряд преимуществ по сравнению с другими типами съемочных систем, поскольку микроволны радара могут проникать через атмосферу днем и ночью фактически при любых погодных

условиях, обеспечивая получение данных даже в туман, моросящий дождь, снегопад, облачность и при задымлении территории. При некоторых условиях такие волны могут проникать через земную поверхность, способствуя обнаружению погребенных объектов (эрозионной сети, разломов и пр.). Считается, что радиоволны могут проникать до глубины 5 м.

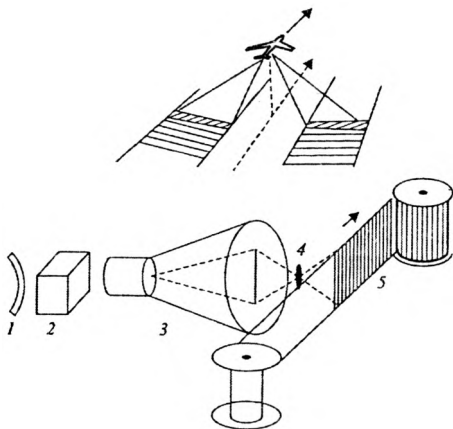


Рис. 2.7. Схема радиолокационной съемки (по Л. Е. Смирнову):

1 — антенна; 2 — приемник-передатчик; 3 — электронно-лучевая трубка; 4, 5 — фотобиблиографирующее устройство

ХАРАКТЕРИСТИКИ НЕКОТОРЫХ СЪЕМОЧНЫХ СИСТЕМ

К настоящему времени во многих странах мира на базе космических аппаратов функционируют системы дистанционного зондирования, предназначенные для изучения природных ресурсов. Это — российские «Ресурс-О» и «Ресурс-Ф», французский SPOT, американские Landsat, Ikonos, индийский IRS, японские JERS-1, ADEOS, ALOS, бразильский MESB, китайско-бразильский CBRS, европейские TRS, Envisat, канадский RADARS AT. Ниже приведены характеристики некоторых съемочных систем по данным интернет-сайтов.

Спутники NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration США) на полярных орбитах оборудованы сканером AVHRR с 4-5 широкими спектральными диапазонами, снимающими в ви-

димом, ближнем и дальнем ИК-диапазонах. Ширина полосы съемки 2400 км; пространственное разрешение низкое.

Новые спутники SeaStar и Terra на полярных орбитах (сканеры SeaWIFS, MODIS. MISR: среднее и низкое пространственное разрешение, средний охват, высокое спектральное разрешение). SeaWIFS (американский спутник SeaStar) — это сканер низкого пространственного разрешения (1100 м) с 8 спектральными зонами в диапазоне 0,402-0,885 мкм. Радиометр MODIS — один из ключевых съемочных приборов, установленных на борту американских спутников TERRA (на орбите с 1999 г.) и AQUA (на орбите с 2002 г.), осуществляющих исследования Земли из космоса по программе EOS (Earth Observing System) национального аэрокосмического агентства (NASA) США. MODIS относится к гиперспектральным радиометрам. Съемка выполняется в полосе 2330 км одновременно в 36 спектральных зонах видимого, ближнего, среднего и теплового инфракрасного диапазонов с пространственным разрешением 250, 500 и 1000 м и радиометрическим разрешением 12 бит на канал. Радиометр MODIS позволяет осуществлять ежедневный оперативный мониторинг территорий, при этом периодичность наблюдения зависит от ее размеров и географического положения, а также количества используемых спутников. Так, периодичность наблюдения при съемке одним спутником для южных и центральных районов России составляет 1-2, а для северных — до 2-3 раз в дневное время и столько же раз ночью. Пример космического снимка, Полученного камерой MODIS, приведен на рис. 2.8.



Рис. 2.8. Космический снимок Modis. Зимнебережный район. СЗ России

Landsat TM и ETM+ — Тематический Картограф Ландсат (высокое пространственное разрешение, средний пространственный охват, относительно высокая периодичность). Впервые спутники Landsat были запущены в 1972 г. Это была первая программа коммерческого использования данных дистанционного зондирования. С этого времени было запущено несколько спутников. Landsat-1, 2, 3, которые вели съемку камерами MSS, Landsat-4 и 5 — MSS и TM. Спутник Landsat-5 является рекордсменом, проработавшим на орбите более 22 лет, и продолжает передавать изображения, которые по качеству превосходят снимки многих аналогичных программ. Две российские станции принимают участие в приеме космической информации Landsat-5 в реальном масштабе времени в рамках международного проекта Mid-Decadal Global Land Survey (MDGLS). Цель программы — обновление глобальной карты Земли для оценки последствий изменения климата и хозяйственной деятельности человека. Спутник Landsat-5 осуществляет съемку кадрами размером 185x185 км с пространственным разрешением 30 м в 6 спектральных каналах видимого, ближнего и среднего участках инфракрасного (ИК) спектра и разрешением 120 м в длинноволновом участке ИК-спектра.

В 1999 г. запущен спутник Landsat-7. Космические снимки, получаемые Landsat-7, характеризуются широкой полосой захвата (185 км), наличием мультиспектральных изображений (8 спектральных каналов) и относительно высоким разрешением панхроматического канала (15 м). На сегодняшний день глобальный архив снимков Landsat-7 содержит покрытие практически всей поверхности Земли, причем для некоторых регионов многократное (например, вся территория России покрыта малооблачными снимками 2 и более раз). Признано, что при геологическом картировании и прогнозно-поисковых работах на различные виды полезных ископаемых КС с Landsat-7 предпочтительнее других.

Спутники Landsat работают на полярных солнечно-синхронных орбитах, частота повторной съемки на экваторе 16-18 дней (в зависимости от спутника). Данные сканера MSS (пространственное разрешение 80 м, 4 широкие спектральные зоны в диапазоне 0,5—1,1 мкм) доступны с 1972 г.; данные сканера TM (пространственное разрешение 30 м в видимом, ближнем и средних инфракрасных зонах, 120 м в тепловом диапазоне, семь спектральных зон в диапазоне

0,45–12 мкм) — с 1982 г. Полоса обзора для обоих сканеров — около 185 км.

Пример снимка, полученного Landsat, приведен на рис. I на цветной вклейке.

Французская программа SPOT (небольшой охват, высокое пространственное разрешение). Французские спутники и съемочные системы SPOT (Système Pour l'Observation de la Terre) начали работать в 1986 г. Космические снимки, получаемые SPOT-1, 2, 4, 5, имеют разрешение 2,5; 5 и 10 м в панхроматическом диапазоне и 5, 10, 20 м в трех спектральных диапазонах и отличаются высокой геометрической точностью. SPOT-5 имеет возможность получения на одном витке стереоизображений поверхности Земли с разрешением 10 м и со средней квадратической погрешностью 15 м. На рис. II на цветной вклейке приведены для сравнения космические снимки одного района, полученные съемочными системами Landsat и SPOT.

Съемочные системы высокого пространственного разрешения — ASTER, IRS-1C/1D, Ikonos, OrbView-3, QuickBird, «Ресурс ДК».

ASTER (Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer) — это многозональный сканер высокого разрешения, разработанный NASA совместно с японскими специалистами и установленный на спутнике Terra (EOS AM-1), запущенном в конце 1999 г. Это первый спутник программы EOS (Earth Observing System — Глобальный мониторинг поверхности Земли) в рамках Инициативы изучения планеты Земля (Earth Science Enterprise), проводимой NASA. Радиометр позволяет проводить съемку земной поверхности в 14 спектральных диапазонах от видимого до дальнего инфракрасного с разрешением от 15 до 90 м. Глобальный охват снимками во всех каналах осуществляется не реже, чем раз в 16 дней, а в трех каналах видимого и ближнего ИК-диапазона — раз в пять дней. С помощью ASTER предполагается также получение высокоинформативных стереоскопических (за счет изменения направления съемки) изображений земной поверхности.

Программа *IRS* (Indian Remote Sensing) создавалась как одна из самых высокотехнологичных национальных программ Индии. Космический департамент правительства страны начал программу IRS в 1988 г. с запуска КА IRS 1 А. В 1995 г. был запущен на поляр-

ную орбиту спутник IRS-1 C, в 1997 г. — аналогичный спутник. Их аппаратура обеспечивает съемку с разрешением 5,8 м в панхроматическом режиме (полоса обзора 70 км) и одновременную многозональную съемку с разрешением 23 и 188 м в полосе обзора 140 и 810 км соответственно.

В 2005 г. осуществлен запуск IRS-P5 (Cartosat-1), предназначенный для получения стереоизображений с высокими метрическими характеристиками. В состав Cartosat-1 входят два панхроматических сканера с разрешением 2,5 м для съемки в полосе 30 км. Режим стереосъемки позволяет создавать цифровые модели рельефа местности — основу для создания трехмерных моделей. Расчетная точность определения высот — 5 м. Основной задачей спутников IRS является обеспечение систематического и повторяющегося получения данных о земной поверхности при почти постоянных условиях освещения. В настоящее время в рамках программы IRS ведется регулярный прием информации IRS-1C/1D в двух приемных центрах — Иркутске и Москве.

Крупнейшей в мире компанией на рынке ДДЗ является GeoEye, владеющая в настоящее время тремя действующими космическими аппаратами: OrbView-2, Ikonos, OrbView-3. Спутник OrbView-2 относится к классу аппаратов низкого разрешения (1,1 км), но позволяет проводить мультиспектральную съемку в полосе 2800 км и получать изображения всей поверхности Земли целиком ежедневно.

Спутник Ikonos, запущенный в 1999 г., представляет собой первое поколение американских коммерческих спутников *метрового разрешения* (1 м — пространственное разрешение в панхроматическом режиме и 4-метровое в многозональном). Сенсор на этом спутнике производит съемку с радиометрическим разрешением 11 бит/пиксел, что означает 2048 градаций яркостей в одном канале. Данные со спутника Ikonos принимают более 12 наземных станций, рассредоточенных по всему миру. Архив снимков спутника покрывает территорию площадью 230 млн км². На рисунке III на цветной вклейке и 2.9 приведены примеры космических снимков, полученных со спутника Ikonos.

OrbView-3 позволяет получать панхроматические снимки с пространственным разрешением 1 м и мультиспектральные — разрешением 4 м в полосе шириной 8 км. Изображения позволяют

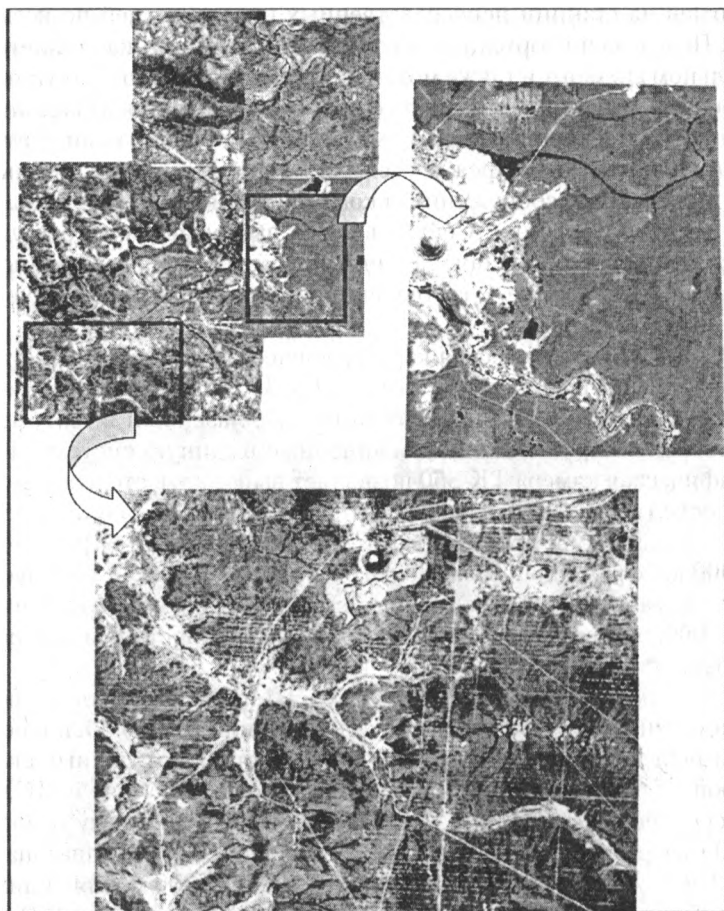


Рис. 2.9. Космические снимки района Западной Якутии, полученные со спутника Ikonos, и их увеличенные фрагменты

проводить точный обзор и картографирование жилых строений, автомобилей и пр. и создавать высокоточные цифровые карты и 3-мерные модели с «высоты птичьего полета». 4-метровое цветное изображение обеспечивает цветную и инфракрасную информацию. Спутник повторно пролетает над каждой местностью менее чем через 3 дня и может снять до 21 км^2 за 10-минутный проход. Их прием

возможен на станции непосредственных пользователей по всему миру. Передача информации на наземные станции осуществляется в реальном времени, а также может сохраняться на борту спутника. Относительно высокая стоимость снимков определяется их высокой детальностью и хорошими радиометрическими свойствами. Такие снимки используются прежде всего для составления электронных карт инженерных сооружений и коммуникаций городов, в практике землепользования. Сейчас в США завершается изготовление спутников второго поколения с полуметровым разрешением WorldView-1 и GeoEye-1; суточная производительность GeoEye-1 составит 700 тыс. км².

Российская космическая картографическая система «Комета» включает топографическую камеру ТК-350, панорамную камеру КВР-1000, два звездных фотоаппарата, лазерный высотомер и приборы синхронизации, объединенные в единую систему. Топографическая камера ТК-350 позволяет выполнять стереосъемку местности (с продольным перекрытием 60 % или 80 % и поперечным — 10-30 %) полосой захвата 200 км при длине маршрутов до 2000 км с разрешением на местности 10 м. В состав бортовой съемочной аппаратуры входит также камера высокого разрешения КВР-1000, обеспечивающая разрешение на местности 2 м при полосе захвата 160 км.

Спутники «Ресурс» (МСУ-СК, МСУ-Э) (среднее и высокое пространственное разрешение, широкий и средний охват). Основной объем передаваемой информации с них составляют данные сканирующих радиометров МСУ-Э (высокого разрешения) и МСУ-СК (среднего разрешения). МСУ-Э обеспечивает полосу обзора 45-60 км с разрешением 30-45 м в трех спектральных диапазонах, а МСУ-СК — 600-710 км — с разрешением 150-250 м в пяти диапазонах видимого и ближнего ИК и тепловом диапазонах. В России популярны данные со спутников «Ресурс-Ф». Спутники этой серии оснащаются фотографическими камерами КФА-1000, КФА-3000, МК-4, КАТЭ-200. Данные с этих сенсоров требуют перевода в цифровую форму путем сканирования. Съемка с «Ресурса-Ф» проводилась в основном до 1994 г. «Ресурс-ФЗ» выполнял съемки камерой КФА-3000 в оптическом диапазоне с пространственным разрешением от 2 до 30 м. Пример снимка, полученного со спутника «Ресурс», приведен на рис. 2.10, а технические характеристики съемочных систем — в таблицах 2.1 и 2.2.

С 1999 г. сразу пять стран запустили гражданские и коммерческие спутники с аппаратурой метрового и субметрового разрешения, которую ранее применяли только оборонные структуры. Это Ikonos 2, QuickBird-2, OrbView-3 (США), EROS-B (Израиль), KOMPSAT-2 (Корея) и Cartosat-2 (Индия). Самые детальные изображения поставляют спутники QuickBird-2 (0,6 м) и EROS-B (0,7 м). В июне 2006 г. получены первые изображения метрового разрешения со спутника «Ресурс-ДК». Основным преимуществом спутника «Ресурс-ДК» являются большой размер кадра (28 км) и связанная с этим большая производительность. Как отмечают специалисты, с появлением на орбите этого аппарата связываются большие надежды.

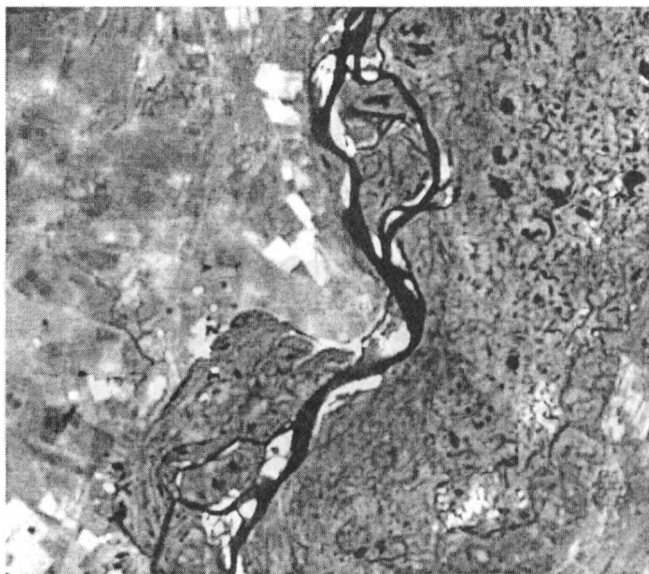


Рис. 2.10. КС со спутника «Ресурс-01». «СканЭкс». Долина р. Волги

В последнее время в мире запускаются каждый год 10-15 военных и гражданских космических аппаратов с аппаратурой съемки Земли. В 2007 г. спутники дистанционного зондирования впервые запустили Индонезия (LAPAN-Tubsat), Египет (Egypotsat-1) и Саудовская Аравия (Saudisat).

Таблица 2.1 Технические характеристики российских фотографических съемочных систем. По «Временные требования... МПР РФ, 1999»

Характеристики фотографических съемочных систем	МК-4	К ФА-1000	КАТЭ-200	К ФА-3000	ТК-350	КВР-1000
Разрешение на местности, м	6-15	3-8	20-30	2-3	8-12	2
Спектральные диапазоны, мкм	0,46-0,51 0,52-0,57 0,64-0,69 0,81-0,90 0,58-0,80	0,57-0,76 0,56-0,81	0,50-0,60 0,60-0,70 0,70-0,90	0,60-0,70	0,57-0,90	0,60-0,70

Таблица 2.2. Характеристики российских сканерных съемочных систем (по М. Ю. Смирнову и др., 1999)

Характеристики сканерных съемочных систем	МСУ-Э	МСУ-СК	МР-2000М	«Алмаз» (радиолокационная)
Разрешение на местности, м	35-45	150x250 600 — в 5-м канале	2000	15
Спектральные диапазоны, мкм (для радиолокационной съемки длина волны, см)	0,50-0,60 0,60-0,70 0,80-0,90	0,50-0,60 0,60-0,70 0,70-0,80 0,80-1,10 10,3-11,8	0,50-0,70	9,6

2.2. ВИДЫ АЭРОКОСМИЧЕСКИХ СЪЕМОК

ФОТОСЪЕМКА

Фотосъемка является самым информативным видом исследований из космического и воздушного пространства, так как при этом используется максимум солнечной энергии. Фотосъемка из космоса зависит от многих факторов: высоты и скорости полета космического летательного аппарата, освещенности Земли по трассе полета и пр. К недостаткам ее относится, кроме сильного влияния состояния атмосферы, низкая скорость передачи изображений на Землю. Сложность использования космических фотоснимков состоит в том, что они, как правило, нуждаются в сканировании, трансформации и географической привязке, что не дает возможности получить высокой точности отображения местности.

В зависимости от типа применяемой аппаратуры и фотоплёнок, фотографирование может производиться во всем видимом диапазоне электромагнитного спектра (рис. 2.11), в отдельных его зонах, а также в ближнем инфракрасном диапазоне. В настоящее время используется фотоаппаратура с высоким разрешением, позволяющая получать космические снимки с перекрытием 60 % и более.

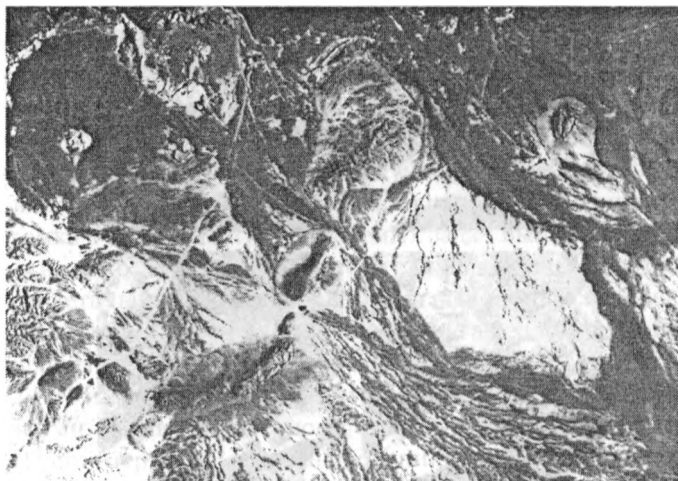


Рис. 2.11. Космический фотоснимок. Центральный Оман
(по П. Кронбергу)

ТЕЛЕВИЗИОННАЯ СЪЕМКА

Телевизионная съемка из космоса проводится в основном с ИСЗ с помощью автоматических телевизионных систем. Получаемые материалы по сравнению с фотографическими имеют меньшие точность и разрешение, но эти съемки позволяют оперативно получать изображения. При *фототелевизионной* съемке сочетаются достоинства методов. Производится фотографирование и обработка снимка на борту летательного аппарата, а передача изображения осуществляется телевизионным способом по каналам связи.

МНОГОЗОНАЛЬНАЯ СЪЕМКА

Многозональная съемка позволяет получать одновременно несколько изображений одной сцены в узких спектральных диапазонах (рис. 2.12). В зависимости от числа одновременно регистрируемых при съемке спектральных зон съемочные системы бывают многозональные (многоспектральные) и гиперспектральные, имеющие десятки и сотни каналов регистрации. Сканерные изображения можно получить во всех спектральных диапазонах, но особенно эффективным является видимый, а также ИК-диапазон.

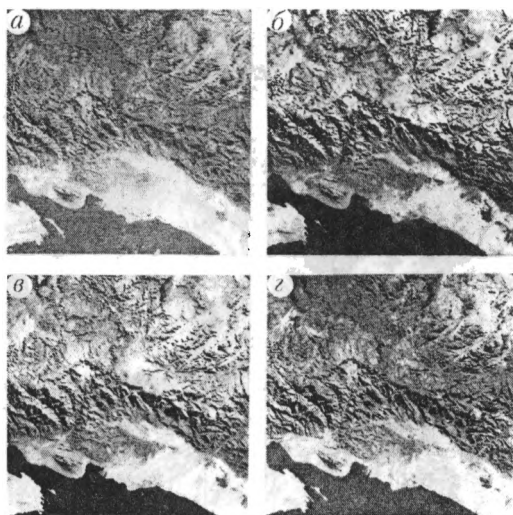


Рис. 2.12. Узкозональные снимки. Эфиопия (по П. Кронбергу):
а — 0,5-0,6 мкм; б — 0,6-0,7 мкм; в — 0,7-0,8 мкм; г — 0,8-0,9 мкм

ИНФРАКРАСНАЯ СЪЕМКА

Инфракрасная съемка (ИК), или тепловая съемка, основана на выявлении тепловых аномалий путем фиксации теплового излучения объектов Земли, обусловленного как собственной температурой геологических тел, так и отраженным солнечным излучением. Температурные неоднородности поверхности Земли возникают в результате неодинакового нагрева различных ее участков. Солнечное и эндогенное тепло Земли нагревает геологические объекты по-разному в зависимости от литологического состава пород, тепловой инерции, влажности, альбедо и многих других причин. Например, днем и вечером речные долины нагреваются больше, чем вершины гор, но быстро остывают и в конце ночи становятся холоднее их.

Инфракрасный диапазон спектра электромагнитных колебаний делится на три части: ближний (0,75-1,3 мкм), средний (1,3-3,0) и дальний (3,0-30). ИК-излучение, проходя через атмосферу, избирательно поглощается, в связи с этим тепловую съемку можно вести только в пределах так называемых «окон прозрачности» — местах пропускания ИК-лучей. Наилучшее прохождение осуществляется в диапазонах длин волн 3,6-4,1; 8,7-9,01; 10,29-12,00 мкм. В ближнем ИК-диапазоне используется отраженное солнечное излучение. Здесь можно применять специальные фотопленки и работать с красным фильтром. Съемка в этом диапазоне называется ИК-фотосъемкой. В других окнах прозрачности работают измерительные приборы — тепловизоры, преобразующие с помощью электронно-лучевых трубок невидимое ИК-излучение в видимое, фиксируя тепловые аномалии. ИК-съемку можно проводить в ночное время. ИК-съемка в зависимости от решаемых задач выполняется на различных высотах. При съемке нефте- и газопроводов, когда требуется высокая детальность исследований, она выполняется с предельно малой высоты (до 100 м). Для мониторинга геологической среды оптимальными высотами являются 200-1200 м.

На ИК-изображениях светлыми тонами фиксируются участки с высокими, темными — с относительно более низкими температурами. Например, разрывные нарушения, особенно обводненные, изображаются в виде темных полос за счет испарения воды и охлаждения пород в зоне разрывов. Яркость тона прямо пропорциональна интенсивности тепловой аномалии. Материалы ИК-съемок широко

применяются для изучения районов вулканической активности (рис. 2.13, 2.14). Тепловые ИК-съемки применяются приструктурно-



Рис. 2.13. Аэрофотоснимок (а) и тепловой (б) снимки Этны, Сицилия (по П. Кронбергу)

Аэрофотоснимок показывает эффузивную деятельность вулканов: выходы газов, свежеизлившиеся и изливающиеся лавы, движущиеся вниз по склону. Изображение теплового сканера показывает излучение новых лавовых потоков, центрального и бокового кратеров (последний на АФС не виден), различаются активные и неактивные потоки

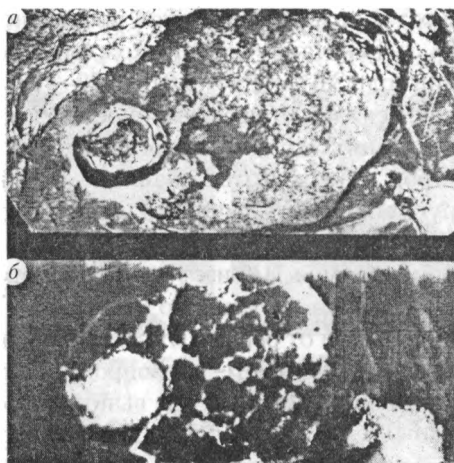


Рис. 2.14. Панхроматический аэрофотоснимок (а) и тепловой (б) снимок вершинной области Килауэа — одного из стратовулканов о. Гавайи (1962 г.). Диапазон съемки теплового сканера 4,5-5,5 мкм (по П. Кронбергу)

На тепловом снимке на дне кратера проявляется светлым пятном застывшая, но еще горячая лава. Световые полосы маркируют места выходов водяного пара и горячих газов

геологических и прогнозно-поисковых исследованиях, прежде всего при поисках таких полезных ископаемых, которые создают геотермические аномалии (газ, нефть, сульфидные руды). С параметрами температурного поля дневной поверхности и их динамикой связаны особенности геологического строения, в том числе глубинного. Применяются инфракрасные снимки также при изучении карстовых, оползневых процессов, явлений заболачивания и подтопления, для обнаружения скрытого самовозгорания угольных пластов, торфяников, лесных пожаров и т. д. Важной областью применения инфракрасных снимков является контроль над промышленными стоками и загрязнением прибрежных акваторий.

При картировании литологических комплексов тепловые сканеры применяются редко. Однако они позволяют провести разделение пород, которое на панхроматических и многозональных снимках не видно (рис. 2.15).

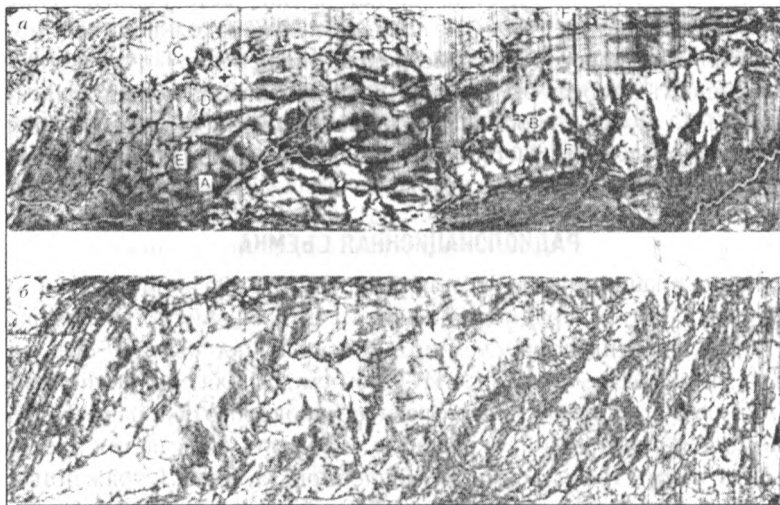


Рис. 2.15. Тепловые снимки р-на гор Арбакл. Шт. Оклахома США
(по П. Кронбергу):

а — съемка перед восходом солнца (6 часов мест. времени). В т. **А** видна граница между известняками (темный серый тон) и доломитами (светлый серый тон); **б** — съемка в 11 часов. Известняки и доломиты не разделяются по различиям серого тона. Перед восходом солнца доломиты были немного теплее, чем известняки, поэтому излучали тепло сильнее и выделились светлым тоном

ИК-съемка активно прогрессирует и используется для решения разнообразных исследовательских, мониторинговых и хозяйственных задач.

РАДИОТЕПЛОВАЯ СЪЕМКА

Радиотепловая съемка (РТ-съемка, пассивная радиолокационная) основана на регистрации естественного радиоизлучения земной поверхности в микроволновом диапазоне (0,3-10 см). Регистрируемые тепловые контрасты обусловлены различиями излучения нагретых тел, которые существенно зависят от влажности, вещественного состава и текстурных особенностей горных пород. Естественное радиоизлучение регистрируется специальной аппаратурой чувствительностью в десятые доли градуса в малом диапазоне азимутального угла.

Пассивная радиолокационная съемка по сравнению с инфракрасной имеет преимущества, так как плохие метеорологические условия (облачность, туман) не препятствуют прохождению радиоволн миллиметрового и сантиметрового диапазонов. Почти полная прозрачность атмосферы для волн этого диапазона делает эффективной РТ-съемку из космоса, но в связи с ее малой разрешающей способностью в геологии она применяется лишь при региональных исследованиях.

РАДИОЛОКАЦИОННАЯ СЪЕМКА

Радиолокационная (РЛ), или радарная, съемка является активной и проводится в радиодиапазоне электромагнитного спектра. Радиолокационные аэросъемки в России начались в 70-80-х гг. XX в., из космоса — в 1983 г. с ИСЗ «Космос». Для радарной съемки обычно используются радиолокаторы бокового обзора (РЛБО). С помощью передатчика и антенны местность облучается электромагнитными импульсами определенной частоты. Отраженный сигнал принимается приемником и поступает в электронный блок обработки. Отраженные от земной поверхности радиоволны воспроизводятся в электронно-лучевой трубке в виде одной строки, яркость которой в разных частях зависит от интенсивности отраженного сигнала. Изображение формируется бегущим по строке (полосе) световым пятном, а вдоль кадра строится за счет поступательного перемещения носителя. Поскольку объекты местности

имеют разные наклон и дальность от носителя, то отраженные сигналы поступают в приемник в разное время. Этот принцип работы радиолокатора, фиксирующего различное время прохождения зондирующего импульса до объекта и обратно, используется для получения РЛ-снимков. Чем дальше объект, тем больше времени надо на прохождение отражаемого сигнала до его фиксации электронно-лучевой трубкой, совмещенной со специальной кинокамерой. Российский комплекс «ИМАРК» позволяет проводить съемку в 4 диапазонах (4 см, 23 см, 68 см и 250 см) и получать материалы с разрешением от 5 до 30 м.

Особенности применения методов дистанционного зондирования в радиоволновом диапазоне при решении геологических задач обусловлены возможностью получения информации о характере рассеяния, поглощения и отражения радиоволн как от земной поверхности, так и от близповерхностных горизонтов. При этом характер получаемой информации связан с особенностями геологического строения либо через изображение элементов и компонентов ландшафта, либо за счет отражения от подповерхностных горизонтов. Характер отраженного сигнала во многом зависит от рельефа местности — угла наклона и ориентировки отражающих форм и элементов рельефа (рис. 2.16). При РЛБО возникают длинные тени, что делает РЛ-изображения похожими на аэрофотоснимки, снятые при низком стоянии Солнца. Тень обуславливает наличие «мертвых зон», особенно широких в горных районах.

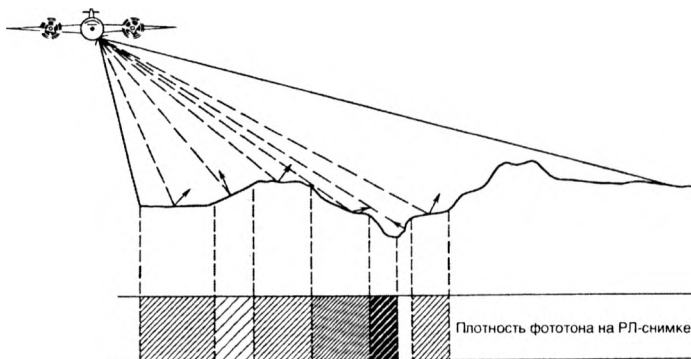


Рис. 2.16. Зависимость фототона РЛ-снимка от наклона и ориентации склона как аналогов освещенности (по П. Кронбергу)

РЛ-снимки имеют относительно низкое разрешение (до 30–50 м), высокую контрастность, создающую «псевдостереоскопичность», и характеризуются искажением контуров. При дешифрировании радарных снимков следует учитывать тон изображения и его текстуру. Тоновые неоднородности могут варьировать от черного до светлого. На тон изображения большое влияние оказывает влажность пород. Крупные реки всегда имеют черный тон. Текстурные неоднородности РЛ-изображения зависят от степени расчлененности рельефа и могут быть тонкосетчатыми, полосчатыми, массивными и др. Полосчатая текстура РЛ-изображения характерна для районов, сложенных слоистыми толщами (рис. 2.17а), массивная — для районов развития интрузивных образований. Особенно хорошо на РЛ-снимках проявляются гидросеть (рис. 2.17б) и рельеф, а через рельеф — литофациальные комплексы и тектонические структуры (рис. 2.18). РЛ-снимки используются для поисков и картирования источников подземных вод, выходящих на поверхность, для выявления и картирования карста, зон подтопления и затопления, загрязнения водной среды. Но основной геологической информацией, получаемой с помощью РЛ-снимков, являются элементы тектонического строения территорий (разрывные нарушения, зоны трещиноватости, складчатые формы и др.).

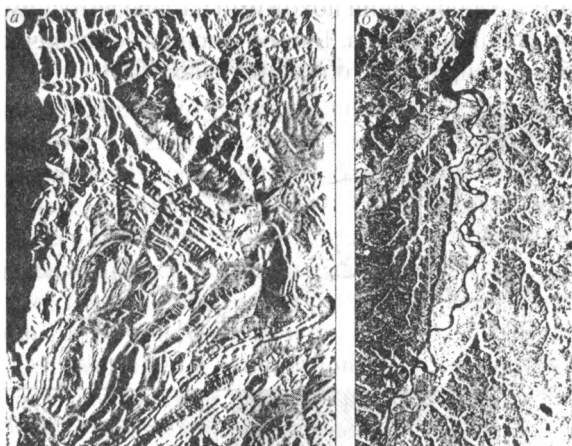


Рис. 2.17. Радиолокационные снимки. Корякский регион:

а — синклиналиальная складка; б — грабенообразная долина реки

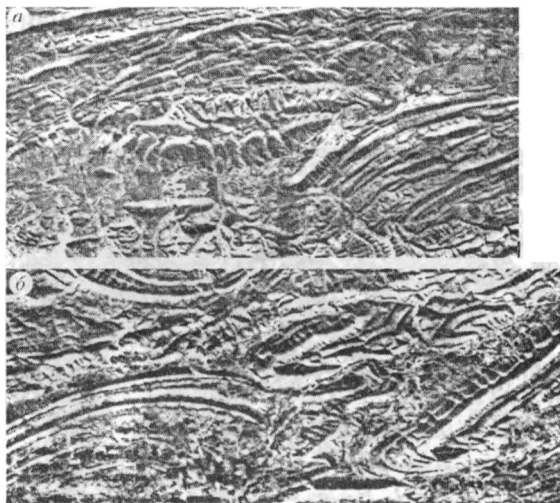


Рис. 2.18. Литофациальные комплексы и тектонические структуры.

Юго-запад США. Радиолокационный снимок (по П. Кронбергу)

Формы рельефа определяются, прежде всего, различной устойчивостью пород к выветриванию и изменениями особенностей напластования осадочных толщ песчаников, известняков, глин, мергелей. Светлые тона отвечают местам, где поступающий сигнал отражается оптимально: на наклонных поверхностях, плоскостях напластования и кузтах, направленных к антенне

В России РЛ-снимки применялись для поисков структур, связанных с кимберлитовым магматизмом в Зимнебережном районе Архангельской области на участке трубы «Пионерская». Это позволило уточнить строение, а также выделить новые структуры, потенциально перспективные на алмазоносность.

На ИСЗ радарные системы бокового обзора стали устанавливать с конца 70-х г. Первый радиолокатор был установлен на американском спутнике «Сисат», предназначенном для наблюдения за океаническими процессами (рис. 2.19). Позднее был сконструирован радар, испытанный во время полетов космического корабля Шаттл. Информация, полученная с помощью этого радара, представляется в виде черно-белых и ложноцветных изображений или записей на магнитную ленту. Разрешающая способность радара — 40 м. Информация поддается числовой и аналоговой обработке, такой же, что и сканерные снимки системы Landsat. РЛ-снимки применяются для

изучения трудно- или недоступных территорий Земли — пустынь и областей, расположенных в высоких широтах, а также поверхности других планет. РЛ-снимки используются при структурных и тектонических исследованиях.



Рис. 2.19. Радиолокационный снимок с океанологического спутника «Сисат». Залив Эйсселмер (Зейдер-зе), Нидерланды. Прямоугольники — сельскохозяйственные поля, темный тон — каналы

СПЕКТРОМЕТРИЧЕСКАЯ СЪЕМКА

Спектрометрическая съемка (СМ) является многозональной съемкой в относительно узких частях спектра. Она проводится с целью измерения спектральных отражательных или излучательных свойств объектов. Объекты, в том числе горные породы, имеют различную отражательную способность, поэтому отличаются величиной коэффициента спектральной яркости. Знание их расширяет возможности геологического дешифрирования и делает его более достоверным.

СМ-съемка делится на три вида:

- 1) микроволновую съемку (0,3 см - 1,0 м), являющуюся универсальной, так как исключает влияние атмосферы;
- 2) ИК, или тепловую (3,0-1000 мкм), съемку, с помощью которой выявляются температурные неоднородности по энергетической яркости изучаемых объектов;

- 3) спектрометрическую видимого и близкого ИК-спектра излучения (0,30-1,40 мкм), фиксирующую спектральное распределение отражательного радиационного излучения.

Геологические объекты отражаются на КС с разной контрастностью, зависящей от их спектральных особенностей. Работа по составлению банка данных о спектральных характеристиках горных пород чрезвычайно трудоемка. Чтобы ее выполнить, необходимо произвести спектрометрические измерения горных пород, а также иных ландшафтных объектов на разных расстояниях, в различные времена года, на участках с различной степенью обнаженности. Эти данные необходимы для систем автоматического поиска и распознавания объектов.

ЛИДАРНАЯ СЪЕМКА

Лидарная съемка является активной. Фактически это геохимическая съемка приповерхностных слоев атмосферы, ориентированная на обнаружение микроэлементов или их соединений, концентрирующихся над современно активными геологическими объектами. Принцип ее заключается в облучении пространства фиксированной длиной волны, в результате которого происходит возбуждение когерентных микроэлементов или частиц в атмосфере или на поверхности. Излучение возбужденного объекта регистрируется приемниками. Частота излучателя настраивается на резонансные частоты поглощения сканируемого компонента (например, приповерхностного метана), так что в случае его заметных концентраций соотношения откликов в точках концентрирования и вне них будут резко различными.

Активное дистанционное зондирование на основе лазерных локаторов (лидаров) обеспечивает новые уникальные возможности, недоступные пассивным и активным системам, и позволяет оперативно получать более полные и детальные сведения о различных характеристиках атмосферы. Лидарную съемку необходимо производить в комплексе с другими дистанционными и наземными геологическими исследованиями.

Таким образом, дистанционное зондирование позволяет получать изображения земной поверхности (видимый диапазон), картину ее температурного поля (тепловой диапазон), интегральные характеристики рассеяния, поглощения и отражения радиоволн

разной длины и поляризации от земной поверхности и подповерхностных горизонтов (радиоволновой диапазон). Технические средства ДЗ нового поколения дают возможность получать информацию с космических носителей в нескольких диапазонах электромагнитного спектра с регистрацией измерений в цифровой форме с малым (1000 м и более), средним (600-300 м) и высоким (10-2 м) пространственным разрешением. Дальнейшее развитие многоспектральных систем представляет собой гиперспектральная съемка, когда при высоком пространственном разрешении количество каналов увеличивается с 3-7 до десятков и сотен.

Крупнейшей в мире на рынке ДЗ является компания GeoEye (объединение Space Imaging и OrbImage), владеющая в настоящее время тремя действующими космическими аппаратами разных классов (OrbView-3, Ikonos, OrbView-2), в том числе двумя высоко-го разрешения из трех имеющихся сейчас в мире. Будущее компании связывается с аппаратами нового поколения. По данным аналитиков, 20 % мирового рынка спутниковых снимков захватила Индия. В тройку лидеров входит также Франция. По данным «СканЭкс», компании GeoEye и ImageSat International предлагают услуги «виртуального оператора», когда клиент с собственной станции закладывает на борт спутника IKONOS-2 или EROS рабочую программу съемок и становится владельцем принимаемой информации. Другая разновидность сервиса — «виртуальный терминал» — позволяет клиенту заказывать через интернет-интерфейс съемку на заданный район и получать данные или готовые продукты. «Виртуальный оператор» является для России пока еще экзотикой, «виртуальный терминал» доступен.

На российском рынке ДЗ лидирующее положение по предоставлению данных дистанционного зондирования занимают фирмы ИТЦ «СканЭкс», ООО «Дата+», ЗАО «Совзонд». В Интернете можно заказать результаты работ многих съемочных систем. Прежде всего это каталоги, позволяющие бесплатно получить информацию о наличии снимков определенного типа на данную территорию, оценить их качество по данным в каталоге и уменьшенному просмотровому изображению. Сейчас существуют системы ДЗ, данные с которых можно получать по сети Интернет бесплатно. Как правило, это метеорологические системы с низким геометрическим разрешением (1 км и менее), наибольшее распространение получили данные со спутников NOAA.

Глава 3

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ И МЕТОДИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ДЕШИФРИРОВАНИЯ МАТЕРИАЛОВ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ

3.1. МАТЕРИАЛЫ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ

АЭРОФОТОСНИМКИ

При геологическом дешифрировании используют аэрофотоснимки (контактные отпечатки), репродукции накидного монтажа, фотосхемы, фотопланы. Аэрофотоснимки (АФС) изготавливают контактным путем с негатива — первичного материала аэрофото-съемки. Контактные отпечатки для геологических исследований обычно заказывают у организаций-фильмодержателей. Наиболее распространенный формат аэрофотоснимков — 18х18 см.

Масштабы аэрофотоснимков. По масштабу АФС условно подразделяют на крупномасштабные (крупнее 1 : 10 000), сред-немасштабные и мелкомасштабные (мельче 1 : 50 000). Масштаб аэроснимка (M) равен отношению фокусного расстояния аэрофо-тоаппарата к высоте фотографирования (рис. 3.1): $M = 1/m = f/H$, где m — знаменатель масштаба.

Применение крупно- и среднемасштабных аэроснимков при геологическом картировании позволяет выявить детали Геологическо-го строения, значительно повысить точность проведения границ и достоверность оконтуривания геологических объектов. Однако на мелкомасштабных снимках, обладающих большей обзорностью и генерализацией изображения, лучше видны общие закономерности геологического строения и возможна экстраполяция уста-новленных границ на смежных площадях. При выборе масштаба аэроснимка для геологического картирования стремятся к тому, что-бы на снимке были видны положение изучаемой площади в общей структуре и полностью или значительная часть наиболее крупного геологического объекта, подлежащего изучению. Разрешающая спо-собность снимков должна отвечать самому мелкому геологическому объекту (или его ландшафтным индикаторам), который в заданном масштабе карты должен быть выделен. Разрешающая способность аэросъемки и, соответственно, масштаб снимка зависят от высоты

съемки. При большой высоте аэросъемки разрешающая способность снижается и, следовательно, уменьшается масштаб исследования.

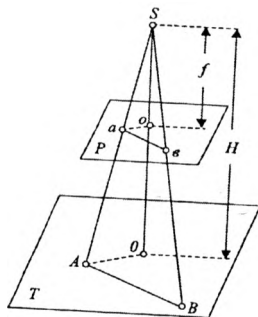


Рис. 3.1. Геометрическая схема получения фотоизображения

T — фотографируемая поверхность; P — плоскость снимка; AB — объект местности; av — изображение объекта на снимке; O — геометрический центр снимка; S — объектив фотоаппарата; H — высота фотографирования; f — фокусное расстояние фотоаппарата

На черно-белых АФС при нормальном зрении между белым и черным цветами удастся различить 32-35 оттенков. Установлено, что при последовательном увеличении масштаба аэрофотоснимков наступает такой момент, когда дальнейшее увеличение не дает новой информации, не выявляются новые детали геологического строения. Это так называемый верхний предел геологической информативности, который при равных технических условиях зависит от ландшафта и геологического строения района.

Геометрические свойства аэрофотоснимков. Только в идеальном случае при ведении аэрофотосъемки плоской местности получают ее точный план. Аэрофотоснимки содержат искажения, обусловленные непостоянством масштаба в пределах АФС, отклонением во время съемки оси фотоаппарата от вертикали и неровностями рельефа. Обычно это отклонение составляет не более 3° . Фиксирование аэрофотоаппаратов во время съемки с помощью гиросtabilизирующих установок позволяет уменьшить его до $10-20'$.

Геометрическая схема получения наклонного снимка представлена на рис. 3.2. Главная точка аэрофотоснимка (O) находится на основании перпендикуляра, опущенного из центра проекции на

плоскость прикладной рамы (аэронегатива). Главная точка расположена на аэрофотоснимке на пересечении прямых линий, соединяющих противоположные координатные метки аэрофотоснимка (см. врезку на рис. 3.2). Точка n , лежащая на пересечении вертикального луча N , проходящего через центр S и плоскость аэронегатива, называется точкой надира. На наклонном снимке точки смещаются по линиям, соединяющим эти точки с главной точкой аэрофотоснимка. Величина смещения точки, возникающая за счет искажения «за наклон», тем больше, чем дальше от главной точки снимка. Точка C — точка нулевых искажений.

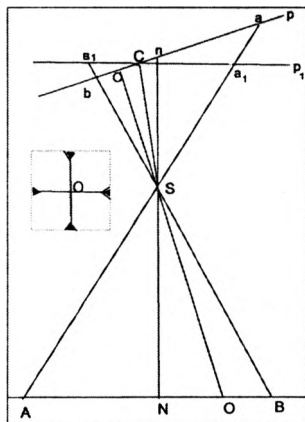


Рис. 3.2. Схема получения наклонного аэрофотоснимка (пояснения в тексте)

В зависимости от отклонения оптической оси фотоаппарата относительно вертикали можно получать плановые и перспективные снимки земной поверхности (рис. 3.3).

Наиболее существенными видами искажений, которые необходимо учитывать при дешифрировании, являются искажения, вызываемые рельефом снимаемой местности. На рисунке 3.4 приведена схема получения горизонтального аэрофотоснимка расчлененной местности. На снимках с горным рельефом склоны, обращенные к центру снимка, могут получаться шире, чем если бы они были изображены на картах в ортогональной проекции, и наоборот, склоны, обращенные от центра, выглядят суженными, в результа-

те чего получается асимметрия хребтов и долин, отсутствующая в действительности. Величина линейного смещения точки снимка прямо пропорциональна ее расстоянию от главной точки снимка и превышению соответствующей точки местности относительно начальной плоскости и обратно пропорциональна высоте полета.

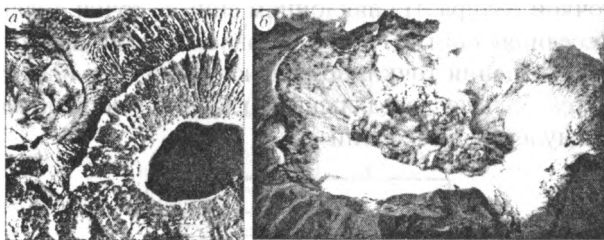


Рис. 3.3. Аэрофотоснимки вулканов:

a — плановый; *b* — перспективный

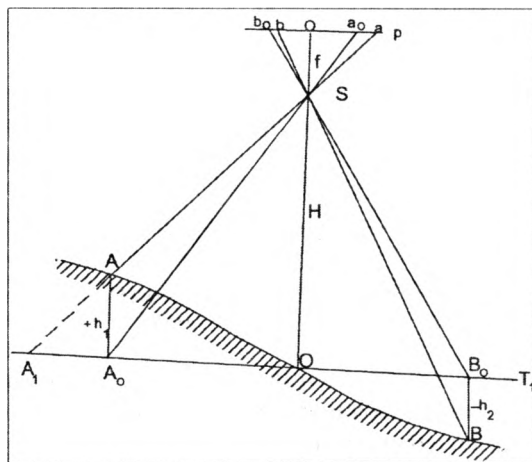


Рис. 3.4. Схема получения горизонтального аэрофотоснимка расчлененной местности

T , — начальная плоскость; A_0B_0 — ортогональная проекция точек A и B на начальную плоскость; ab — изображения точек A и B на снимке; aa_0 и bb_0 — смещения точек аэрофотоснимка за рельеф; $+h_1$ и $-h_2$ — превышения точек A и B относительно начальной плоскости T_1 ; Oo — вертикальная ось аэрофотоаппарата, проходящая через геометрический центр снимка; S — объектив фотоаппарата; H — высота фотографирования; f — фокусное расстояние фотоаппарата

Искажения «за наклон» и «рельеф» приводят к изменению масштаба аэрофотоснимка в разных его частях и нарушению подобия. Так как наиболее значительные искажения возникают на краях АФС, дешифрирование ведется в пределах так называемой рабочей (полезной) площади снимка. Эти искажения можно исключить с помощью фотограмметрических работ.

Материалы аэрофотосъемочных работ. Кроме аэрофотоснимков, которые получают контактным путем из первичного материала съемки — негатива, изготавливаются и другие материалы. Для удобства работы со снимками и общего обзора района используют *репродукции накидного монтажа*, которые получают за счет фотографирования АФС одной трапеции. Снимки располагают так, чтобы в пределах аэрофотосъемочного маршрута каждый последующий АФС перекрывал предыдущий на величину продольного перекрытия, а контуры возможно точнее совпадали. Снимки совмещают также по поперечному перекрытию, а их номера оставляют открытыми. Полученный накидной монтаж фотографируют с уменьшением в 2-5 раз.

В практике геологического дешифрирования широко используются также *фотосхемы* — изображения местности, полученные путем монтажа центральных частей нетрансформированных снимков по общим контурным точкам. Фотосхемы бывают простые, приведенные и уточненные. Простые фотосхемы составляют из контактных неприведенных отпечатков, сохраняющих ошибки, свойственные нетрансформированным АФС. Приведенные фотосхемы изготавливают из АФС, приведенных к одному масштабу. Монтаж уточненных фотосхем осуществляется на основу с опорными точками. Фотосхемы применяются в качестве обзорного материала и основы для составления геологических карт, широко используются также репродукции фотосхем, которые изготавливают в масштабах геологических карт.

Фотографическое изображение местности, полученное путем монтажа трансформированных снимков, называется *фотопланом*. Фотоплан является контурной картой местности с фотографическим изображением ситуации. Фотоплан с ситуацией и рельефом в горизонталях называется топографическим фотопланом, или *фотокартой*. С помощью фотокарты можно проводить измерения как по топографической карте.

Аэрофотоснимки используются в геологии давно. В настоящее время переходят к цифровым технологиям получения изображений.

КОСМИЧЕСКИЕ СНИМКИ

Особенности изображения на космических снимках зависят от технических и природных факторов. Основными техническими факторами, влияющими на информативность космических снимков, являются параметры полета (траектория, высота, тип орбиты, скорость движения); характеристики космических съемочных систем; спектральный диапазон; разрешающая способность съемочных систем; способы обработки материалов. К естественным природным факторам относятся состояние атмосферы, сезон съемки, ландшафтно-климатические особенности территории.

Космические снимки различаются по масштабам, пространственному разрешению, обзорности, спектральным характеристикам. Эти параметры определяют возможности дешифрирования на КС различных объектов и те геологические задачи, которые целесообразно решать с их помощью.

Масштабы космических снимков, получаемых фотографическими камерами, зависят от высоты фотографирования, фокусного расстояния оптики, коэффициента увеличения, углов наклона и кривизны земной поверхности. Так, фотоаппаратурой, установленной на околоземных КЛИА, при высоте полета 200-500 км получают снимки масштабов 1 : 50 000 — 1 : 250 000.

Типы разрешения космических снимков. Космические снимки характеризуются четырьмя различными типами разрешения: спектральным, пространственным, радиометрическим и временным. *Спектральное* разрешение определяется величиной интервалов (зон) длин волн спектра электромагнитного излучения, к которым чувствительны датчики. Чем больше зон и чем они уже, тем больше информации можно получить для выделения исследуемых объектов. *Пространственное* разрешение характеризуется линейным размером области на земной поверхности, представляемой одним пикселем. Оно определяется параметрами съемочной системы. Чем выше разрешение, тем меньше его числовое значение (т. е. разрешение 10 м означает, что на снимке будут видны объекты больше или равные 10 м, расположенные рядом и отличающиеся

но яркости). Различают снимки низкого, среднего и высокого разрешения, измеряющегося соответственно километрами, сотнями или десятками метров. *Радиометрическое* (яркостное) разрешение характеризует число бит в цифровой записи каждой зоны снимка. Оно определяется чувствительностью детекторов. *Временное* разрешение определяется частотой получения снимков для конкретной области. Например, спутник Landsat может снимать одну и ту же область Земли один раз в 16 дней, а SPOT — один раз каждый день. Временное разрешение является важным фактором при изучении динамики изменений на территории.

В характеристиках разрешения заложена основная информация, на основе которой можно определить пригодность снимка для того или иного вида работ.

Уровни генерализации космических снимков. При дешифрировании материалов дистанционного зондирования важна обзорность. Чем больше различных объектов попадает одновременно в поле зрения исследователя, тем выше вероятность правильной идентификации индивидуальных объектов и уверенного проведения их границ. Качественно новую информацию получают при изменении масштаба снимков в 3-5 раз. Естественно, что уровень генерализации КС определяет, какого ранга геологические объекты могут одновременно находиться в поле зрения исследователя. Для изучения разномасштабных геологических структур применяются КС разных уровней генерализации.

Уровни генерализации определяются масштабом и пространственным разрешением снимка. По уровням масштабной генерализации КС разделяют на глобальные, континентальные, региональные, локальные и детальные (табл. 3.1). Масштаб и разрешающая способность снимка определяют размерность опознаваемых объектов. Обзорность зависит от размеров участков земной поверхности, отображенной на снимке.

Космические снимки *глобального уровня генерализации* получают с межпланетных автоматических станций и высокоорбитальных искусственных спутников с высот 20-30 тыс. км. Такие КС охватывают полушарие Земли (рис. 3.5) или большую его часть и позволяют выявлять наиболее протяженные зоны глубинных разломов, гигантские кольцевые образования, выявлять характер сочленения крупных структурных элементов земной коры.

Таблица 3.1. Классификация геологических карт и материалов дистанционных съемок (МДС) по уровням масштабной генерализации (по В. Н. Брюханову)

Типы геологических карт	Масштабный ряд карт	Уровни генерализации МДС	Масштабный ряд снимков
сводные	1: 5 000 000	глобальный	1 : 5 000 000, разрешение 1000 м и мельче
	1: 5 000 000	континентальный	1 : 2 500 000, разрешение первые сотни метров
региональные, мелкомасштабные	1: 1000 000 (1: 500 000)	региональный	1: 1 000 000-1: 500 000, разрешение многие десятки метров
среднемасштабные	1: 200 000 (1 :100 000)	локальный	1: 200 000-1 : 100 000, разрешение первые десятки метров
крупномасштабные	1: 50 000 (1: 25 000)	детальный	крупнее 1:100 000, разрешение 10 и более метров



Рис. 3.5. Космический снимок Земли глобального уровня генерализации (NASA, «Аполлон-17»). Снимок получен в июле 1972 г. во время миссии американских астронавтов на Луну

КС континентального уровня генерализации (телевизионные и сканерные снимки со спутников) имеют разрешение первые

сотни метров, а площади, изображенные на них, составляют сотни тысяч — миллионы квадратных километров (рис. 3.6). На КС этого уровня генерализации обнаруживаются структурно-геологические особенности крупных областей, выделяются вещественно-структурные комплексы горных пород, глубинные разломы; с их помощью проводится тектоническое районирование.

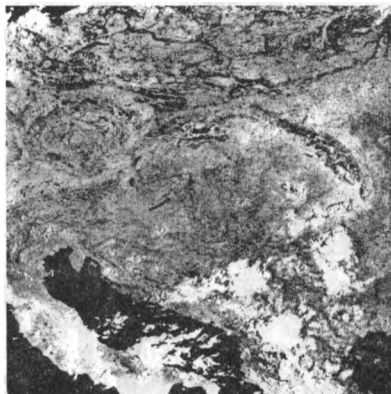


Рис. 3.6. Космический снимок Западной Европы. Континентальный уровень генерализации

Космические снимки регионального уровня генерализации получают сканирующими, радиолокационными, а также фотографическими съемочными системами с пространственным разрешением не хуже 80-100 м. Они позволяют распознавать объекты размером от многих десятков до сотен метров на площади захвата в первые десятки тысяч квадратных километров. С их помощью выявляются ранее неизвестные элементы геологического строения, проводится структурно-минералогическое районирование.

КС *локального уровня генерализации* получают фотографическими системами с пилотируемых космических кораблей и долговременных орбитальных станций с помощью высококачественной аппаратуры, а также с ресурсных спутников (Landsat). Они обеспечивают пространственное разрешение до 20-30 м. Эти КС позволяют существенно уточнять геологическую структуру регионов и представляют основной материал для космогеологического картирования в масштабах 1:1 000 000 и 1:500 000, а также для со-

ставления специализированных тематических карт геологического содержания, в том числе прогнозно-минерогенических.

КС *детального уровня генерализации* близки к высотным аэрофотоснимкам. Их получают фотографическими, сканирующими и радиолокационными системами с высококачественной аппаратурой и используют при космогеологических исследованиях наравне с аэрофотоматериалами. Выделяют еще уровень генерализации *подробный*, когда пространственное разрешение менее 2 м, а масштаб снимков 1:10 000 и детальнее.

На рис. 3.7 представлены космические снимки разных уровней генерализации на территорию Камчатки, а на рис. 3.8 — космический снимок высокого пространственного разрешения

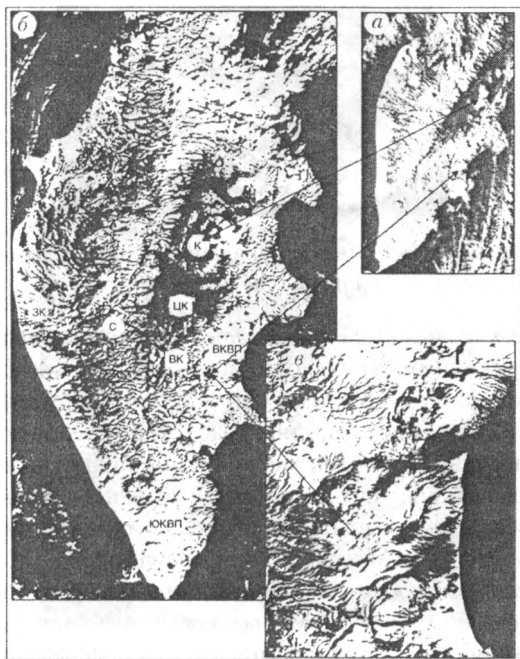


Рис. 3.7. Космические снимки Камчатки:

а — континентального, *б* — регионального, *в* — локального уровней генерализации. ВКВП — Восточно-Камчатский вулканический пояс, ЮКВП — Южно-Камчатский вулканический пояс, ЦК — Центральнo-Камчатская депрессия, ЗК — Западно-Камчатский прогиб, С — Срединный хребет, ВК — Восточно-Камчатский хребет, К — Ключевская группа вулканов



Рис. 3.8. Космический снимок высокого пространственного разрешения, полученный со спутника OrbView-3. «СканЭкс»

3.2. ОБРАБОТКА И ПРЕОБРАЗОВАНИЯ МАТЕРИАЛОВ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ

СПЕКТРАЛЬНАЯ ОТРАЖАТЕЛЬНАЯ СПОСОБНОСТЬ ПРИРОДНЫХ ОБРАЗОВАНИЙ

Для геологического изучения территорий по МДЗ необходимы представления о спектральной отражательной способности природных образований. Возможность идентификации объектов по данным дистанционного зондирования основывается на том, что объекты разных типов (горные породы, почвы, вода, растительность

И т. д.) по-разному отражают И поглощают электромагнитное излучение в том или ином диапазоне длин волн. Е. Л. Криновым была разработана спектрометрическая классификация природных образований в видимой области спектра, которая затем была продолжена в ИК-область. Все многообразие объектов в ландшафте разделено на четыре класса, каждый из которых отличается своеобразной кривой спектральной яркости (рис. 3.9).

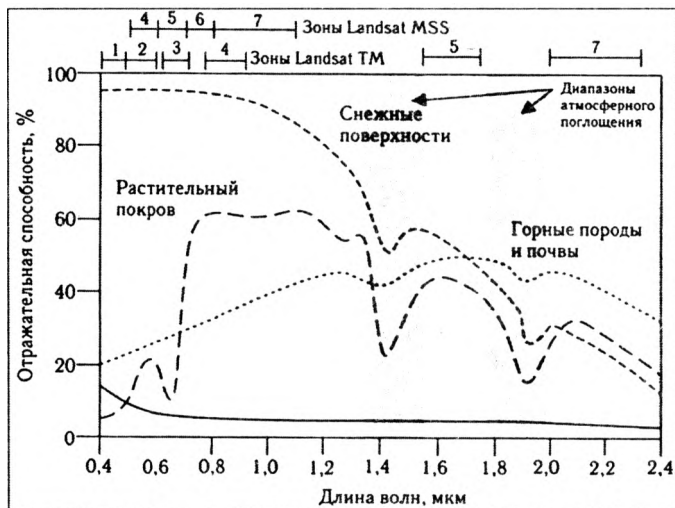


Рис. 3.9. Спектральная отражательная способность основных классов природных объектов (серым цветом показаны зоны атмосферного поглощения) (по И. К. Лурье и А. Г. Косикову)

I класс — горные породы и почвы — характеризуется увеличением спектральных яркостей по мере приближения к красной зоне спектра.

II класс — растительный покров — отличается максимумом отражательной способности в зеленой зоне спектра, минимумом — в красной и резким увеличением отражения в ближней ИК-зоне электромагнитного спектра.

III класс — водные поверхности — характеризуется монотонным уменьшением отражательной способности от сине-фиолетовой к красной зоне спектра.

IV класс — снежные поверхности и близкие к ним облака — обладает наиболее высокими значениями спектральной яркости с небольшим их понижением в ближней ИК-зоне. Понижение резко увеличивается при насыщении снега водой.

Установлено, что для дешифрирования геологических объектов информативна красная зона, она же наиболее информативна для выделения растительности. Синяя зона находит применение при картографировании береговых линий водоемов, дифференциации почв и растительности, выделении антропогенных объектов. Зеленая зона соответствует зеленому цвету здоровой растительности, но также используется для картографирования водоемов. Часть ближней ИК-области со значениями 2,08-2,35 мкм применима для выделения разломов, а также определения влагосодержания почв и растительности. Область теплового ИК-излучения в интервале 3,55-3,93 мкм может быть использована для выделения участков снежного и ледового покрова, а также для обнаружения пожаров. Зная соотношения интенсивности отражения различными классами объектов в пределах различных каналов снимка, можно осознанно добиваться усиления или ослабления влияния определенного класса объектов путем арифметических операций между каналами.

ПРЕДВАРИТЕЛЬНАЯ И СПЕЦИАЛЬНАЯ ОБРАБОТКА МАТЕРИАЛОВ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ

Работа с материалами дистанционного зондирования включает два основных этапа: собственно дешифрирование и интерпретация результатов дешифрирования. На первом этапе применяются различные виды обработки и преобразования МДЗ.

Обработка материалов дистанционного зондирования бывает предварительной и специальной (тематической). Предварительная обработка всегда предшествует тематической обработке. Ранее обработка МДЗ выполнялась преимущественно фотографическими и оптико-электронными методами, в настоящее время она ведется с помощью компьютерных программ.

Предварительная обработка МДЗ включает геометрические и радиометрические коррекции исходных снимков, масштабирование, координатную привязку и монтаж отдельных снимков в единое изображение.

Геометрическая коррекция исправляет ошибки изображения, возникающие вследствие несовершенства съемочных систем и технологии съемки. Такая коррекция снимков может осуществляться при помощи либо специальных оптико-электронных трансформаторов, либо после перевода снимков в электронную форму с использованием компьютерных технологий и позволяет корреспондировать МДЗ с топографической основой.

Радиометрическая коррекция исключает искажения на снимках, обусловленные состоянием атмосферы в момент съемки и оптическими свойствами съемочной системы. Она выполняется путем применения специальных фильтров и технологических приемов получения изображения с минимальными искажениями тонового поля; цифровых снимков — компьютерными средствами. Компьютерные средства используются также для выявления локальной слабоконтрастной облачности, которую можно принять за особенности изображения ландшафта.

В настоящее время предварительную обработку, включая монтаж отдельных снимков в единое изображение (рис. 3.10; IV на цветной вклейке) и его координатную привязку, выполняют специальные организации, у которых можно заказать необходимые материалы.

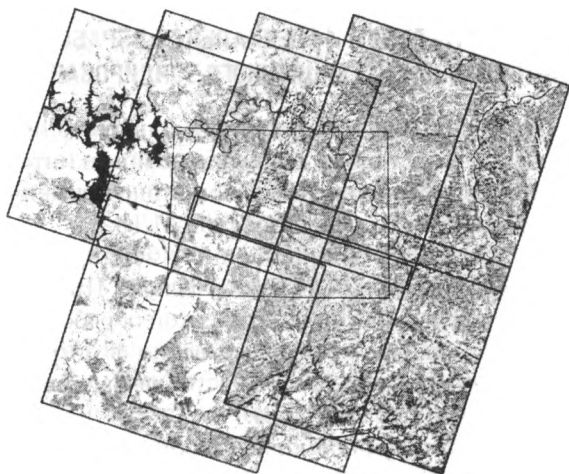


Рис. 3.10. Пример покрытия космическими снимками Landsat района исследований (показан тонким контуром в центре)

Специальная (тематическая) обработка МДЗ применяется для извлечения максимально возможного количества информации при дешифрировании. В настоящее время такая обработка выполняется средствами компьютерной техники при использовании не только цифровых космо- и аэроснимков, но и исходных фотоснимков, предварительно переведя их в цифровую форму. Тематическая обработка позволяет представить в более удобном для восприятия виде те компоненты изображения, которые информативны для решения конкретных задач, для выделения геологических объектов. Тематической обработкой возможно преобразование структуры изображения и спектральных характеристик МДЗ.

Широко применяется *синтез спектральных каналов*. Изображения, полученные в отдельных узких зонах спектра, могут представляться как снимки, выполненные в моноцветовой гамме. Система создания цветов в мониторе основывается на физических свойствах естественного солнечного света: любой цвет можно воспроизвести, используя красный, зеленый и синий. Изображениям отдельных зон спектра могут присваиваться любые из трех основных цветов: «синие» (Blue), «зеленые» (Green), «красные» (Red). При комбинации разных значений красного, зеленого и синего общее количество возможных цветов огромно (256х256х256). Путем перебора вариантов цветовых преобразований различных каналов съемки отыскиваются наиболее информативные (рис. V, VI на цветной вклейке).

Классификация — использование отношений попиксельных спектральных характеристик изображения путем построения спектрального образа объекта. Применяется контролируемая и неконтролируемая классификация. При неконтролируемой классификации пиксели изображения автоматически разбиваются на указанное количество спектральных классов. При наличии дополнительной информации о районе используется метод контролируемой классификации: задаются эталонные области (области обучения), по которым выделяются все элементы территории, имеющие сходные спектральные характеристики. Полученные классы могут векторизоваться в тематические слои: озера и водотоки, затопляемые области, леса, болота, инфраструктура и пр.

Получение отдельных изображений каких-либо элементов снимка называют *вычленением* (рис. 3.11).

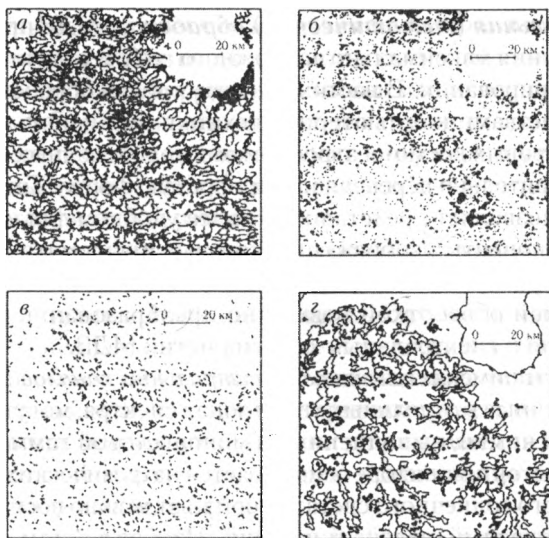


Рис. 3.11. Схемы геоиндикаторов, выделенных в автоматическом режиме по КС КАТЭ-200, спектральный диапазон 0,7-0,8 мкм. Тимано-Печорская нефтегазоносная провинция (по И. О. Смирновой, А. А. Русановой, К. Л. Липияйнен):

а — эрозийная сеть; **б** — озера; **в** — линеаменты; **г** — горизонтали рельефа

Фильтрация. Операции фильтрации направлены на выделение тех или иных деталей изображения, усиления природных и/или антропогенных неоднородностей изображения. Низкочастотная фильтрация подчеркивает крупные структурные элементы и может быть использована при уточнении блокового строения территории. Высокочастотная фильтрация, наоборот, подчеркивает наиболее мелкие структурно-вещественные комплексы и делает контрастными линейные геологические элементы. Направленную высокочастотную фильтрацию рекомендуют проводить при подготовке изображения к линеamentному анализу. Кроме того, существуют специальные фильтры, используемые в основном для подчеркивания контуров объектов (рис. 3.12, 3.13). Принцип действия фильтров заключается в некотором преобразовании значений яркости каждой точки изображения на основе информации о яркости ее соседей в какой-либо достаточно ограниченной окрестности. Так,

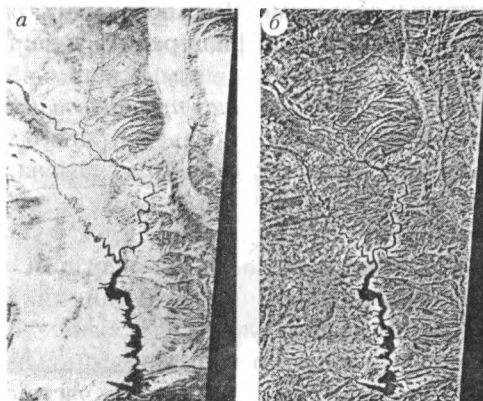


Рис. 3.12. Космический снимок Landsat (канал 5): *а* — оригинал; *б* — после цифровой обработки (фильтрации) (по П. Кронбергу)

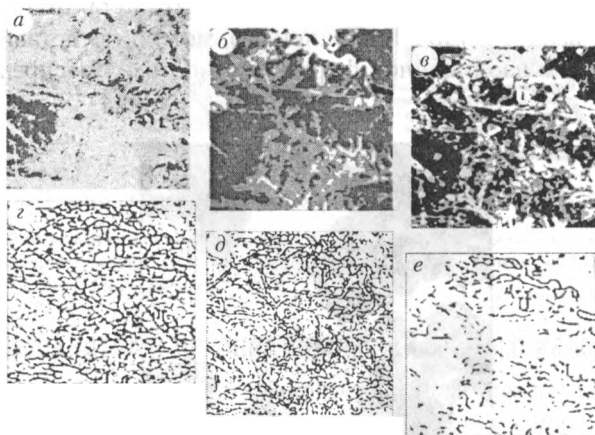


Рис. 3.13. Примеры преобразований космического снимка Landsat.

Район Западной Якутии (по Д. Г. Загубному):

а — исходное изображение; *б* — сглаживание Гаусса; *в* — градиентное преобразование; *г-д* — выделение «тах» с различными пороговыми значениями; *е* — удаление «шума»

сглаживающие фильтры (Average, Brown, Median, Lev, Nagao, Graham и др.) позволяют снять шум и получить однородные участки изображения. Фильтры, подчеркивающие перепады яркости (Sobel, Sharp, Prewitt, и др.), используются при поиске границ между раз-

личными объектами и областями. Разработаны программы, позволяющие проводить поканальную фильтрацию, выбирать интервал фильтрации, исключать случайные «шумы» и пр.

Межканальные (арифметические) преобразования. Информация, имеющаяся в материалах многозональной (многоспектральной) и гиперспектральной съемок, может быть извлечена при арифметических операциях (сложение, вычитание, деление, умножение) с данными разных спектральных каналов. К настоящему времени выработаны стандартные межканальные операции, помогающие проследить изменение спектральных характеристик изображения и выделить объекты, имеющие различия в выбранных спектральных диапазонах. Кроме построения соотношений, возможны более сложные манипуляции, целесообразность которых часто определяется методом проб и ошибок.

Континуализация — перевод дискретных элементов изображения в изображение непрерывное, при котором происходит трансформация изображения. Так, например, можно представить сеть линеаментов в изолинейной форме плотности их распределения (рис. 3.14).

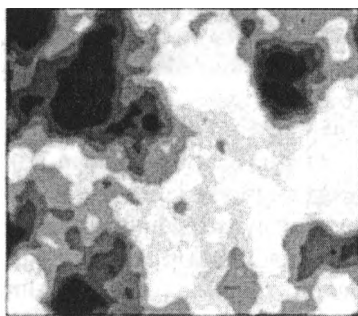


Рис. 3.14. Плотность линеаментов, полученная в автоматическом режиме из схемы сети линеаментов

Тематическая обработка предусматривает преобразования структуры изображения и спектральных характеристик МДЗ и далеко не ограничивается вышеперечисленными способами. Выбор способов тематической обработки МДЗ определяется характером решаемой природоресурсной задачи и, конечно, опытом

исполнителя и его научными взглядами. Специализированные программные обеспечения позволяют проводить предварительную и тематическую обработку МДЗ и формировать банк данных (рис. 3.15).

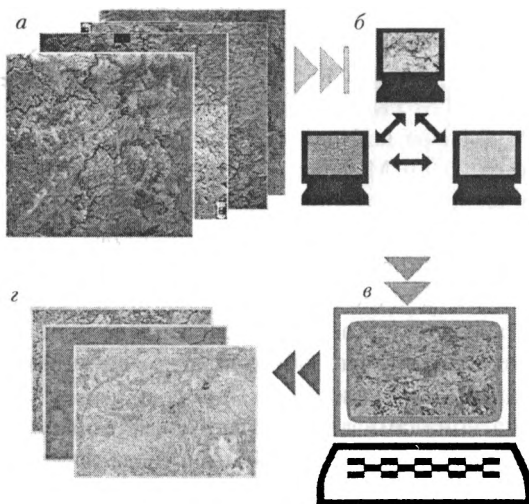


Рис. 3.15. Технологическая схема обработки МДЗ (по Ю. Н. Серокурову)

а — первичные космические изображения на твердых копиях; **б-в** — компьютерная обработка космических изображений: **б** — предварительная, **в** — тематическая; **г** — электронный банк данных

ОБРАБОТКА И ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ЦИФРОВОГО РЕЛЬЕФА

Анализ рельефа при дешифрировании данных дистанционного зондирования имеет большое значение, так как он является косвенным, но часто основным геоиндикатором геологических объектов. Основой для анализа рельефа могут служить доступные в Интернете базы высотных отметок или же оцифрованные по топографическим картам горизонтали с высотными отметками.

Благодаря интенсивному развитию сети Интернет и дистанционного исследования Земли из космоса в свободном доступе появилось большое количество данных о рельефе земной поверхности. Широко известна глобальная цифровая модель высотных отметок ГТОРО30 (DEM) с интервалом сетки 30' (~1 км по меридиану).

В 2000 г NASA (National Aeronautics and Space Administration) и NGA (National Geospatial-Intelligence Agency) была осуществлена миссия по радарной стереосъемке поверхности Земли — SRTM (Shuttle Radar Topography Mission) и получены данные более чем на 80 % поверхности суши между 56° южной и 60° северной широты. Разрешающая способность данных ~30 м или 1'. На основании баз высотных отметок GTOPO30 и SRTM составлена 500-метровая модель рельефа DTM (Digital Terrain Model). Информативность 500-метрового рельефа, как правило, значительно выше, чем рельефа, полученного из DEM-файлов рельефа GTOPO30. Наиболее четко это проявлено в экваториальных и средних широтах (рис. VII на цветной вклейке). В настоящее время наиболее эффективными технологиями дистанционного сбора данных о рельефе местности являются лазерное авиационное сканирование и радарная съемка. Космические радиолокационные снимки позволяют строить высокоточные модели рельефа любых участков земной поверхности независимо от погодных условий.

Другими материалами для компьютерной обработки рельефа могут служить топографические карты, переведенные из растрового формата в векторный. Для получения рельефа в привычном виде проводится перепроецирование (например, из географической проекции в проекцию Гауса—Крюгера или Меркатора) (рис. 3.16).

Обработка рельефа может включать различные преобразования и фильтрации, позволяющие выделять интересующие особенности рельефа: сильно расчлененные участки, мелкие водотоки и возвышенности, получать генерализованную и объемную модель рельефа и пр. (рис. 3.17; 3.18). При необходимости рассчитываются такие параметры, как густота водотоков, характер их взаимоотношений (изотропия, простираие, плотность и т. д.), которые позволяют выделять блоки различного размера и линейные структуры, в том числе трансрегионального ранга.

Компьютерные программы обработки рельефа позволяют выделять линеаменты и линеаментные зоны, выраженные в современном рельефе, поверхности выравнивания, речные и троговые долины, склоны разной крутизны и пр. Трехмерные (3D) модели рельефа дают наглядное представление о соотношении древних и современных форм, а совмещенные с дистанционными или геологическими данными — новую информацию об изучаемых объектах.

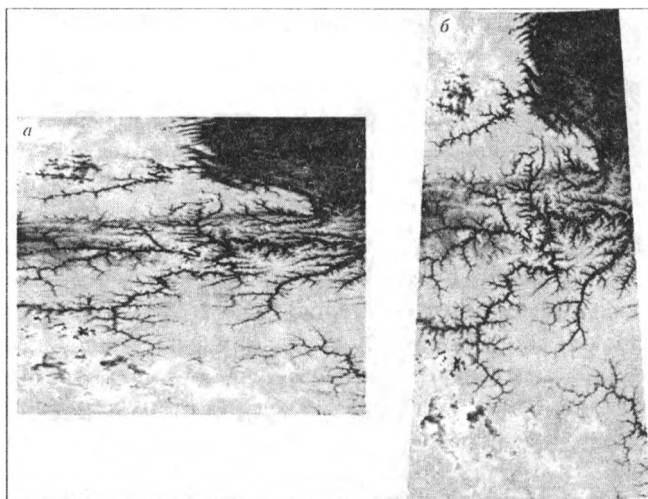


Рис. 3.16. Проекции рельефа ГТОРО30: *а* — географическая; *б* — Меркатора. Восточная Сибирь

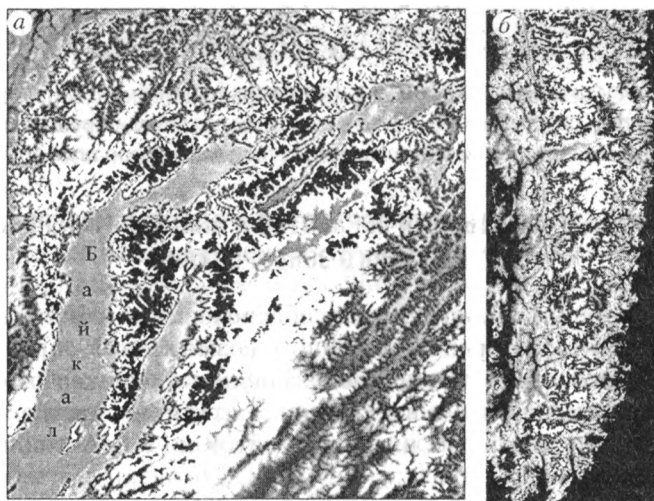


Рис. 3.17. Модели цифрового рельефа ГТОРО30: *а* — Байкальская рифтовая зона и сопредельные территории; *б* — Сихотэ-Алинь



Рис. 3.18. Объемная модель рельефа SRTM района горного сооружения Саян (по Д. Г. Загубному). Четко проявлены разломы, нарушающие рельеф горного обрамления впадины (светлый однородный тон)

ПРОГРАММНЫЕ ПАКЕТЫ ДЛЯ ОБРАБОТКИ И АНАЛИЗА МАТЕРИАЛОВ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ

В современном программном обеспечении имеется целый ряд пакетов ГИС, предоставляющих возможность обработки космических и аэрофотоснимков, различных видов картографической и геофизической информации. Рассмотрим кратко некоторые из них (по данным интернет-сайтов и ГИС-Ассоциации России).

Коммерческие пакеты программ обычно имеют универсальное ядро и настраиваемые на конкретные задачи модули. Специальные программные продукты настроены на решение узкого класса задач.

Использование этих пакетов позволяет решать практически любые задачи дистанционного исследования территорий. Как отмечают специалисты, на российском рынке серьезно представлены три системы — ERDAS Imagine, ER Mapper, TNTmips.

Система *ERDAS Imagine* разработана фирмой ERDAS Incorporation (США) и является лидирующим программным продуктом, ориентированным на работу с изображениями. Ядром программного обеспечения ERDAS Imagine 8,5 является один из трех вариантов базовых пакетов: IMAGINE Essentials, IMAGINE Advantage, IMAGINE Professional. Каждый следующий пакет включает предыдущие и расширяет его функциональные возможности. Базовый пакет включает функции: геометрические преобразования, трансформирования и привязки данных к системам координат и картографическим проекциям; построение бесшовных мозаик из нескольких изображений, объединяющихся в один файл; векторизации растровых данных; гистограммные преобразования, сравнения; цветовые преобразования; фильтрации; анализ методом главных компонент; средства классификации (с обучением и без обучения); модуль обработки данных РЛ-съемки. Достоинством системы являются самый полный набор функциональных возможностей среди аналогичных пакетов, интеграция с ArcInfo и ArcSDE, мощная система классификации на основе экспертных систем, возможности выбора области обработки, многоплатформенность. Стоимость этого программного обеспечения довольно высока, в результате чего пользователю обычно доступны только отдельные пакеты.

Одна из наиболее полных систем обработки МДЗ, конкурентная пакету ERDAS Imagine, — *ER Mapper* (для рабочих станций и IBM PC), разработанная австралийской компанией Earth Resource Mapping Ltd. и являющаяся одним из лидеров на рынке обработки данных дистанционного зондирования. К достоинствам системы относятся, кроме уникальной технологии обработки данных, интегрированный трехмерный и перспективный просмотр моделей, просмотр поверхностей «в полете»; перспективное отображение в одном окне нескольких 2D и 3D-поверхностей; возможность создания алгоритмов в диалоговом режиме с использованием трехмерных функций; построение цифровых моделей рельефа; наличие блока обработки космических радиолокационных снимков.

Система *TNTmips* разработана компанией Microimages (США) и предназначена для обработки данных дистанционного зондирования, цифровой картографии, ГИС. ГИС-пакет *TNTmips* обладает всеми стандартными возможностями растровых и векторных ГИС и средствами для работы с моделями рельефа, позволяет объединять растровые, векторные, ГИС, САД или TIN-данные и базы данных в едином окне. Пакет построен на едином и одинаковом для всех вычислительных платформ формате данных, входящих в проект.

Система *IDRISI* (США) названа в честь арабского географа и картографа XI в. Идриси. Пакет программ разработан для обучения ГИС-технологиям. Это растровый ГИС-пакет со всеми стандартными возможностями автоматизированной обработки изображений. Большой набор модулей обработки изображений предназначен для анализа пространственных данных в виде картографических изображений средствами ГИС-технологий, обработки дешифрирования МДЗ, создания и редактирования тематических карт, планов и схем и пр. Достоинствами системы являются мощный аналитический аппарат в сочетании с уникальной системой дешифрирования МДЗ и возможность совместного использования векторной и растровой моделей данных.

Одним из лидеров на мировом рынке в области программного обеспечения для обработки МДЗ является канадская компания PCI (EASI/PACE). В состав полнофункционального пакета *EASI/PACE* входят модули, обеспечивающие геометрическую коррекцию, поддержку более 20 картографических проекций, атмосферную коррекцию, обработку стереопар, анализ рельефа. Обработка изображений включает сшивку раstra, наложение, фильтрации, выделение границ, создание теней и пр. Модуль-пакет многоспектрального анализа включает распознавание объектов по уникальным интенсивностям спектра изображений. Разработанный специально для геологов и геофизиков модуль *GeoAnalyst* позволяет интегрировать дистанционные и геолого-геофизические данные.

ENVI (Research Systems Inc, США) — продукт малоизвестный на российском рынке. *ENVI* является развитой системой обработки МДЗ, которая работает с цифровыми материалами космо- и аэро-сьемок, с геологическими и геофизическими данными. Поддерживает принятые в России картографические проекции и координатные системы.

PHOTOMOD (фирма ЗАО «Ракурс», Россия) предназначен главным образом для фотограмметрии и обеспечения работы в стереорежиме. Работает на персональных компьютерах в операционных средах Windows-98, NT. Программа может обрабатывать космические снимки Ikonos и Aster.

Система *Geoimage*, разработанная французской компанией GEOIMAGE, предназначена для обработки изображений, используемых в картографии (создание дистанционных основ и тематических карт на их основе). Система обеспечивает радиометрическую и геометрическую коррекции снимков, создание бесшовных мозаик, поддерживает большое количество проекций и геодезических систем, обладает мощными средствами для тематической обработки данных дистанционного зондирования и создания цифровых моделей рельефа.

Программа *LESSA* («Ланэко», Россия) работает на любых PC. Назначение — выделение линейных элементов. Последняя версия работает не только с полутоновым, но и с бинарным изображением и цифровой моделью рельефа.

ИТИЦ «СканЭкс» создана серия программ для обработки различных дистанционных данных: для геометрических преобразований космических снимков, для обработки снимков Aster и IRS, для тематической обработки растровых изображений на основе алгоритмов нейронных сетей (SkanEX-Ne-RIS).

3.3. ДЕШИФРИРОВАНИЕ МАТЕРИАЛОВ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ

Под дешифрированием снимка понимают обнаружение, распознавание и истолкование (интерпретацию) объекта или явления. При геологическом дешифрировании выявляется и устанавливается геологическая природа объектов, не только выходящих на земную поверхность и нашедших прямое отражение на снимках, но и скрытых растительным покровом, рыхлыми отложениями, плитным чехлом и проявленных на снимках опосредованно через различные элементы ландшафта. Дешифрирование МДЗ всегда является тематическим, целевым, направленным на выявление интересующих эксперта объектов (рис. 3.19, 3.20).



Рис. 3.19. Космический снимок. Эфиопия (по П. Кронбергу)



Рис. 3.20. Фрагменты трех тематических карт площади снимка на рис. 3.19 (по П. Кронбергу):

a — дренажная сеть; *б* — тектонические структуры; *в* — литофациальные комплексы (диагональные штрихи — кристаллические серии докембрийского фундамента, крестики — интрузия, волнистые линии — основные интрузивные породы (?), крупные точки — юрские осадки, галочки — третичные и четвертичные вулканы, мелкие точки — четвертичные образования)

Виды дешифрирования. При геологическом картировании используют МДЗ как на твердых копиях, так и в цифровом виде с применением компьютерного программного обеспечения. В связи с этим различают визуальное, автоматизированное и автоматическое дешифрирование.

При *визуальном дешифрировании* обнаружение и распознавание объектов первоначально проводили по одиночным аэрофотоснимкам или стереомоделям, используя стереоскопы. В настоящее время визуальное дешифрирование ведется преимущественно с применением компьютерных технологий на экране монитора.

Процесс компьютерной обработки МДЗ, представленных в цифровом виде, включающий ввод изображений в компьютер (цифрование аналоговых и/или импорт цифровых изображений), тематическое дешифрирование и интерпретацию результатов, называется *автоматизированным дешифрированием*. Формировать базу данных, обрабатывать МДЗ и цифровой рельеф, проводить дешифрирование позволяют геоинформационные системы. Базы данных включают аэрокосмические данные, цифровой рельеф, геологические, геофизические, геоморфологические, структурные и другие данные, приведенные к единой топографической проекции, и пр. В процессе экспертного тематического дешифрирования выбирается определенная последовательность операций, направленная на повышение информативности изображения. Визуальное дешифрирование в значительной степени зависит от зрительного восприятия, знакомства геолога с ландшафтом и геологическим строением территории и его модельных представлений. Этим объясняются различающиеся результаты дешифрирования, полученные разными экспертами.

Автоматическое дешифрирование — методы формализованного компьютерного анализа изображений. Один из таких методов, применяемый геологами, — классификация, т. е. автоматическое выделение объектов или классов объектов по их яркостным и/или геометрическим свойствам и их последующая обработка и интерпретация. Разные объекты имеют разные спектральные характеристики. Дешифрирующая (распознающая) система производит серию измерений образа, подлежащего классификации, и сравнивает их с набором эталонных измерений. Используются не только спектральные, но и более сложные пространственные и временные

измерения. В автоматическом режиме проводится также выделение линеаментов.

ДЕШИФРОВОЧНЫЕ ПРИЗНАКИ

При работе с МДЗ пользуются прямыми и косвенными признаками геологических объектов. Предложены различные классификации дешифровочных признаков, в большинстве из которых выделяются две группы: прямые и косвенные, или общие и специальные.

Прямые признаки, из которых складывается зрительный образ объекта, — цвет (оптические характеристики), размер и форма (геометрические характеристики), т. е. собственные свойства объектов съемки, непосредственно изобразившиеся на снимках. К прямым признакам относятся также структура изображения, которая связана с пространственной сменой и взаимным расположением участков снимка, различающихся по оптическим характеристикам, и текстура изображения (например, полосчатая, однородная, пятнистая и пр.). При геологическом дешифрировании прямыми признаками можно пользоваться в геологически открытых районах, где коренные породы выведены на дневную поверхность. Спектрометрические характеристики и рисунок изображения, обусловленные самими породами, позволяют выявлять генетические разности горных пород и условия их залегания, разрывные нарушения и пр.

Косвенные признаки характеризуют объект дешифрирования опосредованно, через какой-либо другой природный компонент. Их делят на две группы. К первой группе относятся природные взаимосвязи между компонентами ландшафтов, например связь растительности с рельефом, рельефа с гидрографией, почв и грунтов с растительностью и т. п. В соответствии с этим косвенные признаки делятся на геоботанические, геоморфологические и др. В целом все эти признаки называются косвенными *ландшафтными*. Ко второй группе отнесены антропогенные объекты, а также связь между ними и природными объектами и явлениями. Такие признаки называются косвенными *социально-географическими*. Индикаторами геологических объектов обычно выступают косвенные признаки первой группы. Важнейшим индикатором геологических объектов является рельеф. Различные формы рельефа тесно связаны с рельефообразующими процессами и, следовательно, находятся во взаимосвязи со

всеми природными объектами и явлениями. Важную роль играют элементы гидрографии: реки, озера, водохранилища, болота. Тесная связь структуры и густоты гидрографической сети с геологией и рельефом позволяет использовать, например, рисунок речной сети как основной ландшафтный признак при геологическом и геоморфологическом анализе.

Элементы ландшафта могут проявлять геологические объекты, которые непосредственно на МДЗ не наблюдаются. Например, косвенным признаком локального поднятия может быть участок повышенного эрозионного расчленения, центробежный и огибающий рисунок речной сети. Особенно большое значение ландшафтные признаки дешифрирования имеют в закрытых, заболоченных районах в зонах тундры, лесотундры, тайги. Ландшафтные признаки в основном локальны. Но среди всего их множества можно выделить типичные, многократно повторяющиеся сочетания — рисунки изображения.

Выделяют еще *контекстуальные (топологические) признаки*, характеризующие свойства объектов земной поверхности, выявляющиеся для конкретного объекта при анализе признаков его окружения.

Дешифровочные признаки могут быть более или менее устойчивыми или неустойчивыми. Одни и те же признаки в разных природных условиях могут характеризовать различные предметы и разные их свойства. Более достоверное распознавание геологических объектов дает комплекс признаков. Хотя встречаются признаки специфические (неповторимые) и широко распространенные (повторяющиеся), абсолютных признаков, используя которые можно со стопроцентной достоверностью распознать некий объект всегда и везде, не существует.

МЕТОДЫ ДЕШИФИРОВАНИЯ

Различают прямой, контрастно-аналоговый и ландшафтно-индикационный методы, возможности которых зависят от геологического строения районов.

Прямой метод дешифрирования применяют только в геологически открытых районах, где коренные горные породы выведены на поверхность. Тоновые различия, а также особенности структуры и рисунки изображения на снимках этих районов обусловлены

геологическими телами, их окраской, вещественным составом, залеганием. Поэтому здесь возможны непосредственное отождествление выделенных на снимках объектов с геологическими телами и прямое сопоставление геолого-геофизических материалов с данными дешифрирования.

Прямой метод дешифрирования позволяет устанавливать поля развития горных пород различного состава и генезиса, границы стратиграфических подразделений осадочных и вулканогенных пород, характер их залегания, тектонические нарушения. Например, слоистые толщи обычно образуют на снимках полосчатый рисунок, по которому можно судить о форме залегания отложений, переслаивании пород различного состава; по их выраженности в рельефе — об относительной устойчивости к процессам денудации (рис. 3.21, 3.22). По смещению слоев, фотомаркирующих горизонтов, резкой смене тона и рисунка изображения, вызванных сменой геоморфологического и геологического строения, дешифрируются разрывные нарушения.

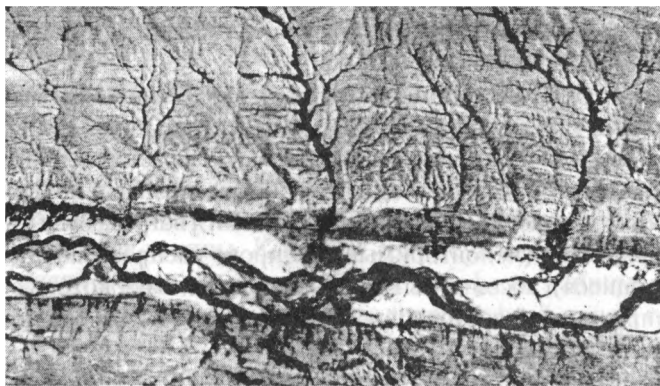


Рис. 3.21. Переслаивание пород разного состава обусловило полосчатый рисунок изображения на АФС. Казахстан

Прямой метод дешифрирования целесообразнее применять при работе с аэроснимками и космическими снимками высокого разрешения. При этом выявляется традиционная информация о геологическом строении района: литолого-стратиграфические комплексы пород различного возраста, внутри этих комплексов

нередко устанавливаются фотомаркирующие горизонты, складчато-разрывные деформации. Особенно высок эффект применения дистанционных материалов в районах со сложным геологическим строением, где горные породы резко различаются по физико-механическим свойствам и устойчивости к процессам денудации. Опытным путем установлено, что в открытых районах в результате полевых работ подтверждается до 90-100 % выявленных при дешифрировании объектов.



Рис. 3.22. Геленджикская синклираль, сложенная известковым флишем мелового возраста. Черноморское побережье западного Кавказа. АФС.

Синклинальное строение складки дешифрируется по пластовым треугольникам, образованным слоями пород (полосчатый рисунок изображения) на пересечении их с водотоками и направленным навстречу друг другу, к ядру складки

Контрастно-аналоговый метод дешифрирования используют как в геологически открытых, так и в геологически закрытых районах при работе с аэрофотоматериалами и космическими снимками всех уровней генерализации. Метод основан на связях внешних компонентов ландшафта с геологическим строением и сравнении

выделенных особенностей изображения с «фотопортретами» эталонных структур геологически однотипных площадей. Поэтому при дешифрировании геологических объектов необходимы знания о том, как они выглядят на снимках. Эти знания хранятся либо в памяти геолога и опираются на предыдущий опыт, либо в банках данных (например, каталогах аэро- и космических снимков). Обычно геологические структуры одного генезиса и истории развития имеют сходные изображения на МДЗ, и это позволяет дешифрировать по аналогии родственные геологические образования. Такое дешифрирование наиболее эффективно в геологически открытых районах, где спектральные (яркостные) характеристики геологических объектов и форма их залегания непосредственно видны на снимках и обуславливают тон и рисунок изображения. Однако при дешифрировании необходимо учитывать явление конвергенции, когда одинаковые геологические образования изображаются по-разному, а разные по генезису — сходно.

Ландшафтно-индикационный метод дешифрирования применяют в геологически закрытых районах при работе с аэрофотоснимками, а также космическими снимками среднего и высокого разрешения. Ландшафт — это однородная по происхождению и развитию территория, обладающая единым геолого-тектоническим строением, однотипным рельефом, общими характеристиками подземных и поверхностных вод, почв, общим климатом, растительными и животными сообществами. Индикатор — это наблюдаемый на снимке признак, который позволяет установить труднонаблюдаемый или скрытый геологический объект. На МДЗ получает отражение прежде всего ландшафт, а его особенности в той или иной степени обусловлены геологическим строением.

В основе ландшафтно-индикационного метода дешифрирования заложены анализ корреляционных связей выявленных на снимках аномалий с компонентами ландшафта и дешифрирование геологических объектов посредством их индикаторов, или косвенных дешифровочных признаков. Индикационные связи — это связи явных, физиономичных компонентов ландшафта со скрытыми геологическими структурами (рис. 3.23). В большинстве случаев геоиндикационные связи имеют сложный характер. Не существует универсальных, прямых ландшафтных индикаторов геологических образований.

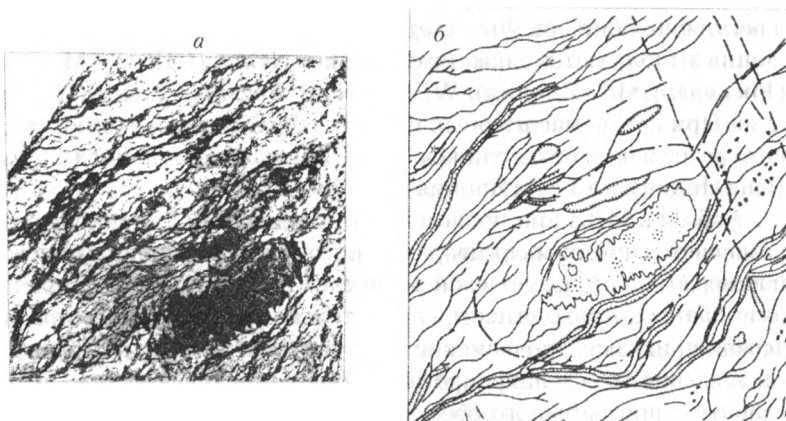


Рис. 3.23. Аэрофотоснимок (а) и схема дешифрирования (б) геоморфологической аномалии. Амударьинская синеклиза (по И. О. Смирновой, А. А. Русановой, К. Л. Липийинен).

Геоморфологическая аномалия, контуры которой показаны на схеме, дешифрируется по наличию песчаных останцов среди плоской равнины

МЕТОДИКА РАБОТЫ С МАТЕРИАЛАМИ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ПРИ ГЕОЛОГИЧЕСКОМ КАРТИРОВАНИИ

При геологической съемке любого масштаба использование МДЗ обязательно и регламентируется инструкциями. При геолого-съемочных работах рекомендуется использовать МДЗ как основного масштабного уровня, который соответствует масштабу составляемых карт, так и более обзорного, а на часть территории с наиболее сложным геологическим строением — более высокого разрешения. Эти три уровня генерализации: обзорный, рабочий (в котором проводится исследование) и детальный должны изменяться в 2,5–4 раза. В России базовыми при создании геологических карт нового поколения масштаба 1 : 200 000 являются материалы съемочной системы МК-4 в спектральных диапазонах 0,52–0,57; 0,64–0,69; 0,81–0,9 мкм; как дополнительные используются материалы съемочных систем КАТЭ-200 и/или КФА-1000. При мелкомасштабных геологических работах из обзорных снимков предпочтительными являются снимки Modis, имеющиеся в свободном доступе в Интернете как в виде исходных данных, так и в виде JPEG-файлов

в регулярно обновляемой галерее снимков. Съемки низкого разрешения выполняются также со спутников NOAA (США), «Метеор» (Россия), GMS (Япония), WFI (Китай—Бразилия), IRS (Индия) и др. При среднемасштабных работах используются съемки среднего разрешения со спутников SPOT (Франция), Landsat (США), IRS (Индия), ASTER (Япония).

Работа с МДЗ при проведении геологической съемки условно разделяется на этапы: предварительного дешифрирования, полевой и камеральный послеполевой. На предварительном этапе создается база данных, проводятся предварительная обработка, географическая привязка аэрокосмоснимков, их тематическая обработка и составление схем дешифрирования. Благодаря прогрессирующему развитию программного обеспечения широко используется автоматизированное и автоматическое дешифрирование. В процессе дешифрирования выбираются наиболее информативные каналы съемки и определяются способы тематических обработок, направленных на повышение информативности изображения. Первыми дешифрируются мелкомасштабные изображения с целью выявления крупных тектонических структур и определения позиции исследуемой территории в региональном тектоническом плане, затем снимки рабочего и более детальных масштабов. Могут создаваться специализированные карты и схемы — структурно-геоморфологические, линеаментов, структурных линий, кольцевых структур и др. При визуальном дешифрировании неизбежно возникают ошибки субъективного характера, зависящие от опыта и модельных представлений геолога. Их минимизируют с помощью самоконтроля, который обычно сводится к неоднократному дешифрированию снимка одним исполнителем в разное время, а также дешифрирования МДЗ несколькими специалистами. Создаются дистанционные основы геологических карт (подробнее в гл. 9).

В полевой период проверяются, уточняются и корректируются результаты предварительного дешифрирования, выявляются устойчивые дешифровочные признаки геологических объектов разного типа и та модель геологического строения территории, которая была получена на первом этапе. Заверка выделенных площадных и линейных объектов осуществляется при полевых работах на ключевых участках, в число которых включаются эталонные рудные объекты. Наземными работами выявляются и прослеживаются геологиче-

ские границы разновозрастных образований. На МДЗ геологический возраст пород не устанавливается, можно определить лишь относительный (древнее — моложе), а дешифрируются границы литологических и петрографических разностей пород, отличающиеся тоновыми и структурными характеристиками, которые позволяют прослеживать слои по простираению, определять условия залегания пород и пр. МДЗ не заменяют, а помогают в проведении наземных работ, дополняя, уточняя и конкретизируя геологическое строение района, а также предоставляют возможность изучать в комплексе с другими данными, прежде всего геофизическими, глубинное строение литосферы. Специальными полевыми исследованиями являются аэровизуальные и аэродесантные наблюдения. Их задачей, помимо прослеживания крупных геологических объектов и уточнения объектов наземных работ, является выяснение закономерностей изменения дешифровочных признаков.

На камеральном, заключительном этапе работы проводится интерпретация результатов дешифрирования. В настоящее время интерпретация, как и обработка материалов дистанционного зондирования, проводится на базе ГИС, которые позволяют вести комплексный интерактивный анализ информации — послойное сопоставление различных материалов. Результаты дешифрирования сопоставляют с геологическими, тектоническими, структурными и другими материалами. Особое внимание обращается на комплексный анализ результатов дешифрирования и геофизических данных. При дешифрировании МДЗ выявляются объекты, которые при традиционном геологическом картировании не устанавливаются (например, скрытые структуры фундамента, криптобатолиты и т. п.), интерпретация которых возможна с помощью геофизических методов. Полного соответствия выделенных при дешифрировании объектов с геологическими данными не бывает.

Интерпретация МДЗ, получаемых в тепловом диапазоне электромагнитных волн, должна производиться с учетом теплофизических свойств объектов, погодных и сезонных условий съемки, суточной динамики температурного поля, а также особенностей ландшафта. Одной из причин возникновения тепловых аномалий является конвективный тепловой поток из недр Земли по зонам современной тектонической активизации. Такие зоны характерны

не только для районов современной вулканической и гидротермальной деятельности, но и для прочих регионов, в том числе сейсмически стабильных. Именно с такого рода аномалиями могут быть связаны месторождения полезных ископаемых.

Процесс интерпретации базируется на последовательной детализации. Он начинается с анализа МДЗ высоких уровней генерализации, низкого пространственного разрешения. На каждом последующем уровне генерализации увеличивается детальность геологической информации. Результирующая карта является итогом постепенного заполнения структурного каркаса — от глубинных структур до верхних горизонтов земной коры. Необходимо заметить, что работа с МДЗ продолжается в течение всего периода геолого-съемочных работ, а анализ и интерпретация результатов дешифрирования осуществляются не только в заключительную стадию. Для выработки корректной геологической модели в процессе интерпретации пересматриваются принятые на предшествующих этапах рабочие модели и гипотезы. Достоверность полученных результатов подтверждается данными независимых исследований. Завершением этапа интерпретации является создание результирующих документов, представляемых в электронном виде и на бумажных носителях.

Часть II

ГЕОЛОГИЧЕСКОЕ ДЕШИФРИРОВАНИЕ МАТЕРИАЛОВ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ

При геологических исследованиях использование материалов аэрокосмических съемок является обязательным. Они помогают изучать геологическое строение, приповерхностные и глубинные структуры земной коры, целенаправленно вести поиски месторождений полезных ископаемых, решать другие природоресурсные и природоохранные задачи. В настоящее время ни одно серьезное исследование, связанное с представлением результатов в виде карт геологического содержания, не обходится без применения МДЗ.

Глава 4

ДЕШИФРИРОВАНИЕ КОРЕННЫХ ГОРНЫХ ПОРОД

Возможности дешифрирования вещественного состава пород на МДЗ зависят от многих природных условий: геологических, ландшафтно-климатических, характера обнаженности, устойчивости пород к процессам денудации и пр. Наиболее пригодными в этих целях являются аэрофотоснимки масштабов 1 : 25 000-1 : 40 000 и космические снимки высокого пространственного разрешения. На космических снимках среднего и низкого разрешения выявляются вещественно-структурные комплексы горных пород.

Для дешифрирования вещественного состава коренных пород используются различные ландшафтные индикаторы. Индикационное значение отдельных компонентов ландшафта может меняться в зависимости от геологического строения региона и природных и технических условий дистанционного зондирования. Наиболее важными при дешифрировании состава пород являются геоморфологические индикаторы. На породах одного состава, имеющих одинаковые физико-механические свойства, в одинаковых геолого-географических условиях образуется сходный рельеф. Это обуславливает сходство рисунков их изображения на МДЗ. Так, плато, структурные террасы, куэсты могут образоваться лишь в устойчивых к выветриванию осадочных и изверженных породах. Рельеф типа бедленд характерен как для коренных, так и для рыхлых отложений. Большое значение для дешифрирования имеет анализ рисунка эрозионного расчленения, а также отдельных форм эрозионного рельефа: промоин, оврагов, балок и мелких речных долин.

Цвет (тон) изображения горных пород имеет относительное значение как дешифровочный признак и может быть использован при определении состава пород только для близкорасположенных объектов. Но в зависимости от природных и технических условий съемки интенсивность тона (цвета) одного и того же объекта даже на смежных снимках может быть разной и, наоборот, разнородные породы могут иметь одинаковый тон изображения.

4.1. ОСАДОЧНЫЕ ПОРОДЫ

Дешифрирование вещественного состава. Осадочные породы дешифрируются по характерному полосчатому рисунку изображения, который обусловлен слоистостью. Детальность опознавания осадочных пород обычно ограничивается лишь отнесением их к какой-либо группе, например карбонатные, терригенные (рис. 4.1). Наиболее уверенно они дешифрируются в геологически открытых районах низкогорий и денудационных равнин с литоморфными и структурно-денудационными формами рельефа. Но и в таких условиях состав пород по МДЗ можно определить не всегда; чаще опознаются контуры тел, вещественный состав которых устанавливается при наземных работах или при сопоставлении с геологическими картами.

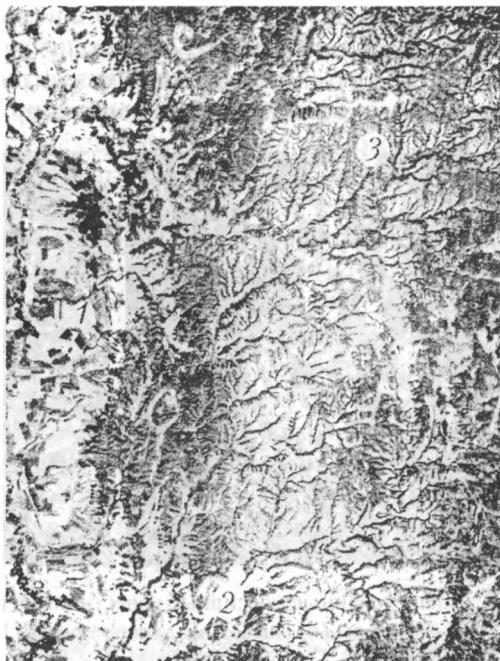


Рис. 4.1. Дешифрируемость космического снимка КАТЭ-200. Средний Урал (по Г. В. Гальперову, А. В. Перцову, В. С. Антипову и др.):

1 — терригенные и карбонатные породы, ангидриты Р; 2 — карбонатные и терригенные породы С₁; 3 — песчаники, алевролиты, сланцы и туфы Д₃—С₁

Известняки и доломиты на снимках выделяются обычно светлым тоном, если только они не имеют естественной темной окраски, не покрыты лишайниками или пленкой пустынного загара. В рельефе они обычно слагают узкие водоразделы и отвесные склоны, на бронирующих слоях развиты структурные поверхности слоевых плато, куэст и моноклиальных гребней. Типичны карстовые формы (рис. 4.2а). Речная сеть, выработанная в карбонатных толщах, часто подчинена трещиноватости. На склонах, сложенных переслаивающимися породами различного состава, эти отложения могут образовывать маркирующие горизонты, обусловленные структурными уступами и избирательно приуроченной к ним растительностью.

Гипсы и ангидриты при неглубоком залегании дешифрируются главным образом по светлой окраске, отсутствию растительности и интенсивному развитию на них карстовых форм (рис. 4.2б), которые образуют микрорельеф типа «шагреновой поверхности».

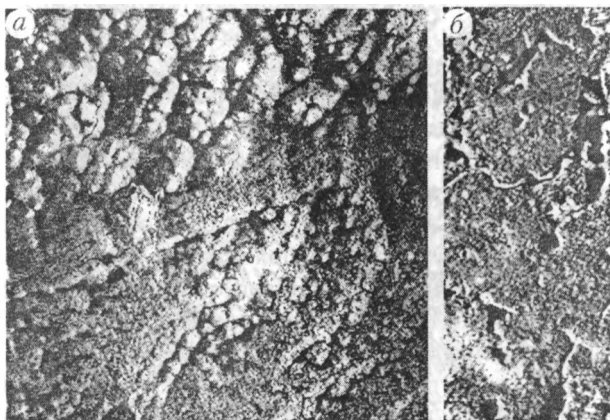


Рис. 4.2. Закарстованные массивные известняки (а) и гипс-ангидритовые породы (б) (по Г. В. Гальперову, А. В. Перцову, В. С. Антипову и др.)

Конгломераты, песчаники и алевролиты имеют близкие дешифровочные признаки. Прочные и массивные их разности при пологом и горизонтальном залегании бронируют рельеф, образуя структурные плато, куэсты, структурные террасы. В складчатых областях на них развиваются остроугольные вершины, узкие гребни и обрывистые склоны, а полосчатый рисунок может отсутствовать. На песчаниках, переслаивающихся с менее прочными породами, образуются карнизы, крутые уступы, гряды, а на МДЗ полосчатый рисунок.

Глины имеют темный тон во влажной климатической зоне, в пустынях и полупустынях — светлый, на солончах — пятнистый. Нередко на этих отложениях развит рельеф типа бедленд. Во влажном климате на склонах долин по глинам развиваются оползни, при заболачивании — влаголюбивая растительность.

Изменения фототона, рисунка изображения (например, от тонко- до грубо полосчатого), микроформ рельефа, характера рас-

тельности могут быть связаны с изменением состава и текстуры пород по простирацию. МДЗ позволяют проследивать изменения фаций на значительных площадях.

Дешифрирование залегания осадочных отложений. Определить залегание осадочных пород возможно, если они образуют слоистую толщу. Стратифицированные отложения отличаются характерным полосчатым рисунком изображения, который и позволяет определить форму залегания горных пород.

Горизонтальное и пологонаклонное (до 2-3°) залегание слоистых толщ дешифрируется только при расчлененном рельефе по рисунку изображения, подобному горизонталям на топографических картах (рис. 4.3; VIII на цветной вклейке). В районах с очень слабо расчлененным равнинным рельефом или рельефом денудационных платообразных возвышенностей обнажены только самый молодой слой или небольшая верхняя часть разреза. Поэтому на МДЗ видны однородное изображение или невыдержанный на всей площади полосчатый рисунок вдоль склонов эрозионных врезов. При наличии в разрезе крепких бронирующих слоев в рельефе образуются столовые горы.



Рис. 4.3. Горизонтальное залегание осадочных отложений. Восточная Сибирь. АФС. Переслаивание плотных (темных) и менее плотных (светлых) песчаников, к которым избирательно приурочена растительность, создает полосчатый рисунок изображения, похожий на горизонтали рельефа на топографических картах

В геологически открытых районах, где на земную поверхность выведены коренные породы, полосчатый рисунок на МДЗ обусловлен различиями вещественного состава, физических свойств и окраски (тона) слоев, участвующих в строении толщ. Ширина полос зависит от мощности слоя и крутизны склона. Различные противоденудационные свойства пород проявляются в неровном, часто ступенчатом строении склонов. В залесенных районах полосчатый рисунок может создаваться избирательной приуроченностью растительности к отдельным слоям или изменениями ее видового состава.

При *наклонном залегании* слоев их границы при пересечении с долинами и водоразделами изгибаются, образуя пластовые треугольники, дуги, пластовые барьеры. Вершины пластовых треугольников, расположенные в эрозионных врезках (русле реки, тальвеге оврага) и имеющие наименьшие абсолютные отметки по сравнению с его сторонами, указывают направление падения слоев. По конфигурации изгибов определяют углы наклона слоев, чем более вытянут пластовый треугольник (острый), тем больше падение слоев. При вертикальном залегании выходы слоев образуют линии, не связанные с рельефом. Дешифрируя наклонное залегание слоев, необходимо учитывать соотношение угла и направления наклона слоев и крутизну склонов. При углах падения слоев меньше наклона склона вершины пластовых треугольников, направленных в сторону падения, будут расположены на водоразделе. Работая с нетрансформированными АФС, необходимо учитывать значительные искажения на краях снимков, которые могут привести к ложным представлениям не только о величине наклона слоя, но и направлении его падения.

Наиболее уверенно наклонное залегание горных пород устанавливается в районах со структурно-денудационным и литоморфным рельефом (рис. 4.4, 4.5). При выровненном рельефе слоистость в наклонно залегающих толщах передается на МДЗ в виде линий, форма которых будет полностью зависеть от простиранья пород. В таких случаях направление падения определяется в соответствии с общим правилом — при нормальном наклонном залегании слои падают в сторону расположения более молодых отложений.

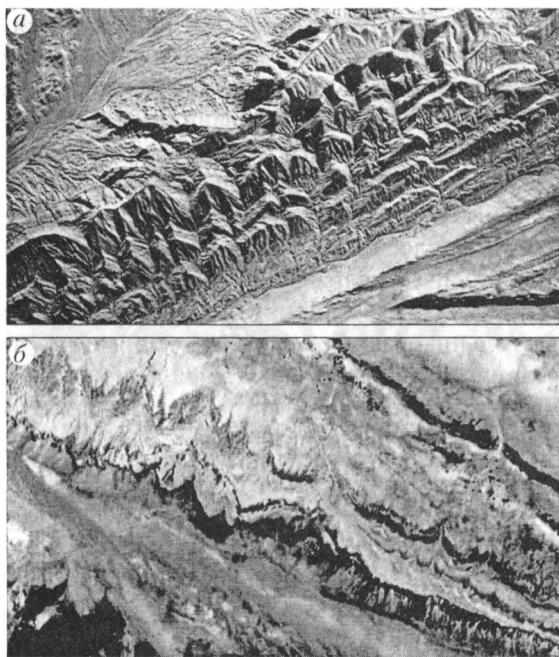


Рис. 4.4. Наклонное залегание осадочных отложений:

a — аэрофотоснимок. Ср. Азия; *б* — космический снимок Modis. Аравийский п-ов. Хорошо видны параллельное простираение полос-слоев и пластовые треугольники, характерные для наклонно залегающих отложений

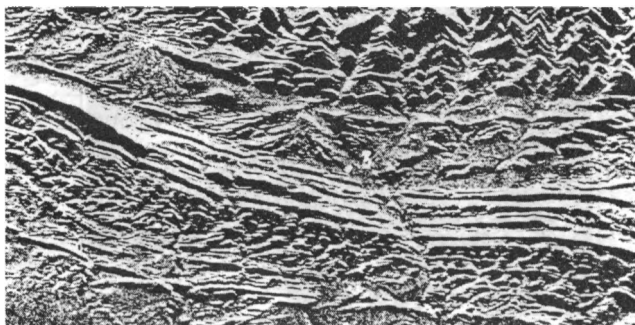


Рис. 4.5. Наклонное залегание терригенных отложений. Западная Туркмения. Радиолокационный снимок

Складчатое залегание горных пород дешифрируется по полочатому рисунку, концентрически расположенному вокруг ядра складки, замыканию складок, а также пластовым треугольникам на крыльях. Детальность дешифрирования складчатых структур зависит от степени обнаженности и разнообразия вещественного состава пород, участвующих в строении складки. В антиклиналях вершины «истинных» пластовых треугольников, которые расположены на пересечении слоев-полос с эрозионными врезами, направлены в разные стороны от ядра складки, в синклиналях — к ядру, навстречу друг другу (рис. 4.6). В опрокинутых складках вершины пластовых треугольников на обоих крыльях направлены в одну и ту же сторону, и для выявления таких складок необходимо привлечь другие дешифровочные признаки, установить положение оси складки, направление погружения шарнира и пр.

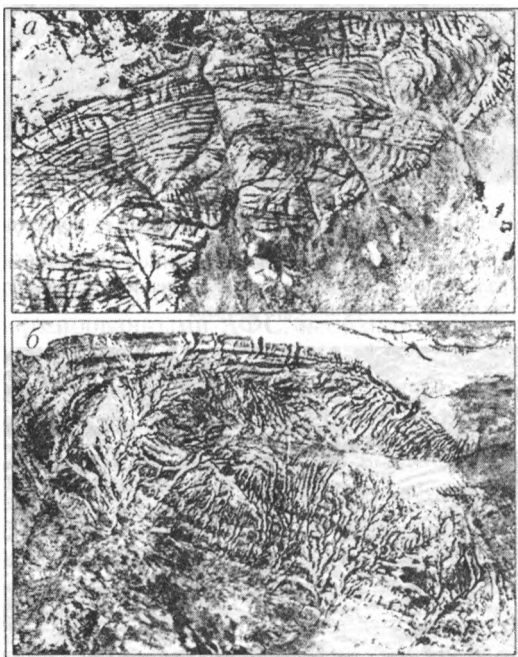


Рис. 4.6. Складчатое залегание стратифицированных отложений:

a — синклинальное; *б* — антиклинальное. АФС

На МДЗ нередко хорошо проявлены морфология складок или их элементы. Разная ширина одних и тех же маркирующих фотогоризонтов на крыльях характерна для асимметричных складок. Нередко такому анализу помогают структурно-денудационные формы рельефа, например куэсты, развитые на относительно пологом крыле, а моноклиальные гребни и гряды — на более крутом (рис. 4.7).



Рис. 4.7. Антиклинальная складка, проявленная структурно-денудационными формами рельефа. АФС. 1-4 — элементы складки:

1 — ядро; 2-3 — крылья; 4 — периклиналь; 5-6 — разрывные нарушения, выраженные в рельефе

Складки хорошо дешифрируются на снимках геологически открытых районов даже в условиях равнинного, слабо расчлененного рельефа (рис. 4.8, 4.9).



Рис. 4.8. Изоклиальная складчатость в каменноугольных породах.
Казахстан. АФС



Рис. 4.9. Складки в терригенных породах, C_1 Казахстан. АФС

На космических снимках складчатые деформации также дешифрируются по структурному рисунку (рис. 4.10).



Рис. 4.10. Антиклинальные и синклиналильные мезозойско-кайнозойские складки. Загрос. КС

Для осадочных пород характерны флексуры — коленообразные изгибы слоев. Наиболее уверенно они дешифрируются, когда приподнятое и опущенное крылья отличаются формами и/или микроформами рельефа, а соответственно и рисунками на МДЗ, а к смыкающему крылу флексуры приурочены уступы или понижения в рельефе (например, речная долина, разрабатывающая трещиноватость, развитую в смыкающем крыле). На космических снимках флексурно-трещинные зоны проявляются линейными аномалиями (линеаментами).

4.2. МАГМАТИЧЕСКИЕ ПОРОДЫ

Магматические (изверженные) породы образуются при застывании магмы на глубине (глубинные) либо при вулканических извержениях на земную поверхность (излившиеся). Промежуточное положение по условиям образования занимают гипабиссальные породы.

ИНТРУЗИВНЫЕ ПОРОДЫ

Интрузивные породы на аэроснимках и космических снимках с высоким пространственным разрешением опознаются по отсутствию слоистости и условиям залегания. Интрузивные породы, отличающиеся высокой крепостью, образуют положительные формы рельефа: резкие в областях с высокой неотектонической активностью, мягкие, сглаженные формы типа куполов, увалов или

почти плоские поверхности — в условиях небольших тектонических поднятий. В геологически открытых районах можно различить кислые (светлые) и основные (темные) разности интрузивных образований.

Интрузивные породы кислого и среднего состава. Наиболее уверенно опознаются *гранитоиды*. На поверхности гранитных массивов обычно развита сеть тонких трещин (рис. 4.11), одни из которых параллельны контурам массива, пологие или горизонтальные, другие прямолинейны. В эндоконтактных зонах трещиноватость у верхних и боковых частей массивов обычно совпадает с внешними контактами массивов. Крутонаклонные трещины проникают в экзоконтактные зоны и, как правило, резко выражены. Прямолинейные трещины образуются в результате гравитационного всплывания, расширения и «разваливания» гранитоидных массивов. Пологие и горизонтальные первичные трещины изображаются на снимках темными изогнутыми полосками на обнаженных склонах. Контурные массивов, имеющие рвущие контакты, устанавливаются по срезу слоистости вмещающих толщ. Нередко видны апофизы во вмещающие толщи, позволяющие определить относительно более молодой возраст интрузивных образований и «горячий» контакт с породами рамы (рис. 4.12).

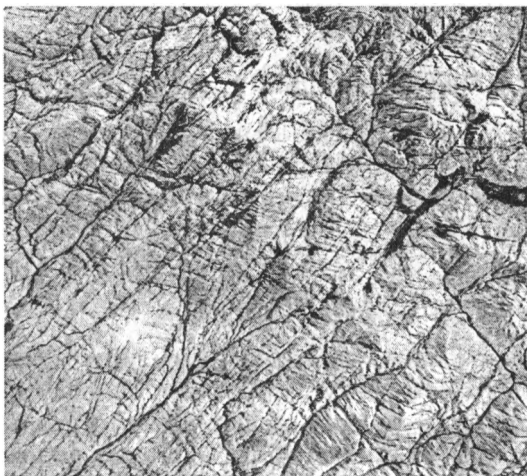


Рис. 4.11. Граниты. Центр. Казахстан. АФС

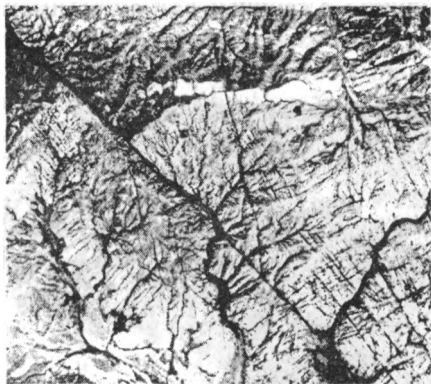


Рис. 4.12. Гранитоидный шток. Видны апофизы гранитов (светлые) в эффузивную толщу (темная). Граниты нарушены правым сдвигом.
Центр. Казахстан. АФС

По тону изображения и другим признакам можно обнаружить фазы внедрения гранитоидов (рис. 4.13). На МДЗ с высоким пространственным разрешением возможно дешифрировать фациальные изменения внутри интрузивных массивов.



Рис. 4.13. Сложный трехфазный массив гранитоидов. Казахстан.
КС (по Г. В. Гальперову, А. В. Перцову, В. С. Антипову и др.):

1 — гранодиориты, граниты, монцониты C_2 ; 2, 3 — аляскитовые и биотитовые граниты; 2 — C_3 , 3 — Р

Гранитоиды образуют крупные батолиты, имеющие большую вертикальную мощность, изометричные штоки, кольцевые и конические интрузии (рис. 4.14).

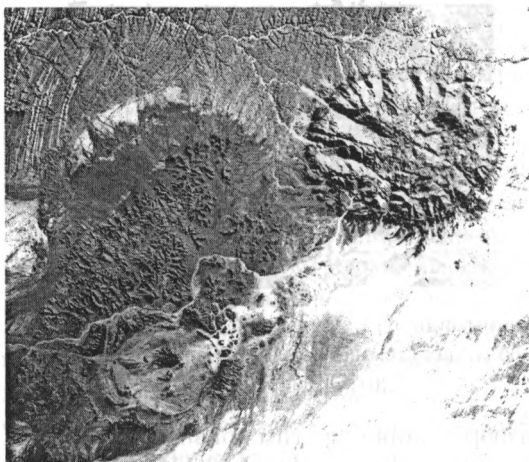


Рис. 4.14. Интрузивный купол Бранберг (рядом — невоскрытый интрузив). КС Landsat. Намибия

Нередко встречаются структуры, где интрузив совсем не вскрыт эрозией, но установлен геофизическими методами. Небольшие интрузивы обычно объединены в крупную кольцевую структуру, отражающую наличие на глубине единого магматического очага. Контрастность их на снимках зависит от глубины интрузии: чем ближе к поверхности, тем они более явно проявлены. Границы интрузивных массивов позволяют сделать выводы о форме их эродированной поверхности и подземном положении контактов. Извилистая граница, вписывающаяся в формы рельефа с заливами и останцами кровли, свидетельствует о пологом положении, а прямолинейность границ и отсутствие в их расположении связей с рельефом — о крутом положении или тектонической природе контактов. Выраженность в рельефе интрузивных пород различна. Над невоскрытыми интрузивными массивами, помимо изменения тона изображения, появляются повышенная плотность трещин, аномалии в рельефе, а при изостатическом всплывании крупных гранитоидных массивов — локальные поднятия.

Интрузивные породы основного и ультраосновного состава отличаются темным тоном, слагают обычно небольшие тела и уверенно выделяются на МДЗ только в тех случаях, когда они резко отличаются от вмещающих пород. Нередко они образуют пластовые интрузии — силлы. На снимках высокого разрешения районов распространения этих образований можно наблюдать широкие плоские возвышенности, сложенные крепкими основными породами, прорезанные глубокими каньонами с крупными блоковыми оползнями и рвами отседания на склонах.

Плутонические структуры, связанные с мантийным магматизмом (внедрением габбро-анортозитовых и щелочно-ультраосновных магм), отличаются крупными размерами (Бушвельдская в ЮАР, Хибинский и Ловозерские плутоны на Балтийском щите). Раннепротерозойский массив Бушвельд, например, образован рядом крупных кольцевых структур диаметром до 200 км. С внедрением щелочных подкоровых магм, карбонатитов, а также кимберлитов связаны, как правило, микроструктуры диаметром от 1 до 15-20 км. Кроме небольших штоков и диатрем, встречаются кольцевые и конические интрузии, например Кондер в Сибири диаметром ~10 км (рис. 4.15). Центральная часть его сложена ультраосновными интрузивными породами — дунитами, внешнее кольцо образовано резко очерченным концентрическим хребтом и сложено интенсивно деформированными осадочными породами.

Интрузивные дайки и жилы разного состава отличаются на МДЗ от вмещающих пород обычно более темной или светлой окраской (рис. 4.16); например, аплитовые и кварцевые жилы имеют более светлую, а диабазы — более темную окраску по сравнению с вмещающими породами. Значительно сложнее дешифрировать пегматитовые тела, которые мало отличаются по фотогеничности от вмещающих интрузивных образований. При достаточной мощности интрузивные дайки и жилы имеют повышенную устойчивость к процессам денудации и образуют в рельефе грядки, грядки, цепочки скальных останцов (рис. 4.17). Реже встречаются жилы, которые разрушаются быстрее вмещающих пород, тогда на них в рельефе развиваются линейные понижения, похожие на разрывные нарушения. Дайки могут группироваться вокруг массивов, образуя кольцевые и конические системы (рис. 4.18).

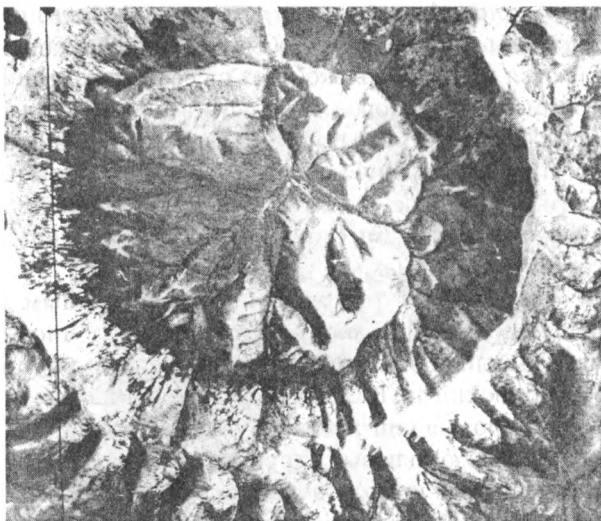


Рис. 4.15. Ультраосновная интрузия, на которой сформирован кратерообразный рельеф гольца Кондер. Джугджурская складчатая область. АФС

Интрузией прорваны полого залегающие отложения верхнего протерозоя, которые на контакте резко дислоцированы и метаморфизованы и вместе с эндоконтактовыми разностями образуют горное кольцо. Интрузив осложнен радиальными и кольцевыми разрывами



Рис. 4.16. Дайки габбро-амфиболитов (темные) среди гранитогнейсов. Кольский п-ов. КС Landsat



Рис. 4.17. Дайки гранит-порфиров (1). Казахстан. АФС



Рис. 4.18. Кольцевая дайка вокруг гранитоидного массива. Юго-Западная Африка. КС

ЭФФУЗИВНЫЕ ПОРОДЫ

Возможности дешифрирования эффузивных пород во многом определяются их возрастом и ландшафтно-климатическими осо-

бенностями регионов их распространения. Эффузивы современного и четвертичного вулканизма дешифровать значительно проще, чем древние эффузивы, в том числе входящие в состав вулканогенно-осадочных толщ. Наиболее уверенно среди последних идентифицируются массивные лавы и крепкие туфы, создающие структурно-денудационные формы рельефа. Состав эффузивных пород в каждом конкретном ландшафтном районе имеет много специфических черт. Тон изображения зависит от состава пород: темный — у основных и средних, светлый — у кислых эффузивов (рис. 4.19).



Рис. 4.19. Базальты (темные) мелового возраста, несогласно перекрывающие древние толщи. Намибия. КС

Эффузивы образуют *покровы* — плоские тела, сложенные обычно базальтами и долеритами, имеющие широкое площадное распространение и относительно малую мощность, и *потоки*, которые могут быть сложены как лавами, так и пирокластическим материалом. Поверхности быстро застывающих жидких дегазированных лав волнистые, морщинистые, разбитые многочисленными трещинами. Эффузивы кислого и среднего состава образуют обычно непротяженные, но значительной мощности потоки, похожие на дамбы, с трещиноватой, бугристой поверхностью. При трещинных извержениях образуются дайки и системы параллельных даек, сложенных лавами.

Мощные однородные толщи древних эффузивов, залегающие на обширных пространствах, даже при хорошей обнаженности дешифрируются с трудом. Для них характерен выровненный или волнистый рельеф с крупными плавными формами и беспорядочным микрорельефом. Тон их однороден, без признаков или со слабыми признаками слоистости. На древних эффузивах нередко развита дендритовидная в плане эрозионная сеть с глубоко врезаемыми долинами рек, разрабатывающими системы многочисленных трещин. Во вскрытых эрозией древних вулканогенных толщах выделяются породы субвулканической фации, наиболее распространенными формами залегания которых являются дайки, силлы, штоки.

Вулканогенные образования, переслаивающиеся с осадочными породами, создают полосчатый рисунок, характерный для слоистых толщ (рис. 4.20). При *пологом и горизонтальном* залегании эффузивов среди менее крепких осадочных пород на горных склонах появляются скалистые уступы и карнизы, а на водораздельных пространствах — структурные поверхности (рис. 4.21). При *наклонном* залегании прочные эффузивы образуют бронирующий слой куэст (рис. 4.22).

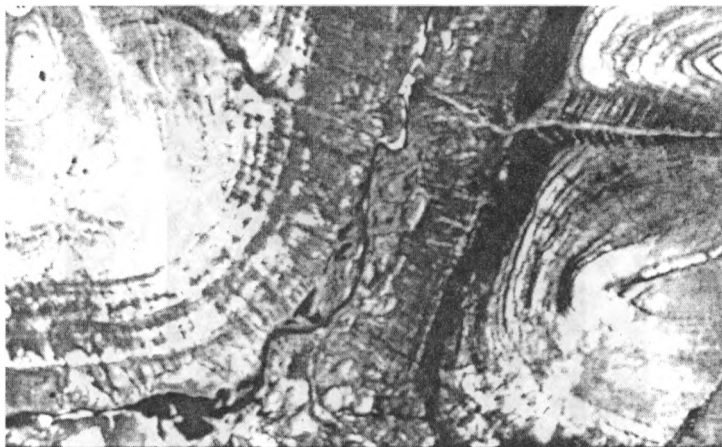


Рис. 4.20. Вулканогенно-осадочная толща. АФС. Восточная Сибирь.
На крутых склонах долины крепкие эффузивы образуют скальные уступы и карнизы



Рис. 4.21. Лавовая свита нижнего триаса. Сибирская платформа. АФС. Выходы крепких эффузивов образуют структурную поверхность (1) и структурные ступени (2) на склонах водоразделов. Их крутые и обрывистые уступы (3) выражены светлыми и темными полосами в зависимости от освещения во время съемки



Рис. 4.22. Эффузивы триасового возраста, нарушенные разрывами, слагают бронирующий слой куэст. Сибирская платформа. АФС

Наиболее благоприятны для дешифрирования регионы четвертичного и современного вулканизма (рис. 4.23-4.25). На МДЗ видны лавовые потоки и поля, расположенные на склонах и у подножий

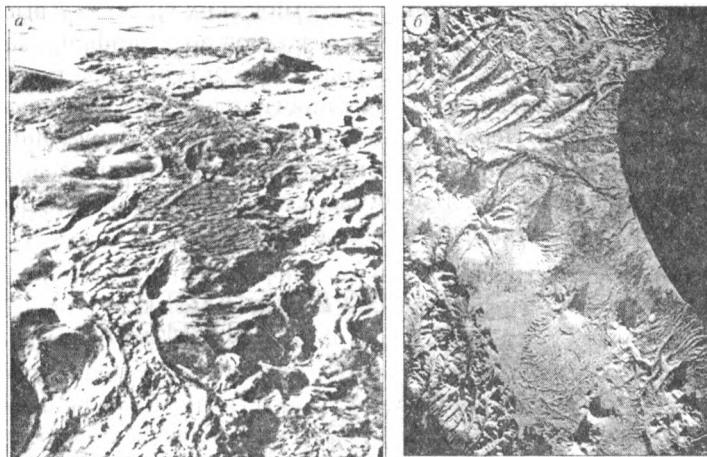


Рис. 4.23. Вулканы: *а* — перспективный аэрофотоснимок, Армения; *б* — космический снимок, Камчатка

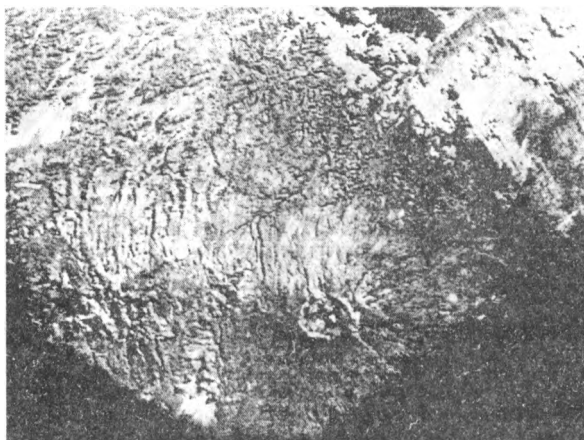


Рис. 4.24. Вулкан Эми-Кусси на вулканическом нагорье Тибести. Северная Африка. КС

вулканов. Они имеют густую сеть трещин и следы течения лавовых потоков в виде бугров сжатия, морщин, струйчатости и газовых воронок, видны отдельные вулканы с характерными барранкосами на склонах и пр. На аэроснимках и космических снимках с высоким пространственным разрешением возможно дешифрировать строение вулканогенных комплексов, их структурно-текстурные особенности и фациальные разновидности, элементы первичных текстур течения и др. Нередко устанавливаются связь современных вулканов с определенными тектоническими зонами, последовательность и стадийность излияния лав, взаимоотношения покровов с формами древнего и современного рельефа.

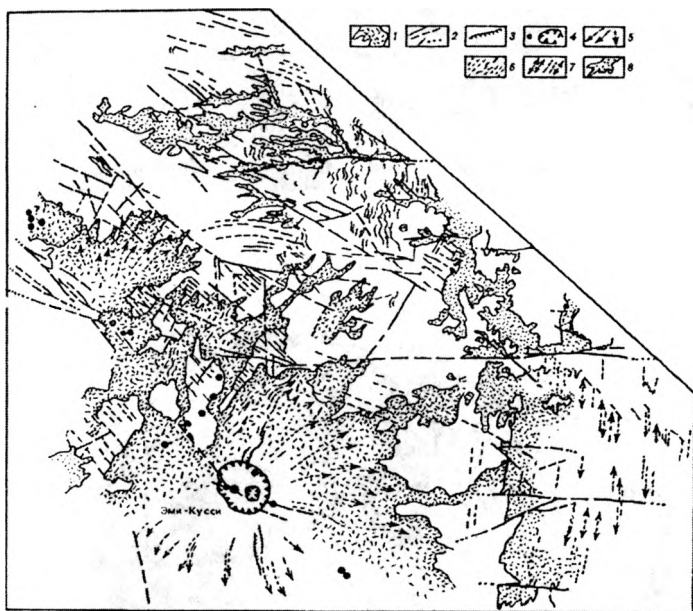


Рис. 4.25. Схема геологического строения района вулкана Эми-Кусси (по Н. А. Гусеву):

1 — четвертичные, частично плейстоценовые вулканические породы, преимущественно базальты; 2 — разрывные нарушения различных порядков, дешифрирующиеся уверенно, менее уверенно и предполагаемые продолжения разрывных нарушений; 3 — тектонические и эрозивно-тектонические уступы; 4 — вулканы и кальдеры; 5 — направления течения лав и сноса материала при денудации; 6 — структурные линии; 7 — ориентировка современных эоловых форм; 8 — современные эоловые пески

4.3. МЕТАМОРФИЧЕСКИЕ ПОРОДЫ

Дешифровочные признаки метаморфических пород разнообразны и для большинства из них обычно ограничиваются пределами отдельных регионов. Общими дешифровочными признаками пород, образовавшихся при региональном метаморфизме, являются сложная дислоцированность, обилие линий различных размеров и направлений, отвечающих слоистости, сланцеватости и разрывным нарушениям, а также нечеткое выражение или полное отсутствие пластовых фигур, что позволяет отличать их от осадочных пород. Наиболее устойчивыми дешифровочными признаками обладают кристаллические *сланцы* и *гнейсы* (рис. 4.26). Для них характерен тонкополосчатый рисунок, причем направление полосчатости обычно соответствует первичной слоистости и простиранию пород. Однако нередко видимая на снимке полосчатость представляет собой наложенную сланцеватость или кливаж, ориентированные иначе, чем первичная слоистость, особенно в замках складок. Лучше других метаморфических пород дешифрируются *кварциты*. Они отличаются светлым тоном и приуроченностью к ним положительных форм рельефа, имеющих форму гряд или перегибов в склонах на границах их с другими породами. Направление гряд соответствует простиранию пород, подчеркивая их залегание. По своим дешифровочным свойствам очень близки к кварцитам *мраморы*.

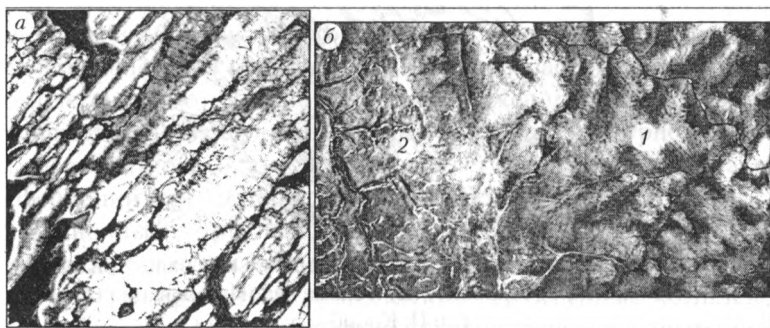


Рис. 4.26. Гнейсы: *а* — докембрийские. Канадский щит. АФС; *б* — гнейсы разного состава AR_2 (1), контактирующие с терригенными породами PR_2 (2). Анабарский щит. КФС (по Г. В. Гальперову, А. В. Перцову, В. С. Антипову и др.)

Для метаморфических толщ фундамента платформ характерна глубинная складчатость — складки течения. Метаморфические толщи обычно имеют сложноскладчатую структуру (рис. IX на цветной вклейке, 4.27), обусловленную наложением разновозрастной складчатости в результате неоднократного повторного смятия слоев в складки разной морфологии и простираения. Ранние структуры оказываются как бы включенными в более позднюю складчатую структуру. Метаморфические породы слагают гранитогнейсовые купола, обладающие значительными размерами (десятки и сотни километров), в ядрах которых залегают граниты, а по перифе-

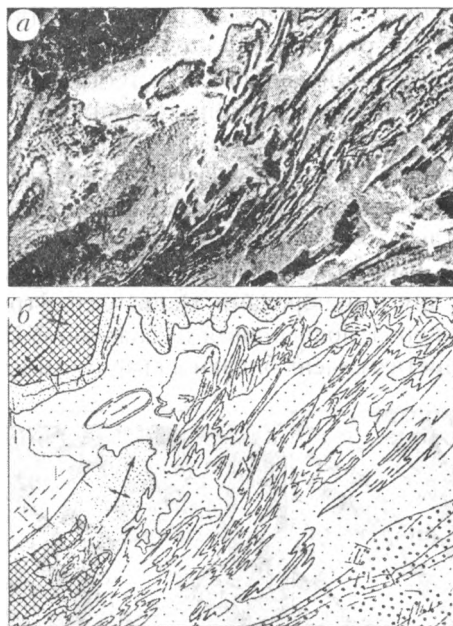


Рис. 4.27. Складки на космическом снимке юго-западной части Антиатласа (Марокко) (а) и схема дешифрирования (б)
(по П. Кронбергу)

В ядрах сводообразных поднятий обнажаются кристаллические породы докембрия. Молодые породы, предположительно метаморфические (докембрийские?), прослеживаются по опорным горизонтам, создающим волнистую штриховку. Палеозойский осадочный чехол (в средней части снимка) смят в широкие, а на юго-востоке — все более узкие антиклинали и синклинали, образующие зигзагообразный рисунок куэст

рии — метаморфические сланцы. В рельефе они образуют пологие поднятия.

4.4. ВЕЩЕСТВЕННО-СТРУКТУРНЫЕ КОМПЛЕКСЫ ГОРНЫХ ПОРОД

На космических снимках среднего и низкого пространственного разрешения выявляются не отдельные толщи и слои, а вещественно-структурные комплексы горных пород, образующие площадные объекты дешифрирования. Под вещественно-структурными комплексами пород понимают геологические тела, обладающие выдержанным вещественным составом, однотипным характером дислоцированности пород и обособляющиеся на снимках как самостоятельные площадные объекты. При космогеологическом картографировании они являются элементарными единицами площадного разделения полей горных пород. На этом принципе созданы космогеологические карты отдельных регионов и космогеологическая карта в рамках бывшего Советского Союза масштаба 1 : 2 500 000.

Среди коренных пород, которые дешифрируются на МДЗ, различаются стратифицированные образования (осадочные, осадочно-вулканогенные, вулканогенные и метаморфические) и нестратифицированные (магматические интрузивные и субвулканические тела). Стратифицированные образования отличаются цолосчатым рисунком изображения, который в той или иной степени отражает условия залегания горных пород. Разновозрастные структурные комплексы имеют обычно разное изображение на космоснимках, отличаются индивидуальными яркостными и структурно-текстурными характеристиками. Это позволяет устанавливать характер деформаций горных пород для каждого структурного этажа.

Основными признаками нестратифицированных образований являются форма тел и отсутствие слоистости. Между собой нестратифицированные вещественно-структурные комплексы различаются на МДЗ тоном изображения, обусловленным составом пород, и соотношениями с вмещающими и перекрывающими их стратифицированными образованиями. Для интрузивных тел выделяются участки преимущественного развития тех или иных разновидностей пород в дешифрируемом контуре.

4.5. ДЕШИФРИРОВАНИЕ ПОГРЕБЕННЫХ ГЕОЛОГИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ

Материалы дистанционного зондирования дают возможность выявлять геологические объекты, не только выведенные на земную поверхность и потому доступные для изучения непосредственно при полевых исследованиях, но скрытые и погребенные. Дешифрирование таких объектов возможно в тех случаях, когда они находят отражение в современном рельефе. Кроме того, эти возможности зависят от строения погребенного фундамента, мощности и строения осадочного чехла, а также от ландшафтно-климатической зоны, типа съемочной аппаратуры и пр.

Структурно-вещественные комплексы погребенного основания могут проявляться через относительно маломощный (первые сотни метров) осадочный чехол (рис. 4.28). Это «просвечивание» является результатом отражения в ландшафте строения палеорельефа, перекрытого осадочными отложениями, и связано с механическим уплотнением и последующим изменением осадков в процессе их диагенеза в сочетании с гидрогеологическими и геохимическими факторами. Преобладание в разрезе перекрывающих отложений песчаных и алевритовых разностей, которые имеют хорошие фильтрационные свойства, способствует образованию просадок над отрицательными формами рельефа фундамента. С увеличением мощности осадочного чехла дешифрируемость погребенного фундамента уменьшается.

Крупные тела дешифрируются легче; мелкие (дайки, жилы, линзы, отдельные пласты и т. п.) выявляются лишь в единичных случаях. Слоистые толщи распознаются по системе структурных линий, характер изображения которых на МДЗ существенно зависит от многих факторов (мощности слоев, их устойчивости к выветриванию, текстурных особенностей, условий залегания, тектонической трещиноватости и др.). При дешифрировании слоистых толщ фундамента необходимо учитывать, что полосчатый рисунок может быть обусловлен веерами блуждания отмерших рек, следами сельскохозяйственной обработки территории и другими причинами, не связанными со строением погребенного фундамента.

Погребенные структуры, т. е. отмершие, эродированные и перекрытые относительно молодым комплексом отложений, дешифрируются значительно труднее, чем *скрытые*. К последним относятся

активные структуры, но не выведенные на современный денудационный срез, не дошедшие до дневной поверхности. На МДЗ опознаются скрытые структурные формы фундамента и осадочного чехла, созданные или активизированные (реанимированные) новейшими (неоген-четвертичными) тектоническими процессами. Дешифри-

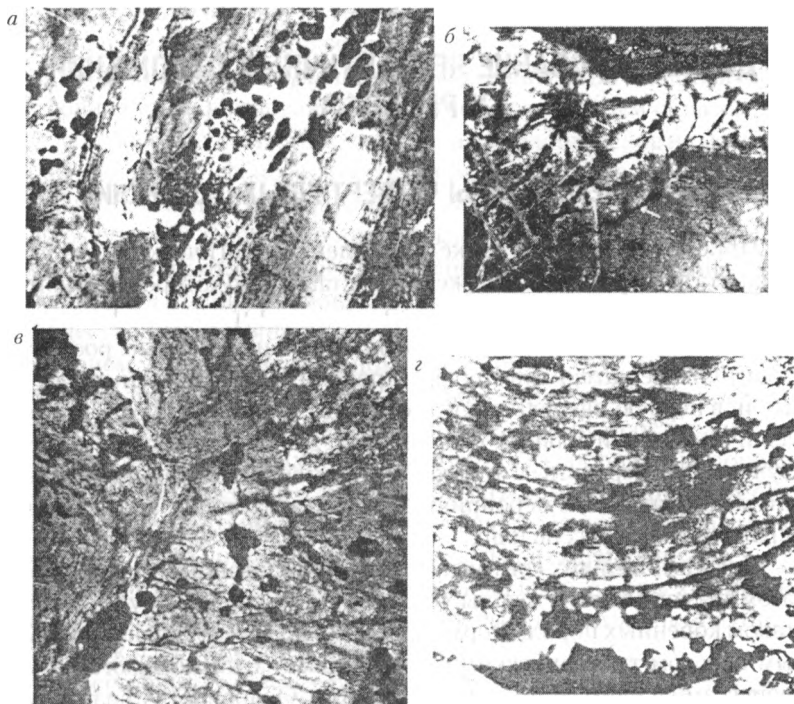


Рис. 4.28. Погребенные геологические объекты. Тургайский прогиб. АФС (по Г. В. Гальперову, А. В. Перцову, В. С. Антипову и др.):

а — загипсованные известняки (пятнистый рисунок изображения) среди осадочно-вулканических пород (тонкополосчатый рисунок), мощность рыхлого покрова 20 м; **б** — вулканическая постройка (показана стрелками), мощность рыхлого покрова 40-50 м; **в** — фрагмент кольцевой структуры вулканно-тектонической депрессии в вулканогенно-обломочных отложениях, мощность рыхлого покрова 50-60 м; **г** — диориты (решетчато-пятнистый рисунок изображения), контактирующие с вулканогенно-обломочными породами (тонкополосчато-пятнистый рисунок), мощность рыхлого покрова 20-50 м

рование их проводится по комплексу ландшафтно-индикационных признаков, среди которых основными являются формы рельефа и характер проявления экзогенных процессов (подробнее в 5.2).

Глава 5

ДЕШИФРИРОВАНИЕ ЧЕТВЕРТИЧНЫХ ОТЛОЖЕНИЙ И РЕЛЬЕФА

5.1. ГЕНЕТИЧЕСКИЕ ТИПЫ ЧЕТВЕРТИЧНЫХ ОТЛОЖЕНИЙ

При геологической съемке в комплект геологических карт входит карта четвертичных отложений, составлению которой во многом помогают материалы дистанционного зондирования. К четвертичным отложениям приурочены полезные ископаемые: россыпи, строительные материалы, торф, сапропели; с ними связаны подземные и, в первую очередь, грунтовые воды; они служат основанием различных строительных сооружений. Аэрокосмические методы изучения четвертичных отложений применяются при планировании мелиоративных мероприятий, при мониторинге эрозии почв, мерзлотных процессов и др.

Покров новейших континентальных образований теснейшим образом связан, с одной стороны, со строением рельефа, с другой — с составом коренных пород. Формирование рельефа обусловлено главным образом тектоническими движениями, а также экзогенными процессами и климатическими условиями. Основными признаками генезиса четвертичных отложений являются формы рельефа, с которыми они связаны, и рисунки изображения. Возрастные генерации четвертичных отложений распознаются по степени сохранности первичного аккумулятивного рельефа. Чем моложе отложения, тем лучше они проявлены на снимках и поддаются расшифровке не только по генезису и относительному возрасту, но нередко и по фациям. Фациальные особенности молодых генераций четвертичных отложений, главным образом их состав, дешифрируются по ландшафтным признакам — растительности и увлажненности, которые формируют спектральные особенности изображения.

Наиболее пригодными для дешифрирования четвертичных и плиоцен-четвертичных рыхлых отложений являются аэрофотоснимки и космические снимки высокого и отчасти среднего разрешения. Однако информативность их в горных и равнинных странах существенно различается. Взаимоотношения отдельных генетических типов, которые занимают большие площади, позволяют изучать космические снимки, отличающиеся обзорностью и генерализацией изображения.

Элювиальные образования. Относительно мощный покров элювиальных образований накапливается главным образом в пределах слабо расчлененных уплощенных водоразделов на массивных крепких коренных породах в условиях интенсивно развивающегося физического выветривания. Для площадей развития элювия типично отсутствие форм линейной эрозии. Через маломощный покров элювиальных отложений просвечивает строение коренных пород, особенно в степных районах. Условия залегания пород оказывают существенное влияние на изображение поверхностей, покрытых элювием. При горизонтальном залегании на МДЗ рисунок изображения однородный, «бесструктурный», пятнистый, при наклонном или складчатом — полосчатый, проявляющий простираание отдельных слоев коренных пород. Элювий на карбонатных породах и гранитоидах имеет светлый тон, на магматических породах основного состава — темный. Глинистые элювиальные продукты выветривания обычно покрыты растительностью и обнаруживаются с трудом. Исключение составляют яркоокрашенные коры химического выветривания, создающие мелкопятнистый и мозаично-пятнистый рисунок изображения.

Дешифрирование элювия во многом определяется ландшафтно-климатическими условиями. На МДЗ нивальных и полярных зон проявляется сотовый рисунок морозобойных трещин (полигональные грунты) (рис. 5.1). В лесной зоне опознать элювий сложно; глыбовые элювиальные образования, покрытые лишайниками, выделяются светлым тоном. В степной и лесостепной зонах, где глыбовый и щебнистый элювий, на котором почва почти отсутствует, а растительный покров редкий, элювий выделяется светлым тоном, а песчано-глинистый элювий, перекрытый почвенным слоем и травянистым покровом, — относительно более темным.

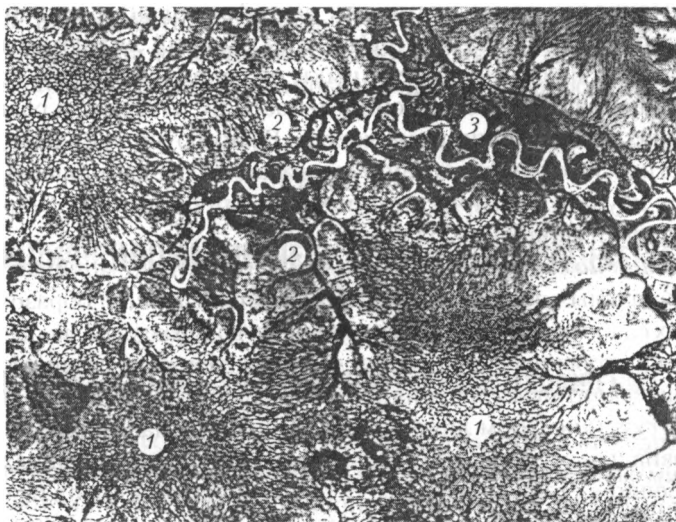


Рис. 5.1. Сотовый рисунок на водоразделах, покрытых элвием.
АФС района полярной зоны:

1 — водоразделы; 2 — склоны; 3 — речная долина

Гравитационные обвальные и осыпные образования (рис. 5.2), широко распространенные в горных странах, опознаются на МДЗ по их положению у подножий крутых склонов. Обвалы дешифрируются в тех случаях, когда они занимают значительную площадь. Опознаются обвалы по точечной или мелкопятнистой светлой поверхности с резкой верхней границей, ниже которой располагается обвальный конус, протягивающийся к подножию склона. Рельеф молодых обвальных масс беспорядочно бугристый, холмистый. Крупные обвалы могут перекрывать долины рек и являться причиной появления озер. Осыпи, сложенные обломками горных масс, скатившихся по склону и отложенных у их подножия, выделяются обычно светлым тоном, отсутствием растительности на них и формой конуса с вершиной, обращенной вверх по склону. У древних осыпей конусы более пологие, задернованные и потому более темные. На склонах развиты осыпные лотки — пути транспортировки обломочного материала. В гористых районах Крайнего Севера каменные осыпи нередко сплошь покрывают склоны.

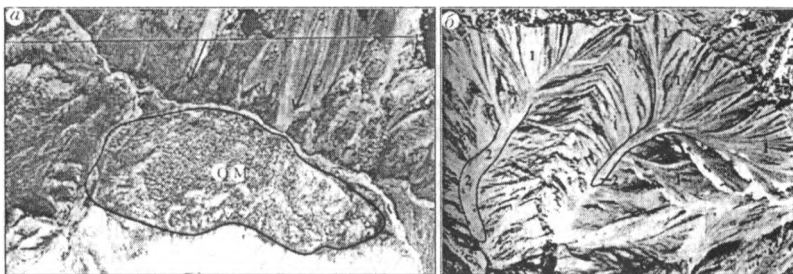


Рис. 5.2. Обвальные и осыпные образования на АФС
(по Н. В. Макаровой и Т. В. Сухановой):

а — обвальные массы (ОМ), стрелками показан склон, с которого произошел обвал;
б — обводненные древовидные осыпи (1), поставляющие материал для каменных потоков (2)

Оползневые накопления слагают оползни — геологические тела, образованные в результате смещения по склонам без потери контакта с ними под действием силы тяжести при участии поверхностной или подземной воды. Оползни наиболее характерны для областей гумидного климата как горных, так и равнинных областей. Они образуются на склонах речных долин, оврагов, берегов озер, морей. Распознаются оползни по оползневым циркам и оползневым трещинам, которые образуются на начальной стадии формирования оползня и постепенно отчленяют оползневое тело; плоскостям срыва, тыловым понижениям-западинам, образованным за счет запрокидывания оползней в сторону склона и нередко заболоченным (рис. 5.3); валам, образованным у подножия склона оползневыми массами, а также по наличию «пьяного леса» и деформаций в сооружениях, находящихся в зоне влияния оползневого процесса; нарушению в залегании горных пород в теле оползня и пр.

Классификация оползней (по В. В. Кюнтцелю) включает *оползни скольжения*, связанные с различными по составу, возрасту и генезису скальными и полускальными породами, сильно дислоцированными или моноклинально залегающими (их образованию нередко способствуют землетрясения, рис. 5.4); *оползни выдавливания*, характерные для платформенных территорий с субгоризонтально залегающими глинистыми породами; *оползни течения* (оползни-потоки) обычно глетчеровидной формы с полной или

частичной потерей первичной структуры пород, *оползни проседания*, встречающиеся в областях развития лессовых пород, которые при увлажнении приобретают способность лавинного разрушения первичной структуры, сопровождающейся просадочными явлениями И смещениями в виде отдельных блоков, при движении разрушающихся и переходящих в земляные потоки; *оползни разжижения*, характерные для областей развития молодых ГЛИНИСТЫХ отложений преимущественно морского генезиса и отличающиеся способностью внезапного разжижения и перехода в текучее состояние.

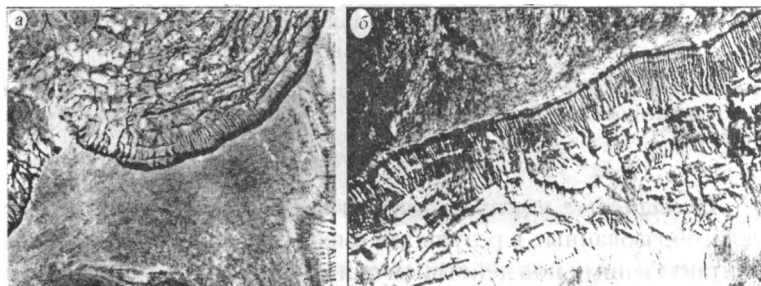


Рис. 5.3. Оползни на аэрофотоснимках



Рис. 5.4. Скальные оползни. Долина р.Чон-Кемин, Тянь-Шань. АФС (по В. И. Макарову и др.). Д — Джашилькельский, К-К — Кель-Кугурский, К-С — Кель-Ку курский, Северный

При медленном развитии оползня бугры вытягиваются изогнутыми грядами, обращенными выпуклостью вниз по склону. При быстром смещении на поверхности оползших масс возникают продольные и поперечные полосы и линии, соединяющиеся под острым углом. Поточные оползни, развивающиеся преимущественно на глинистых породах и не сохраняющие каких-либо черт внутреннего строения коренных пород, имеют «морщинистый» рисунок изображения на МДЗ. Оползни-потоки, образующиеся в основном в водонасыщенных песчано-глинистых, суглинистых и лессовидных породах и достигающие десятков и сотен метров, а иногда нескольких километров в длину, отличаются на МДЗ выпуклыми вниз по течению валами, создающими морщинистый рисунок, и расширением во фронтальной (языковой) части.

Солифлюкционные отложения образуются в процессе вязкопластичного течения вниз по склону под действием силы тяжести переувлажненного поверхностного слоя грунта. Они характерны для областей развития «вечной» мерзлоты, а также влажных тропических и экваториальных поясов. На МДЗ солифлюкционные склоны отличаются пятнистым морщинистым рисунком. Течение грунта проявляется образованием чешуеобразных и языкообразных в плане солифлюкционных террас, особенно вдоль ложбинообразных понижений на склонах. Для солифлюкционных потоков типична неровная поверхность с поперечными выпуклыми по направлению течения валиками, разделенными мочажинами, имеющими на снимках обычно темный тон. Течение материала по склонам может приобретать грязево-струйчатый характер, при этом возникают делли с характерными рисунками изображения в виде «метелочек» (рис. 5.5).

Грубообломочные массы морозобойного элювия скальных пород образуют подвижные каменные россыпи, или курумы, концентрируясь в ложбинах — каменные реки, а у подножий склонов — обширные шлейфы глыбовых россыпей языкообразной формы в плане. На снимках проявляются четкими границами и пятнистой и продольно-полосчатой структурой рисунка.

Делювиальные отложения, формирующиеся в результате плоскостного смыва на склонах, образуют полого наклонные вогнутые шлейфы, особенно мощные в нижней части крутых склонов, сложенные рыхлыми отложениями и, как правило, ли-

шенные растительности. Дешифрируются они по плащеобразной форме залегания, преимущественно светлому тону и струйчатому, полосчатому рисунку (прямолинейные или дендритовидные полосы), обусловленному зарождающимися на них эрозионными формами (промоинами, овражками, деллями). Тон изображения делювиальных отложений зависит от степени развития почвенного и растительного покрова и может меняться в широких пределах. На склонах, сложенных складчатыми осадочными и метаморфическими толщами, делювиальный покров имеет более или менее одинаковую мощность; на гранитах делювиальные образования накапливаются лишь в выположенных участках рельефа или у подножия скалистых выступов; они имеют непостоянную мощность и неправильные контуры. В верхней части склонов иногда видны небольшие скальные выступы на крепких породах.

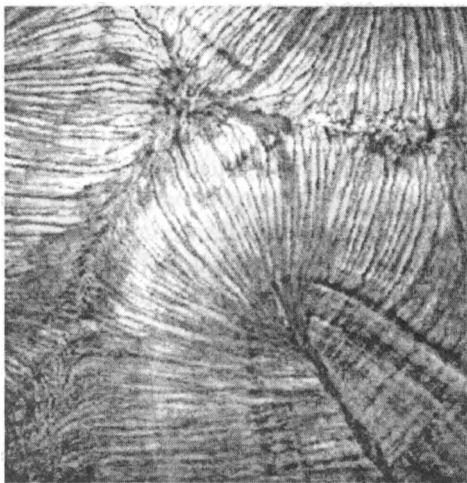


Рис. 5.5. Делли — сеть параллельных ложбин на склонах. Западная Якутия. АФС

Пролувиальные отложения образуют конусы выноса в основании оврагов. В районах с гумидным климатом они представлены в основном грубообломочными щебенисто-глыбовыми разностями. На МДЗ свежие конусы выноса дешифрируются по характерной форме и обычно светлому тону изображения.

В предгорных равнинах шлейфы из слившихся конусов выноса и наземные дельты имеют светлый неравномерный тон, ветвистый, струйчато-дендритовидный, веерообразный рисунок, образованный временными потоками (рис. 5.6).

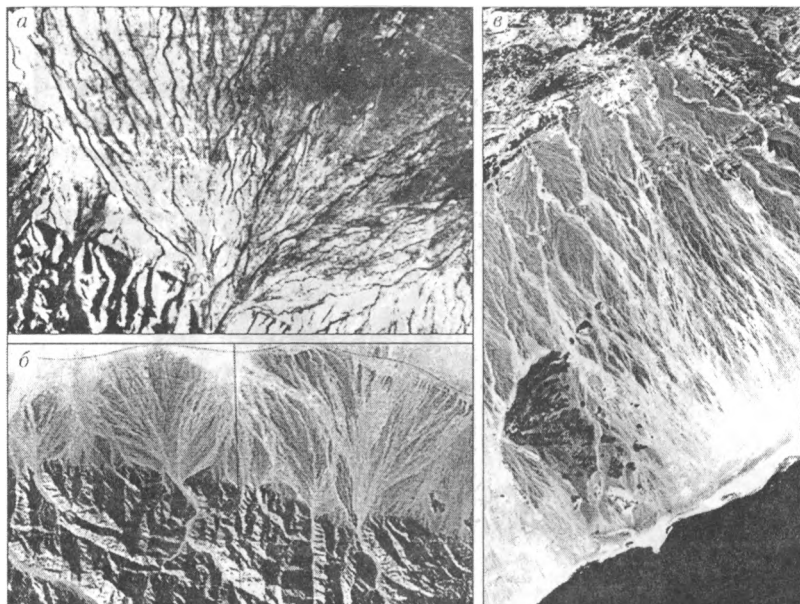


Рис. 5.6. Проллювиальные отложения на АФС (а) и космоснимках Landsat (б, в), слагающие системы слившихся конусов выноса у подножий гор: а — Средняя Азия, б — Израиль, в — Йемен

По характеру изображения и другим признакам можно проследить изменение не только морфологии пролювиального шлейфа, но в значительной степени состава слагающих его отложений. Так, например, в среднеазиатских молодых пролювиальных шлейфах вершинные части конусов выноса сложены валунными галечниками, они обычно сухие, лишены растительности и изображаются на снимках светлым тоном. Периферические части шлейфов, сложенные песчаными и суглинистыми осадками, более влажные из-за выклинивания грунтовых вод и с развитой растительностью; они выделяются на снимках темным тоном (рис. 5.7).

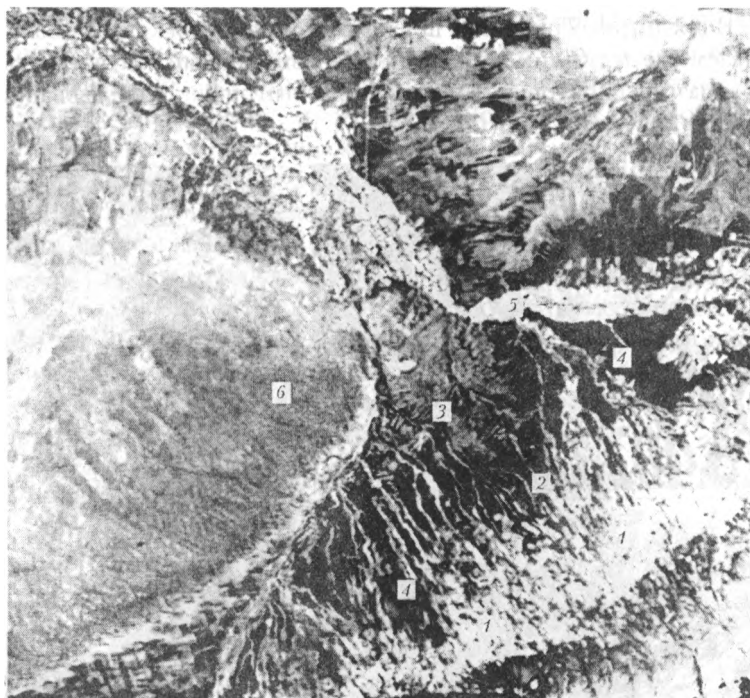


Рис. 5.7. Дешифрирование четвертичных отложений Чуйской впадины. Космический снимок (по Н. В. Макаровой). Аллювиально-пролювиальные отложения, слагающие шлейфы конусов выноса и сухие дельты на предгорной равнине:

1 — вершинные части конусов выноса, сложенные валунно-галечным материалом; 2 — центральные и периферические части, сложенные песчано-галечным и суглинистым материалом, орошаемые и распаханые; 3 — фрагменты древних среднелейстоценовых конусов выноса, перекрытые лессами; 4 — молодые (позднеплейстоценовые) растущие поднятия; 5 — долина р. Чу; 6 — песчаный массив

На снимках горных областей дешифрируются *сели* (рис. X на цветной вклейке). Это обычно короткие и довольно широкие полосы с четкими, неровными границами, явно наложенными на подстилающие коренные или четвертичные образования. Образуют конусы выноса в устьях ущелий и каньонов. Селевой поток имеет монотонную окраску, струйчатый, гофрированный, дугообразно-полосчатый рисунок, образованный сместившимися массами.

Аллювиальные отложения дешифрируются обычно без особых трудностей практически во всех ландшафтно-климатических зонах. Приуроченные к речным долинам, они имеют на снимках ленточные контуры, обычно четкие, плавные, изогнутые границы. Рисунок изображения аллювиальных отложений определяется аazonальной и зональной морфоскульптурой. Например, полосчатый веерообразный рисунок вееров блуждания, извилисто-серповидный стариц, параллельно-полосчатый рисунок дюн, насаженных на аллювиальные формы, характерны для различных климатических зон. Пятнистый рисунок термокарстовых озер и пятнисто-сетчатый тетрагональных грунтов на аллювиальных отложениях (рис. 5.8) характерны для нивальной и полярных зон, а полосчатый рисунок прирусловых валов и заболоченных понижений (рис. 5.9) — гумидной зоны.

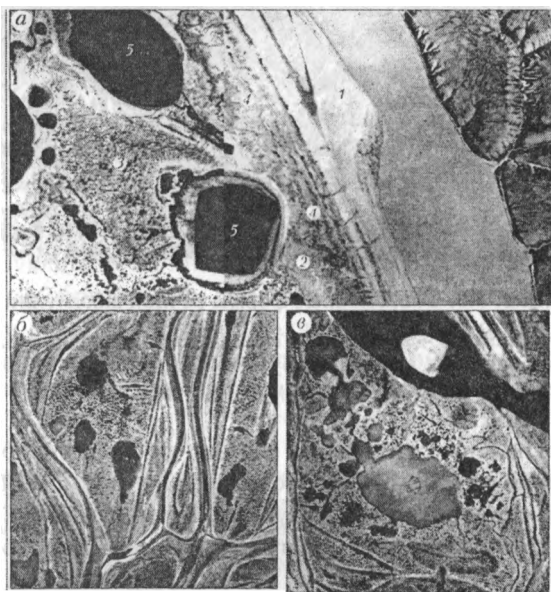


Рис. 5.8. Формы аллювиальной аккумуляции в районах развития «вечной» мерзлоты с характерным сотовым рисунком изображения полигональных грунтов. АФС.

На а: 1 — пляжи коса; 2 — пойма; 3 — первая надпойменная терраса; 4 — дюны, насаженные на пойму; 5 — термокарстовые озера на террасе. На б и в - пойма с протоками и термокарстовыми озерами

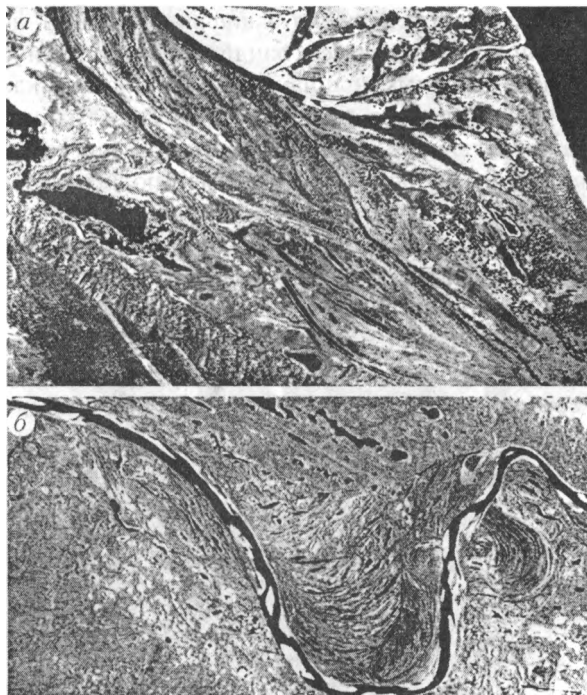


Рис. 5.9. Современные формы речной аккумуляции:

а — аэрофотоснимок, *б* — космический снимок. На пойме видны старицы, ложбины вееров блуждания русел, протоки, прирусловые валы (гривы). Вдоль русла светлым тоном выделяются прирусловые отмели, косы, осередки, сложенные песками

Аллювиальные отложения слагают русловые формы рельефа (осередки, косы), отличающиеся светлым тоном, если не закреплены растительностью, пойму с характерными микроформами рельефа (прирусловыми валами, старицами, протоками и пр.) и надпойменные террасы (рис. 5.10). Террасы дешифрируются по субгоризонтальным поверхностям обычно с монотонной окраской и обрамлению крутыми уступами, разделяющими разновысотные террасы. Уступы речных террас обычно изрезаны промоинами и оврагами, поэтому бровки имеют неровный, зазубренный контур. Небольшие относительные превышения между террасами и сглаженные бровки требуют более тщательного анализа МДЗ.

На низких террасах могут быть постройки, дороги, отсутствующие на поймах. Высокие террасы сохраняются обычно фрагментами то на левом, то на правом борту долины; их тыловые швы перекрыты делювиальными или солифлюкционными отложениями, а бровки прорезаны оврагами и долинами боковых притоков.

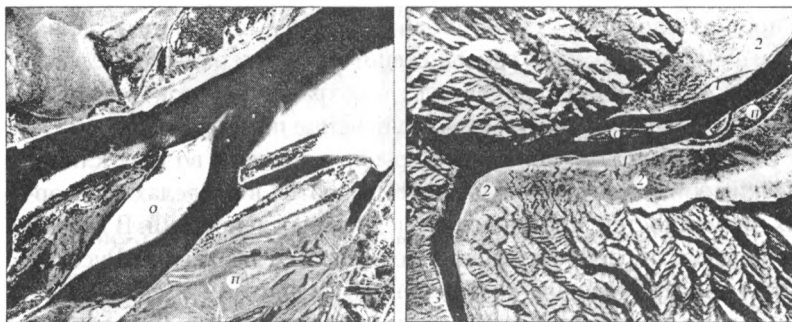


Рис. 5.10. Аллювиальные отложения, слагающие: о — осередки и косы (темные — закреплены растительностью), п — пойму, 1-3 — надпойменные террасы

Дельтовые отложения по составу, строению и фотоизображению формирующихся на них ландшафтов во многом напоминают аллювиальные образования. Наиболее уверенно дешифрируются современные дельты — далеко вдающиеся в море низменные поверхности, прорезанные многочисленными руслами, протоками (рис. 5.11). Сложены они переслаивающимися аллювиальными и морскими отложениями.

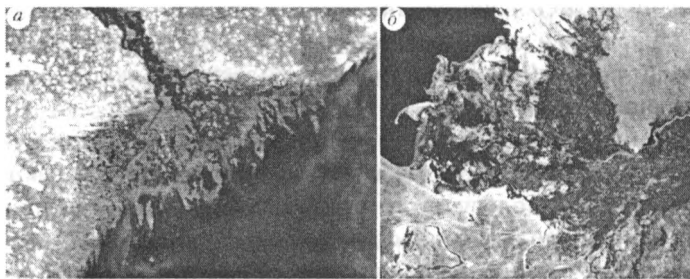


Рис. 5.11. Дельты: а — Волги, б — Амударьи. КС

Строение древних дельт зависит от ландшафтно-климатической обстановки. В зоне тундр поверхность их обычно в значительной степени переработана мерзлотными процессами, покрыта полигонально-валиковыми образованиями и термокарстовыми озерами. В зоне пустынь, особенно там, где дельтовые отложения представлены тонкими песчано-глинистыми осадками, их первичное дельтовое происхождение можно установить только по единичным реликтовым формам, а также по расположению гряд песков, которые часто повторяют контуры древних русел, где сохранился поток грунтовых вод и наблюдается повышенное увлажнение песков.

Озерные отложения широко распространены во всех климатических зонах и особенно часто встречаются в пределах приморских низменностей, предгорных и межгорных депрессий. В лесной зоне (в области распространения ледниковых отложений Русской плиты) они приурочены к современным и древним озерным котловинам, представлены песками и слагают «боровые» террасы (с сосновыми борами), отличающиеся светлым тоном изображения. Озерные отложения в зоне тундры, где поверхности озерных отложений изменены вторичными мерзлотными процессами, распознаются труднее. В зоне пустынь и полупустынь поверхность озерных отложений обычно покрыта солончаками.

В пределах крупных долин или депрессий развиты *озерно-аллювиальные отложения*. Они слагают высокие террасы, поверхность которых обычно переработана мерзлотными, болотными, эоловыми зональными процессами, а также процессами засоления.

Среди четвертичных отложений в областях Северного полушария главная роль принадлежит *ледниковому комплексу* (ледниковые, водно-ледниковые, озерно-ледниковые отложения), занимающему большие площади и достигающему значительной мощности. Этот комплекс отложений в платформенных областях является рельефообразующим.

Ледниковые отложения теснейшим образом ассоциируют с ледниковыми формами рельефа (рис. 5.12). Ледники опознаются по светлой окраске, полосчатости, отражающей движение ледника, и характерной продольной и поперечной трещиноватости.

В пределах равнин, сложенных моренными отложениями разного возраста, различия в ландшафтном облике определяют-

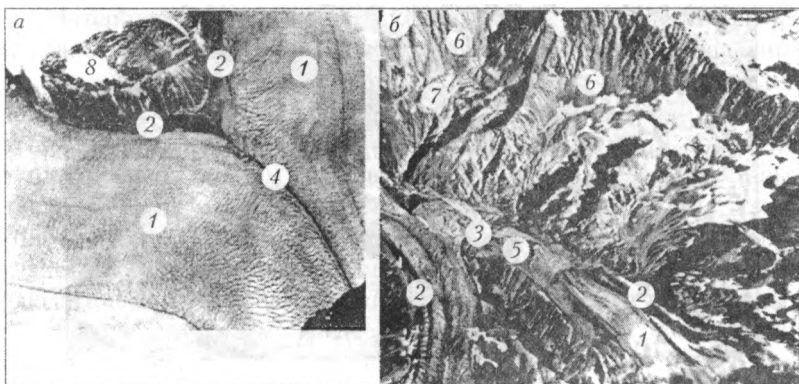


Рис. 5.12. Ледниковые формы рельефа и отложения. АФС:

1 — ледники; 2-5 — морены: 2 — боковая, 3 — конечная, 4 — срединная, 5 — основная; 6 — обвально-осыпные накопления; 7 — моренно-солифлюкционные потоки, 8 — нунатак

ся в основном неодинаковой степенью переработки первичного рельефа процессами денудации. Наилучшей выраженностью на МДЗ отличаются ледниковые отложения позднечетвертичных и второго из среднечетвертичных оледенений, что обусловлено хорошей сохранностью рельефа. Основные морены образуют волнистые равнины с пологосклонными повышениями и плоскими, часто заболоченными понижениями и холмистые равнины с более выраженными изометричными и слабо вытянутыми холмами различной высоты. Дешифровочными признаками основных морен являются главным образом темный тон изображения, волнистый или пологохолмистый характер рельефа, а также высокая степень освоенности территории. Морена, перекрытая покровными суглинками, отличается пятнистым и полосчатым изображением (плоскостной смыв, потяжины, зачаточные формы суффозионно-просадочных явлений). Специфические рисунки моренных ландшафтов проявляют направления движения ледника (рис. 5.13).

Конечные морены отличаются формами рельефа, которые представлены преимущественно холмами и грядами, расположенными поперек движения ледника (рис. 5.14).

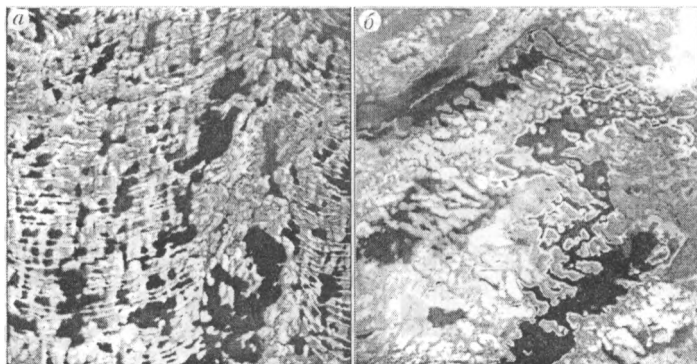


Рис. 5.13. Моренные отложения, образующие: *а* — сетчато-ячеистый моренный рельеф из блоков морены, выпуклые в направлении движения ледника, сочленяющиеся друг с другом своими флангами; *б* — ребристый рельеф из параллельных друг другу грядок, сложенных грубым моренным материалом (по Ю. А. Лаврушину)

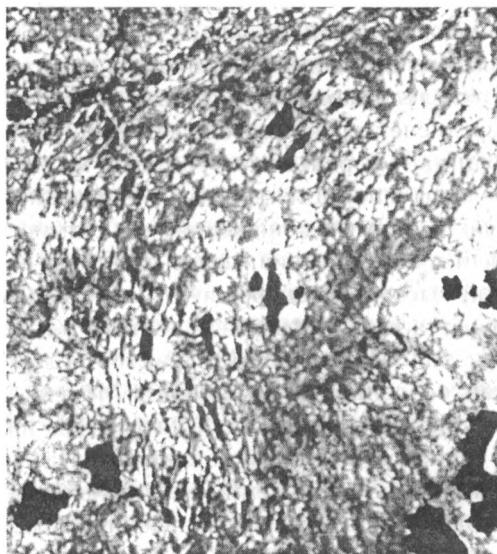


Рис. 5.14. Краевые ледниковые отложения, образующие напорный вал с характерным дугообразным рисунком. Черные пятна — озера. Малоземельская тундра. АФС

Материалы дистанционного зондирования чрезвычайно информативны в отношении горных ледниковых образований, и значение их при картировании этих отложений и форм рельефа трудно переоценить. В горных районах лучше других видов ледниковых отложений дешифрируются конечные морены. Они образуют дугообразные валы, вытянутые поперек долин, обращенные выпуклостью вниз по уклону долины. При отсутствии ледника гряды конечных морен могут быть разделены относительно ровными участками, покрытыми остаточными моренами. Нередко можно наблюдать несколько уровней донных и конечных морен, прорезанных поздними ледниковыми языками, находящимися на более низких гипсометрических отметках, чем раннее оледенение. Характерны озера в троговых долинах, подпруженные грядами конечных морен. Особенно широко развиты конечные морены у концов ледниковых трогов, там, где они сливаются с более крупными долинами, и у подножий горных гряд. Боковые морены образуют валы и гряды, протягивающиеся вдоль склонов трогов, и резко отличаются не только формой, но и темным тоном.

Флювиогляциальные отложения, представленные в основном песками, слагают зандровые поля, долины и озы. Зандровые равнины отличаются плоским рельефом, иногда прорезанным ложбинами стока, и заняты сосновыми борами. На МДЗ зандровые равнины имеют неясно мозаичное, неопределенно-пятнистое изображение, обусловленное сменой лесов различного состава; преобладают сосновые боры (рис. 5.15). Немногочисленные ручьи и мелкие реки текут в узких, неглубоких долинах. В ложбинах стока и на плоских водоразделах расположены болота переходного и верхового типа.



Рис. 5.15. Зандровая равнина, покрытая лесом. Беларусь. АФС

Почвы на флювиогляциальных песках развиты слабо, поэтому пахотные угодья, грунтовые дороги и обнажения имеют на АФС светло-серый тон, а степень сельскохозяйственного освоения зандровых равнин незначительная.

Долинные зандры, имеющие те же дешифровочные признаки, что и площадные зандры, слагают высокие террасы в долинах рек, нередко со следами эоловой переработки.

Озы — узкие валообразные извилистые гряды различной протяженности (рис. 5.16), цепочки холмов, линейно вытянутые или кольцевой формы, сложенные преимущественно песками и в большинстве случаев покрытые сосновыми лесами. Встречаются переходы озовых гряд в зандры (рис. 5.17).

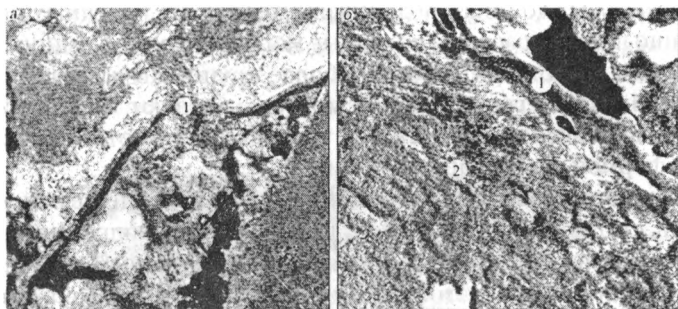


Рис. 5.16. Озовые гряды (1): а — Кольский п-ов; б — север Русской равнины, район валдайского оледенения; (2) — моренные холмы (по Н. В. Кобец и др.)

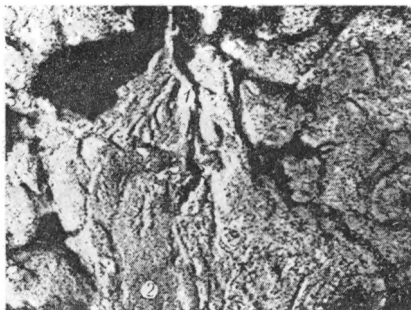


Рис. 5.17. Озовая гряда (1), переходящая в зандры (2). Кольский полуостров (по Н. В. Кобец и др.)

Озерно-ледниковые отложения представлены слоистыми песчано-глинистыми осадками озерного типа, реже чистыми песками, слагающими *камы*, которые образуют в рельефе невысокие холмы, местами сливающиеся в гряды и возвышенности с холмисто-западинным рельефом. Структура изображения камов на МДЗ — крупномозаичная за счет беспорядочного чередования округлых и удлинённых пятен различных оттенков. Местами камы встречаются совместно с озями и озерными отложениями, образуя единые озово-камово-озерные ландшафты.

Морские отложения развиты по берегам морей и океанов, где они слагают современные аккумулятивные формы (косы, пересыпи, пляжи, бары и др.) и морские террасы различной высоты и возраста. Современные морские отложения четко дешифрируются по положению на морских берегах, характерным формам и светло-серому тону изображения (рис. 5.18). Относительно более древние отложения имеют темный тон, обусловленный почвенно-растительным покровом.

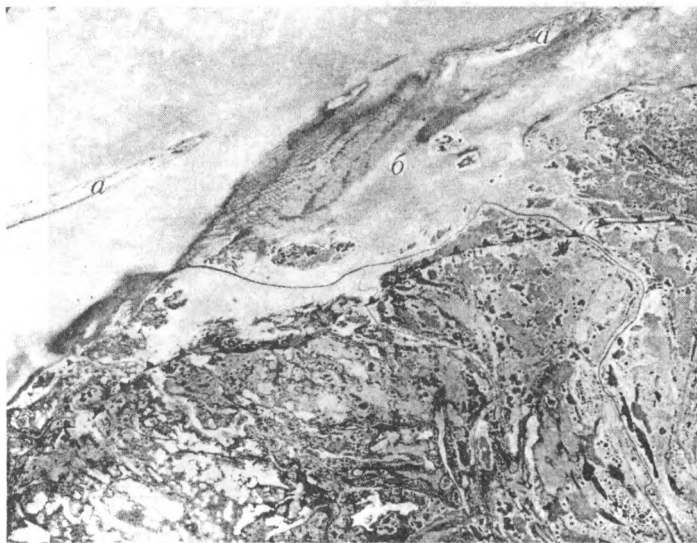


Рис. 5.18. Морские образования. Дельта р. Яны (по Г. В. Крутий). Морская терраса отделена уступом (бергштрихи) от прибрежной части (б). Серия островных баров (а) оконтуривает внешний край аванделты

Эоловые отложения широко распространены в районах с аридным климатом (пустыни, полупустыни), а также по берегам морей, озер и рек со скудным растительным покровом. Эоловые пески различаются по степени подвижности, строению рельефа, характеру растительного покрова. Широко развиты полужакрепленные бугристо-ячеистые и грядовые пески. Незакрепленные пески образуют барханы, барханные цепи, дюны и некоторые другие формы, характерные для перевеваемых песков (в зарубежной литературе дюнами называют все положительные эоловые формы рельефа, в том числе и пустынные). Эоловые отложения дешифрируются по тону изображения и формам рельефа. В аридных областях широко развиты эоловые отложения с бугристыми, ячеистыми поверхностями (рис. 5.19) и рисунком «застывших волн» (рис. 5.20).

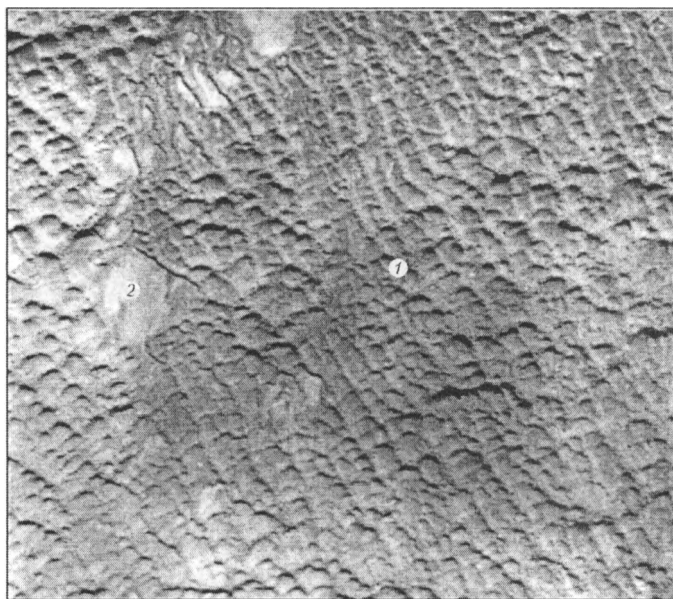


Рис. 5.19. Песчаная пустыня с барханным рельефом. АФС. Барханы (1) образуют грядовые цепи (крутые подветренные склоны их темные, наветренные пологие — светлые). Бесструктурными светлыми пятнами выделяются ячеистые пески (2)

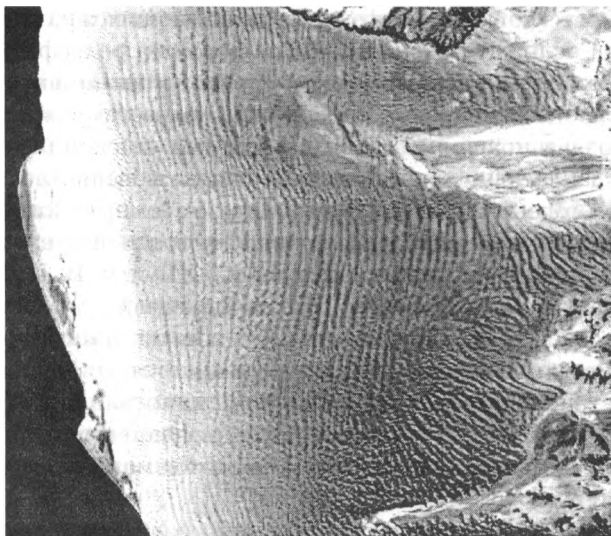


Рис. 5.20. Дюнные цепи. Пустыня Намиб. КС Lansat. Расположенные рядами дюнные цепи вытянуты на большие расстояния параллельно берегу Атлантического океана (черный тон)

5.2. РЕЛЬЕФ КАК ИНДИКАТОР ТЕКТОНИЧЕСКИХ СТРУКТУР

Изучение рельефа, в том числе с применением МДЗ, является самостоятельным видом исследований. При геолого-съёмочных работах составляются геоморфологические карты с отражением типов и форм рельефа разного генезиса. В данном разделе учебника рассмотрим рельеф с позиции его индикационной роли при изучении геолого-структурных особенностей строения территорий, при структурно-геоморфологических исследованиях.

Рельеф — это совокупность форм поверхности суши, дна океанов и морей, разнообразных по очертаниям, размерам, происхождению, возрасту и истории развития. Рельеф Земли состоит из отдельных форм разных рангов. Наиболее крупными элементами рельефа суши являются равнинно-платформенные области, занимающие ~64 % их площади, и горные (орогенные). Крупные формы рельефа Земли образованы эндогенными процессами и являются

отражением тектонических структур, развивающихся на новейшем этапе. Они осложнены наложенными формами рельефа разного размера, созданными экзогенными денудационными и аккумулятивными процессами. Поскольку в основных чертах современный рельеф создан новейшими тектоническими движениями, в его строении заключена большая информация о новейших тектонических деформациях. В развитие структурно-геоморфологического анализа новейших деформаций, проявленных в рельефе, большой вклад внесли В. Пенк, В. А. Обручев, С. С. Шульц, Б. Л. Личков, Н. П. Костенко, В. И. Макаров, Н. В. Макарова, С. А. Несмеянов, Н. И. Николаев, Л. И. Соловьева, А. А. Чистяков и многие другие геологи. Результатом развития исследований этого направления явилось становление особой дисциплины, пограничной между геоморфологией и геотектоникой, — структурной геоморфологии. Одним из ее мощных инструментов являются материалы дистанционного зондирования.

На космических снимках *платформенных областей* континентального и регионального уровней генерализации тектонические структуры, развивающиеся на новейшем этапе, в основном представлены крупными блоками земной коры с различной тенденцией и амплитудами тектонических движений. Эти структуры отличаются высотным полем, морфологическими особенностями рельефа и характером эрозионного расчленения. Обычно повышенные участки рельефа соответствуют новейшим поднятиям, пониженные — впадинам. В пределах поднимающихся блоков развиты процессы денудации, а опускающихся — аккумуляции. Все это определяет спектральные особенности (тон) и структурный рисунок их изображения на снимках. На аэро- и космических снимках со средним и высоким пространственным разрешением выявляются новейшие структурные формы высоких порядков: горсты, грабены, блоки, своды, впадины. Малые амплитуды тектонических движений и малая контрастность новейших структурных форм в платформенных областях требуют применения ландшафтно-индикационного метода дешифрирования. С развитием новейших структурных форм связаны распределение фаций и мощностей неоген-четвертичных отложений, особенности строения речных долин, ледникового, флювиогляциального, эолового рельефа. Зарождающиеся в рельефе платформенных равнин локальные структуры выявляются,

как правило, по микроформам рельефа и характеру экзогенных процессов.

На космических снимках *горно-складчатых областей* континентального и регионального уровней генерализации отражены генеральный новейший структурный план и парагенезисы структур, обусловленные региональным полем тектонических напряжений. Геодинамические условия формирования орогенов, скорость и длительность конэрозионного развития, суммарные амплитуды поднятий, а также геологическое строение субстрата и климат определяют специфические особенности изображения («фотопортреты») орогенных областей. Для горных территорий характерны складки и блоки основания, выраженные в рельефе хребтами и впадинами. В пластических средах в платформенных чехлах формируются складки осадочного покрова, которые дешифрируются на космических снимках со средним и высоким пространственным разрешением.

Геоморфологическое выражение структурных форм определяется прежде всего общей направленностью и интенсивностью новейших тектонических движений, а также литолого-стратиграфическими условиями, формой залегания горных пород и глубиной денудационного среза. Эти вопросы наиболее полно рассмотрены Н. П. Костенко. Структурные формы, развивающиеся на новейшем этапе, выражены в рельефе, когда скорости тектонических поднятий или опусканий превышают скорости процессов денудации и аккумуляции. Эти деформации создают разнообразные орографические формы, среди которых выделяются структурно подобные, в целом близкие по конфигурации к тектоническим деформациям и измененные экзогенными процессами (искаженные).

На начальных стадиях морфологического становления деформаций наиболее чувствительными их индикаторами бывают мелкие речки, ручейки, форма болот, локальные изменения характера расчленения поверхностными водами участка зарождающейся в рельефе структурной формы, которые различаются в разных ландшафтно-климатических зонах. Индикаторами локальных поднятий в низменных заболоченных районах с суровым климатом могут быть различной формы заозеренные участки (изометричные на своде и вытянутые на крыльях-склонах структуры) (рис. 5.21). В районах умеренного и влажного климата с хорошо развитой гидрографической сетью

локальные поднятия в пределах аккумулятивных равнин вызывают местные изменения в геологической деятельности рек и строении долин. Сужение, спрямление русла, врезанные меандры, изменение строения наиболее молодой части долины, увеличение глубины, дробности расчленения — все это косвенные признаки поднятий.

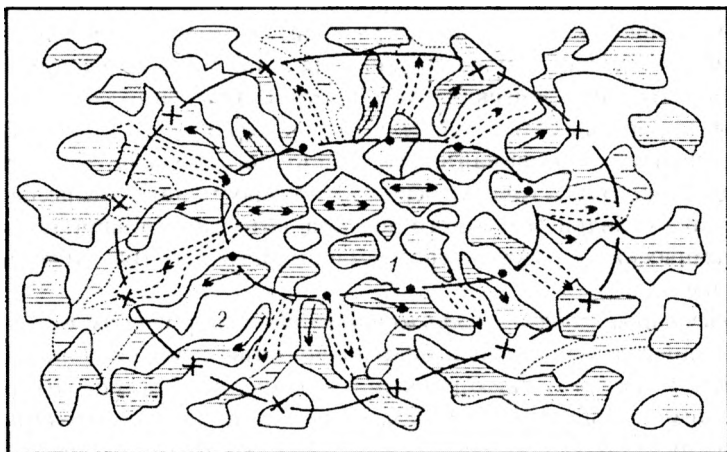


Рис. 5.21. Локальное поднятие. Западная Сибирь (по Н. П. Костенко).

Зарождающееся в рельефе поднятие дешифрируется по форме озер: изометричных, бессточных — на своде (1), вытянутых с зарождающимся стоком — на склонах (2). Обобщенными линиями показаны контуры свода (верхняя) и склонов (нижняя линия)

Большую информацию о скрытых тектонических структурах несет плановый рисунок эрозионного расчленения территорий (рис. 5.22). Центробежный и центростремительный рисунок эрозионной сети проявляют купольные поднятия и мульдообразные прогибы соответственно. Признаками антиклинальных складок могут быть миграция русла, появление карстово-суффозионных просадок на своде, а также развееваемых песков (особенно на крыльях растущих структур с пологими широкими сводами) и пр. Синклинальные складки могут проявляться в виде понижений в рельефе, нередко занятых озерами или заболоченных, наличием аномально широких участков речных долин, в частности поймы, и пр.

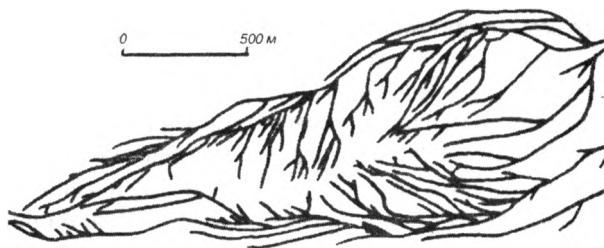


Рис. 5.22. Молодая антиклиналь Западного Копетдага, проявленная в рисунке эрозионной сети (по В. Г. Трифонову)

Большое значение имеют скорость и длительность процесса морфологического становления деформации, идущего одновременно с ее эрозионным расчленением. Например, реки в зависимости от интенсивности процесса воздымания либо пропиливают растущее поднятие с образованием antecedentных долин, либо скатываются с поднятия и огибают его, либо меняют направление стока с образованием брошенных русел, либо речные долины оказываются поднятыми и оторванными от основного базиса эрозии.

Погребенные разломы нередко дешифрируются по закономерно расположенным понижениям в рельефе. Линейное расположение зон разгрузки подземных вод и развитие влаголюбивой растительности в аридных районах, карстовых, карстово-суффозионных, термокарстовых воронок, коленообразные изгибы рек, уступы и обрывы на склонах горных массивов и т. п. являются косвенными признаками разломов, не выведенных на современный денудационный срез. Новейшее развитие их можно определить по деформациям ими денудационных и аккумулятивных форм рельефа и покрова новейших отложений.

Среди орографических форм, соответствующих структурным формам, не развивающимся на новейшем этапе («мертвым»), выделяются скульптурно-тождественные, которые могут быть выражены в рельефе только в условиях общего поднятия территории и препарирования бронирующих слоев, участвующих в строении деформации. В зависимости от литолого-стратиграфических условий орографические формы бывают прямыми, когда неразвивающаяся деформация сложена породами, устойчивыми к денудации, и обращенными (если, например, бронирующие слои обнажаются

в ядре «мертвой» синклинали). Одна и та же деформация может быть выражена в рельефе различно.

На новейшем этапе многие структуры древнего заложения развиваются унаследованно и участвуют в формировании неотектонического плана. Обычно это долгоживущие разломы, периодически активизировавшиеся на протяжении всей геологической истории развития земной коры. Унаследованное их развитие на новейшем этапе, также как и складчатых и блоковых структурных форм, позволяет выявлять структуры древнего заложения.

Глава 6

ЛИНЕЙНЫЕ СТРУКТУРЫ НА МАТЕРИАЛАХ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ

Первые описания линейных структур земной коры относятся к первой половине XIX в. и связаны с именами Э. Бомона, В. Гопкинса, Л. Буха, А. Добрэ, а позднее Н. И. Андросова, А. П. Карпинского, М. Бертрана, Э. Зюсса и др. Объектами структурного дешифрирования МДЗ являются прежде всего разрывные нарушения разных рангов, в том числе погребенные под осадочным чехлом.

6.1. РАЗРЫВНЫЕ НАРУШЕНИЯ

Коровые разрывы. Разрывы образуются в различных геодинамических условиях, характеризуются разным строением и выражением на материалах дистанционных съемок. Выявляются они преимущественно по косвенным признакам. Выведенные на земную поверхность, разрывные нарушения обычно разрабатываются эрозией и маркируются линейными понижениями в рельефе, или, напротив, денудационными грядами, гривками, если к ним приурочены дайки, жилы, тектонические брекчии, или денудационными уступами, гривками, которые отражают положение контакта пород с разной противоденудационной устойчивостью (рис. 6.1). Общим дешифровочным признаком разрывных нарушений является линейность, соответствующая положению сместителя, выраженная различными элементами рельефа. Разрывы, по которым заложились

речные долины, обнаруживаются по несоответствию геологического строения бортов долин, выпадению из разреза стратиграфических подразделений, интенсивной трещиноватости пород в ее бортах, прямолинейной форме и коленообразным изгибам долин и пр. В аридных областях важным индикатором разрывов могут быть линейно расположенные источники, пятна густой травянистой или кустарниковой растительности, отличающиеся темным тоном на снимках.

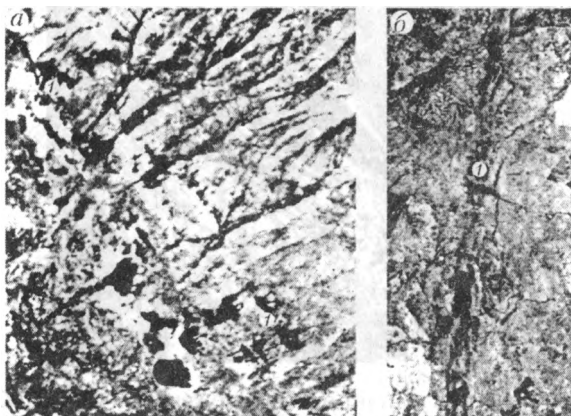


Рис. 6.1. Разрывные нарушения (1), маркированные: а — линейным понижением в рельефе и высачиванием подземных вод; б — дайкой

Разрывы могут проявляться на снимках и прямыми признаками, например, когда они пересекают слоистую толщу со смещением (рис. 6.2). Разрывы, ориентированные согласно со слоистостью пород, похожи на поверхности несогласия. При хорошей обнаженности на МДЗ дешифрируются трещины (рис. 6.3). Трещины, и особенно кливаж, маскируют слоистость, создавая ложное впечатление о направлении простираания пород. Разновозрастные комплексы горных пород, разделенные поверхностью несогласия, обычно имеют различные планы трещиноватости. Материалы дистанционного зондирования помогают выявлять и проследивать разрывные нарушения и зоны трещиноватости нередко с полнотой, недоступной при наземных наблюдениях. В хорошо обнаженных районах, особенно если они сложены слоистыми породами с четко

выраженными пластовыми фигурами, возможно определение направления наклона поверхности сместителя и морфокинематического типа разрыва. Но уверенные суждения о кинематике разломов возможны только на основании анализа комплекса данных, прежде всего геологических.



Рис. 6.2. Тектонический контакт между отложениями C_2 и C_3 . Казахстан. АФС (по А. Е. Михайлову)



Рис. 6.3. Трещиноватость в докембрийских образованиях. Намибия. КС

Сбросы и взбросонадвиги — это разрывы с вертикальным смещением крыльев. Разрывы с вертикальным положением поверхности сместителя (нормальные сбросы) отличаются на МДЗ прямолинейностью, нередко хорошо выраженными уступами, разделяющими блоки с различным геологическим строением, типами рельефа и характером расчлененности, которые обуславливают разные структурные рисунки изображения крыльев разрывов. Обычно сбросы и взбросонадвиги имеют искривленную поверхность сместителя, связанную с вращением крыльев. Разрывы делятся на синтетические и антитетические (рис. 6.4).

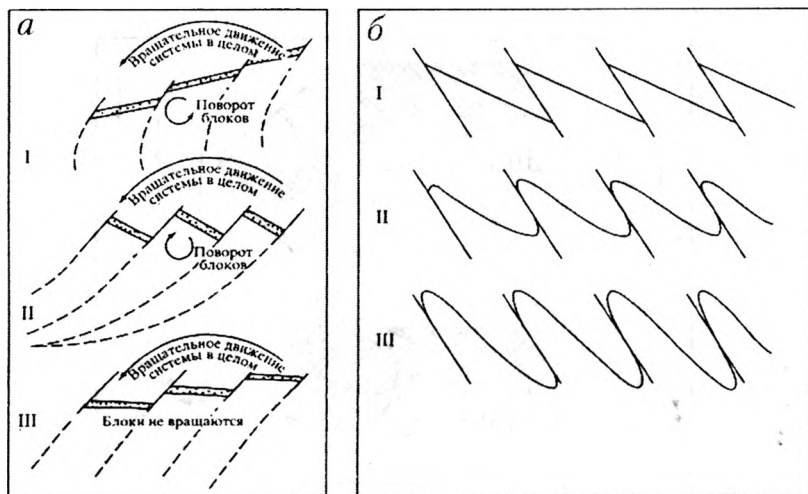


Рис. 6.4. Синтетические и антитетические разрывы (по Е. Н. Паталахе):

a — сбросы разных кинематических типов: I — синтетические; II — антитетические; III — «нормальные», без поворота блоков; *б* — антитетические взбросы и чешуи: I — взбросовые чешуи; II — то же, с поворотом слоев; III — асимметричные складки, осложненные антитетическими взбросами

Синтетические сбросы возникают при вертикальном движении блоков (флексурном изгибе), и вращение крыльев (если оно присутствует) может быть только попутным смещению стенок разрыва (рис. 6.5). В результате общая вертикальная амплитуда смещения увеличивается. Вниз по разрезу синтетические сбросы выкручи-

ваются и могут приобрести даже обратный (взбросонадвиговый) наклон, что проявляется в уменьшении радиуса кривизны цирка разрыва. Антитетические сбросы (листрические, выполаживающиеся вниз) образуются в условиях горизонтального растяжения. Вращение крыльев разрыва тогда будет встречным, уменьшающим амплитуду общего вертикального смещения по нему. Для этих разрывов характерны зияющие или заполненные рыхлыми тектонитами трещины, а также значительная ширина зон, несоизмеримая с наблюдаемыми амплитудами перемещений. Типичны склоны отседания, фасетная и трапецевидная морфологии, явления скальных оползней и обвалов.

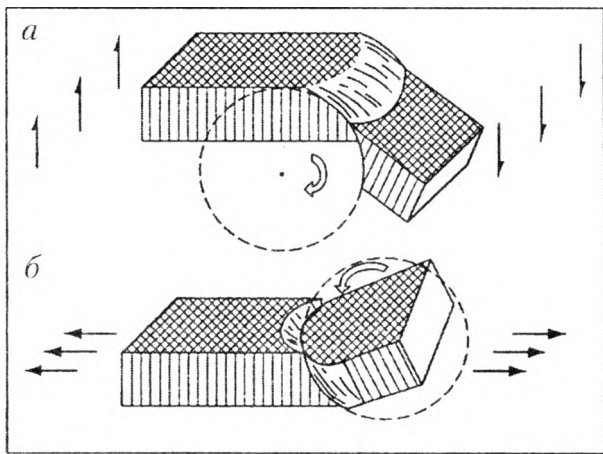


Рис. 6.5. Форма линии сброса в плане (по М. Л. Коппу):

а — вертикальное проседание, или флексурный изгиб, *б* — горизонтальное растяжение. Плоский параллелепипед символизирует субгоризонтальный слой, пунктирный круг — проекцию сфероидальной поверхности скольжения на вертикальное сечение, стрелки внутри круга — направление действующих сил и поворота блока соответственно

Отличить на МДЗ синтетические сбросы от взбросонадвигов только по направлению дугообразного изгиба линии сместителя не всегда возможно, что наглядно иллюстрирует рис. 6.6.

Уверенно опознаются на МДЗ разрывы, граничные для областей денудационного и аккумулятивного рельефа (рис. 6.7). У активно

развивающихся сбросов поднятое крыло выражено денудационным рельефом, опущенное — аккумулятивным, что особенно хорошо проявлено в предгорьях с широко развитыми пролювиальными конусами выноса разных генераций. У выраженных в рельефе взбросов вдоль денудационных уступов обычно развиты гравитационные шлейфы. Системы сбросов и взбросов образуют грабены и горсты, опознающиеся на МДЗ по линейной форме, тону и структурным рисункам, различным для опущенных и поднятых блоков.

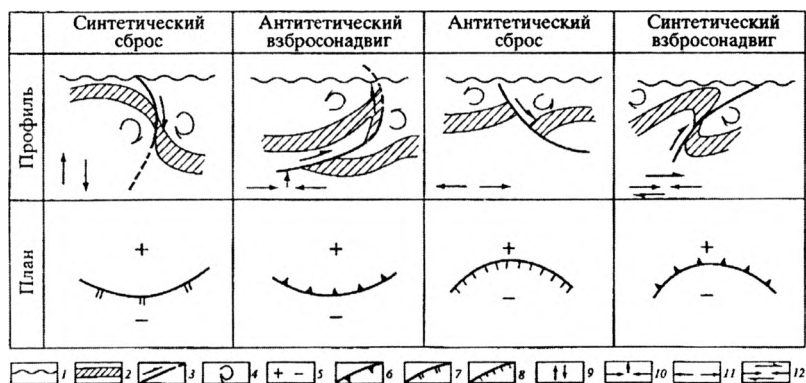


Рис. 6.6. Конвергентность геоморфологической конфигурации линии сместителя разных разрывов, характеризующихся смещением по падению сместителя (принципиальная схема) (по М. Л. Коппу):

1-4 — на профилях: 1 — поверхность земли, 2 — деформируемый слой, 3 — разрыв (стрелка указывает направление смещения активнодвигающегося крыла), 4 — направление поворота крыльев разрыва; 5-8 — в плане: 5 — поднятое (плюс) и опущенное (минус) крылья разрыва; 6-8 — разрывы (треугольники и бергштрихи направлены по падению сместителя): 6 — взбросонадвиги, 7 — субвертикальные сбросы (взрезы), 8 — наклонные листрические сбросы; 9-12 — деформационные обстановки: 9 — вертикальное смещение и скашивание (простой сдвиг) поперек земной поверхности, 10 — горизонтальное сжатие с выжиманием материала вверх, 11 — горизонтальное растяжение, 12 — горизонтальное сжатие со скашиванием (простым сдвигом) параллельно земной поверхности. Синтетический сброс и антитетический взбросонадвиг, хотя и образуются в принципиально разных динамических обстановках, но благодаря одинаковой экспозиции искривленной поверхности сместителя (с выпуклостью к просевшему крылу) могут в плане выглядеть одинаково — в виде дуг, выгибающихся в сторону последнего. По той же причине могут оказаться неотличимы антитетические сбросы и синтетические взбросонадвиги, только образованные ими дуги обращены в противоположную сторону



Рис. 6.7. Сброс со сдвиговой составляющей. Средняя Азия. АФС

Раздвиги — разрывы, перемещение горных пород по которым при растяжении происходит перпендикулярно к поверхности отрыва, обычно заполнены магматическими породами, образующими дайки и целые дайковые рои, но могут быть и зияющими (рис. 6.8). Раздвиговая структура базальтовых излияний определяется на космических снимках по характерной полосчатости.

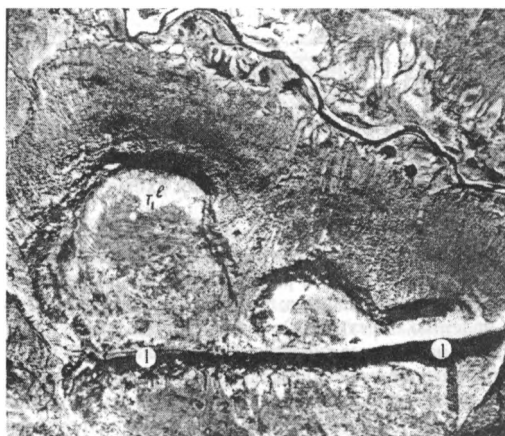


Рис. 6.8. Раздвиг (1-1), нарушающий базальты триаса, выражен в рельефе рвом. Восточная Сибирь. АФС

Надвиги (соскладчатые разрывы) образуются при общем продольном сжатии совместно с образованием складок, нередко силь-

но сжатых и опрокинутых. Когда складки сложены однородными толщами, надвиги ориентированы параллельно осевой поверхности и развиты в ядрах складок. В неоднородных толщах надвиги осложняют и крылья по границам пластичных пород. Для этих разрывов нехарактерно эрозионное расчленение. Лучше всего они дешифрируются по асимметричным антиклиналям, которые образуют на фронте надвига валообразные формы рельефа и обуславливают полосовый рисунок изображения на снимках.

Тектонический покров, или шарьяж, — горизонтальный, пологий или волнистый надвиг с амплитудой перемещения до десятков и даже сотен километров. На КС он отличается сложным фестончатым рисунком перемещенных масс (аллохтона), которые в процессе движения распадаются на отдельные пластины, а складчатое строение их сильно усложняется (рис. 6.9). Во фронтальной части



Рис. 6.9. Пакет покровов Печенгской «мульды». Кольский п-ов. Космический радиолокационный снимок (по Е. С. Кутейникову и Н. С. Кутейниковой)

покрова могут присутствовать экзотические останцы, отделенные эрозией от аллохтона, а также тектонические окна в аллохтоне, где экзогенными процессами удалены породы его верхних частей. Шарьяжи широко распространены в подвижных складчатых системах (Карпаты, Кавказ, Урал, Камчатка).

Сдвиги отличаются прямолинейностью. Зоны сдвигов и элементарные сдвиги располагаются в земной коре группами, а их морфология подобна, независимо от размеров. Они узнаются по смещению в горизонтальной плоскости геологических границ или маркирующих слоев, по однонаправленным смещениям и искривлениям русел, склонов долин, конусов выноса, гребней водоразделов и других форм рельефа; по дискретному расположению кулисно построенных разрывов, эшелонированным гирляндам складок или их торцовому сочленению с линией разрыва, а также характерным рисункам. В зонах сдвиговых дислокаций линейные элементы рельефа образуют Z- и S-образный рисунок, позволяя выявить соответственно право- и левосторонние перемещения (рис. 6.10). Зоны сдвига имеют рисунки: «эшелон», «ромб», «конский хвост», «елочка». Вдоль сдвигов образуются деформации растяжения — впадины ромбовидной или линзовидной формы в плане типа pull-apart basins (рис. 6.11), и деформации сжатия с формированием положительной цветковой структуры (зоны сдвига-сжатия, в разрезе выраженные разломной зоной, переходящей вверх в веер разломов).

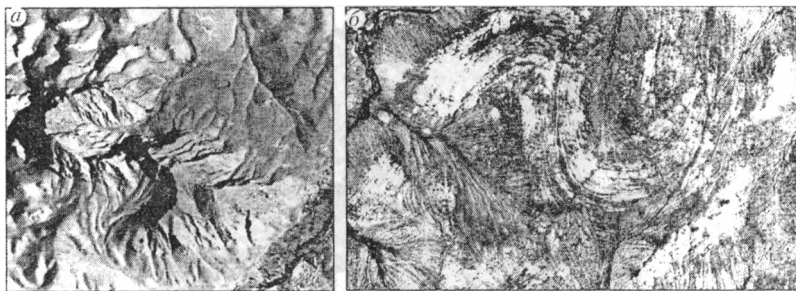


Рис. 6.10. Z- и S-образные горизонтальные складки, образованные при правостороннем (а) и левостороннем (б) смещении в зоне сдвига.

Аэрофотоснимки (по Е. С. Кутейникову и Н. С. Кутейниковой):

а — Анабарский массив, б — Узбекистан, хр. Нурагата

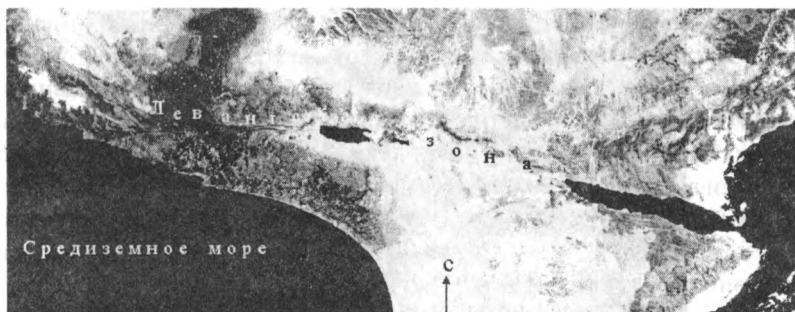


Рис. 6.11. Левантская левосдвиговая зона с впадиной Мертвого моря. КС

Сочетания двух кулисообразно расположенных левых или правых сдвигов, сомкнутых между собой системой субпараллельных дочерних оперяющих разрывов, образуют сдвиговые дуплексы (линзообразные тела, иногда изогнутые, каплевидные) (рис. 6.12, 6.13).

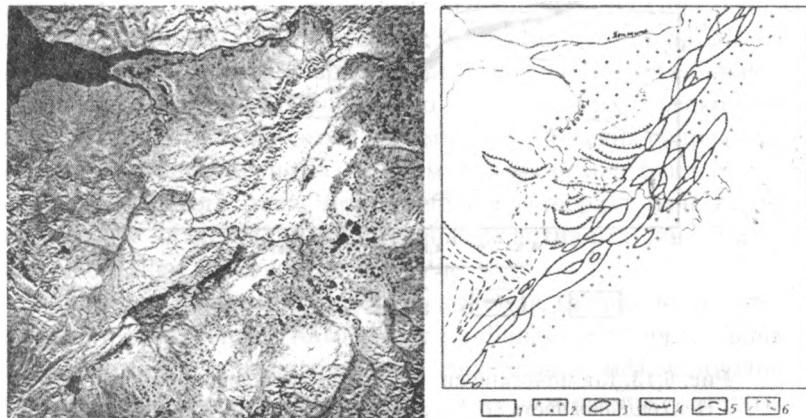


Рис. 6.12. Сдвиговые дуплексы. Пенжинский прогиб.
(по Е. С. Кутейникову и Н. С. Кутейниковой)

1 — аллохтон, отложения палеозоя-мезозоя, до нижнего мела включительно; 2 — неогавтохтон, отложения позднего мела-кайпозоя; 3 — границы основных дуплексов в зоне сдвига; 4 — фронтальные части аллохтонов чешуйчатого веера; 5 — прости-
рание слоистости осадочных пород перед фронтом чешуйчатого веера; 6 — границы неогавтохтона

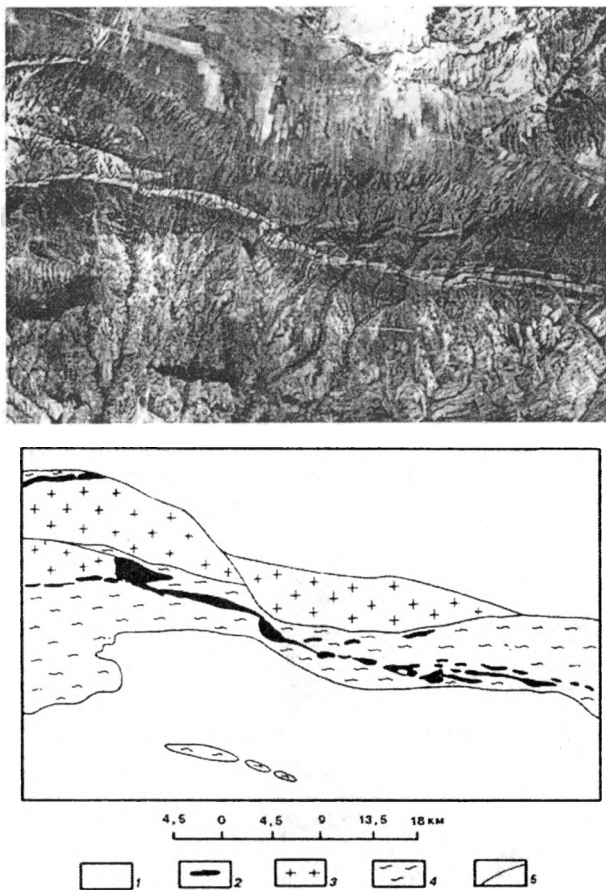


Рис. 6.13. Космический снимок и схема его дешифрирования.
Центральная часть хр. Юж. Нуратау (по Е. С. Кутейникову
и Н. С. Кутейниковой):

1 — рыхлые мезозойские и кайнозойские отложения; 2-3 — дуплексы, сложенные:
2 — карбонатными породами, 3 — гранитоидами; 4 — терригенные породы; 5 — гра-
ницы различных по составу пород

Морфология, структурный рисунок разрывов на материалах дистанционных съемок помогают определить кинематику и гео-

динамические условия их формирования, но для уверенного суждения о кинематике разломов необходим анализ геологических данных. Определение относительного возраста разрывов, которое устанавливается по смещению разломов одной системы разломами другого направления, равно как и амплитуды смещения, только по снимкам приводит часто к серьезным ошибкам. Такие определения могут выполняться лишь при комплексном геолого-геофизическом анализе результатов дешифрирования.

Наиболее распространенной реакцией экзогенных процессов на развивающиеся разрывные нарушения является их селективная эрозия ручьями и речками. Новейшее развитие разрыва можно определить по деформациям ими денудационных и аккумулятивных форм рельефа и покрова новейших отложений. Наиболее уверенно дешифрируются разрывные нарушения, являющиеся границами контрастно и разнонаправленно развивающихся структур; вертикальная компонента смещения устанавливается по наличию эрозионно-тектонического уступа вдоль линии разрыва, увеличению расчлененности в поднятом крыле, изменению строения речных и троговых долин, характера меандрирования русла и др. Многие разломы, выходящие на современный денудационный срез, являются унаследованными от древних, но кинематика их нередко меняется в соответствии с новыми полями тектонических напряжений. Изменение движения по разломам может происходить и в течение неотектонического этапа. Четкость проявления разлома на снимке и в рельефе является обычно признаком активных движений по нему в позднем плейстоцене-голоцене.

Региональные разломы. Зоны разломов, глубинные разломы, выведенные на современный денудационный срез, представляют собой сложные системы примерно однонаправленных одиночных разломов, выраженность которых в пределах зоны может меняться по простиранию. При региональных деформациях формируются транспрессионные (сдвигосжатия) и транстенсионные (сдвигорастяжения) зоны. Региональные сдвиги на космических снимках отличаются кулисообразным сочленением соседних звеньев сдвигов, напоминающим черепицу.

Примеры выраженности разломов на МДЗ приведены на рис. 6.14 и 6.15.

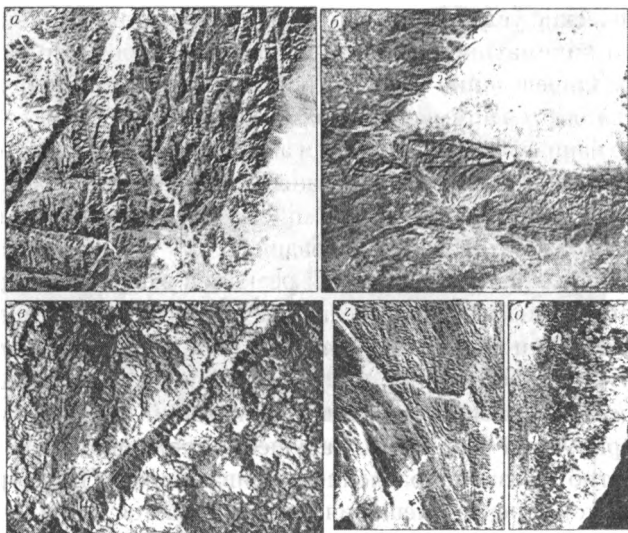


Рис. 6.14. Разломы на космических снимках:

а — зона разлома, Израиль; **б** — разломы Сан-Андреас (1) и Герлок (2), США; **в** — региональный сброс, Йемен, **г** — линеамент Пуррос, Намибия, **д** — Центральный Сихотэ-Алинский разлом (1), РФ

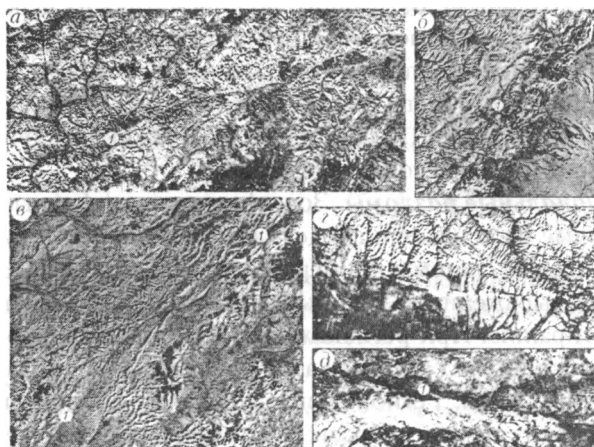


Рис. 6.15. Разломы (1) на космических снимках:

а — Анадырский; **б** — Джугджурский (вдоль побережья Охотского моря); **в** — Вывенский, Корякия; **г** — Сордогинский, Верхоянье; **д** — Джалаир-Найманский, Казахстан

6.2. ЛИНЕАМЕНТЫ

Понятие «линеament». Линейные объекты дешифрирования на МДЗ называются *линеаментами* (от лат. *lineament* — линия, черта). Этот термин ввел американский геолог В. Хоббс в начале XX в. (1904, 1911) для обозначения вытянутых в одном направлении форм рельефа (горных массивов, речных долин, морских берегов) и элементов геологической структуры, необязательно связанных с тектоническими разрывами и смещениями по ним. Д. И. Мушкетов использовал этот термин для сейсмотектонических дислокаций Средней Азии (1911). Г. Штилле составил схему кардинальных линеamentов Европы (в русском издании в 1964 г.). Крупнейшие, глобального ранга зоны разломов Е. Хиллс (1967) называл мегалинеаментами. Со временем термин «линеament» стал синонимом глубинного разлома и потерял актуальность. С появлением *космических снимков* произошло его «второе рождение». Изучению линеamentов посвящено много работ (В. И. Макаров, В. И. Башилов, В. А. Буш, А. И. Полетаев и др.); появилось новое направление в геологии — линеamentная тектоника.

В настоящее время под линеаментами понимаются линейные или слабодугообразные неоднородности земной коры и литосферы разного ранга, протяженности, глубины и возраста заложения, которые проявлены на земной поверхности прямо (разломами) или опосредованно — геологическими и ландшафтными аномалиями.

Механизмы передачи информации о глубинной структуре на космических снимках. Особенно много линеamentов было выделено на космических снимках платформенных областей, где осадочный чехол слабо деформирован, а известных по геологическим данным разломов несравненно меньше. Только часть линеamentов отражает тектоническую делимость верхних горизонтов земной коры и связана с конкретными разрывами, проявленными на поверхности. Но многие линеamentы не связаны с разломами, выведенными на земную поверхность, а являются следом *погребенных разломов* фундамента, *флексурных и трещинных зон* осадочного чехла.

Проявление этих деформаций в рельефе и на космических снимках объясняется тем, что процессы, происходящие на разных глубинных уровнях литосферы, воздействуют на вышележащие слои, передавая тепловой, флюидно-газовый потоки и механические

деформации, предопределяя особенности рельефа, геологического строения субстрата и почвенно-растительного покрова (рис. 6.16).

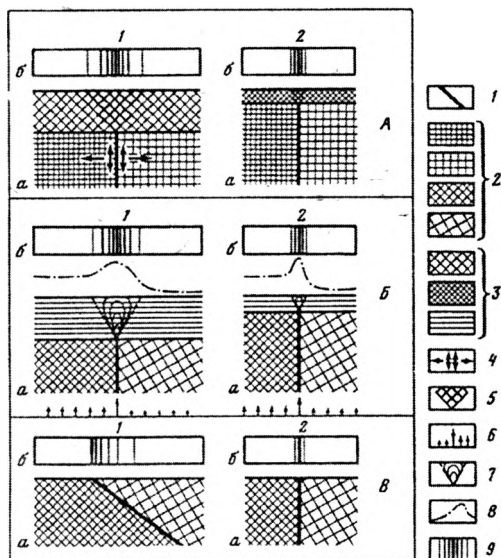


Рис. 6.16. Принципиальная схема положения разломов в разрезе литосферы и их отражения на земной поверхности и космических снимках в виде линеаментов (по В. И. Макарову):

А, Б — скрытые (не достигшие земной поверхности) разломы, прерывающиеся в качестве таковых на больших (1) и меньших (2) глубинах, в разрезе земной коры (а) и в плане на космических снимках (б); В — открытые (достигшие земной поверхности) разломы с наклонным (1) и вертикальным (2) положением плоскости (зоны) смещения, в разрезе (а) и в плане на космическом изображении (б); 1 — разломы; 2 — блоки земной коры, разделенные разломами; 3 — слои земной коры, не затронутые непосредственно разломами; 4 — возможные варианты механических смещений по разломам; 5 — конус рассеяния механических деформаций; 6 — неравномерный восходящий поток глубинных флюидов, газов, тепла; 7 — конус рассеяния потока флюидов, газов, тепла; 8 — условная кривая теплового потока над зоной разлома; 9 — условная интенсивность аномалий на дневной поверхности, связанных с разломами и определяющих яркость и морфологию линеаментов на космических изображениях

Над разломами фундамента в осадочном чехле возникают зоны повышенной трещиноватости даже при слабой их активизации в неоген-четвертичное время. При этом они становятся проникае-

мыми для флюидов (водорода, гелия и пр.) (рис. 6.17). Фильтрация флюидов по зонам повышенной трещиноватости чехла может происходить под действием литостатического давления и может быть пассивной, но может происходить активно, если флюид находится под аномальным сверхвысоким давлением. В обстановке гидроразрыва в чехле создаются многочисленные трещины, локализованные в узкой зоне, которые в первую очередь и разрабатываются экзогенными процессами. На земной поверхности возникают протяженные прямолинейные участки речных долин, зоны повышенной увлажненности и пр., проявленные линеаментами на МДЗ.

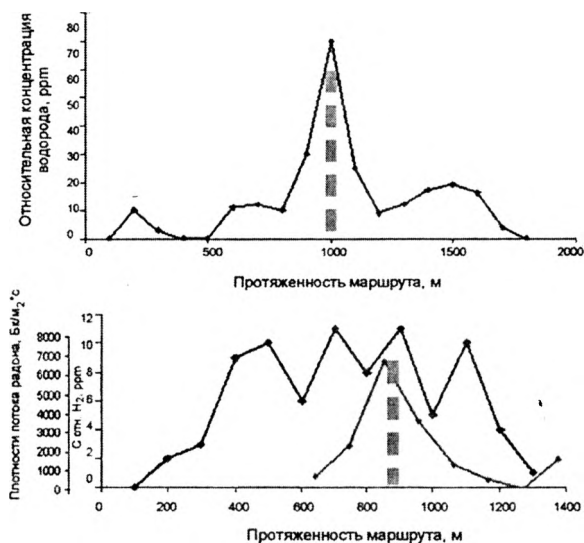


Рис. 6.17. Повышение относительной концентрации водорода (верхний график) и плотность потока радона (нижний график) над линеаментами (пунктирные вертикальные линии). Район Ивановского водохранилища (по О. В. Анисимовой)

Вклад в образование линеаментов вносят приливные силы Луны и Солнца и связанные с ними, хотя и незначительные, изменения скорости вращения Земли, которые обуславливают разрядку напряжений и «раскачивание» блоков фундамента, разделенных разломами. Еще большее влияние на эти процессы оказывает ротационный

режим планеты, создающий постоянную неравномерную микро-вибрацию блоков, отличающихся размерами и петрофизическими свойствами. Образованию зон повышенной трещиноватости в породах чехла способствует также разная реакция блоков фундамента на напряжения, связанные с перемещением литосферных плит, а также с покровными оледенениями. Все эти факторы приводят к образованию зон повышенной трещиноватости над разломами фундамента, которые, как слабые зоны, прежде всего разрабатываются экзогенными процессами, создавая линейные ландшафтные аномалии. Линеаменты выражены формой и ориентировкой геологических и геоморфологических объектов, а также особенностями строения геофизических полей.

Дешифрируемость их определяется многими условиями: масштабами МДЗ, сезонами и видами проведения съемочных работ, геологическим строением и ландшафтно-климатическими условиями территории и пр. Линеаменты проявляются на космических снимках, которые обладают обзорностью и генерализацией изображения, когда отдельные детали геологического и геоморфологического строения обобщаются, собираются в единый дистанционный образ.

Выражение линеаментов на снимках и в рельефе. На материалах дистанционных съемок линеаменты образуют линейные тоновые (или цветные) аномалии различной ширины и выраженности или являются границами между различными природно-территориальными комплексами. Зоны линеаментов представляют собой сложные образования, обычно с неявными, «размытыми» границами. Встречаются системы (рои) коротких сближенных субпараллельных линеаментов. Еще более сложно построены и значительно более широкие (до первых сотен километров) линеаментные пояса, которые обнаруживаются на снимках с низким пространственным разрешением.

В рельефе линеаменты образуют закономерно ориентированные зоны линейных понижений в рельефе, прямолинейных границ озер и крупных болот, спрямленных участков речных и ледниковых долин, просадок различного генезиса (карстовых, суффозионных, термокарстовых), разгрузки подземных вод и развития влаголюбивой растительности в аридных районах, уступов, обрывов на склонах горных массивов и седловин на водоразделах и др. Ширина

таких зон составляет от первых до десятков километров. Поэтому на аэрофотоснимках и при наземных наблюдениях линеаменты обнаруживаются с трудом. На КС они получают отражение благодаря обзорности и генерализации изображения. Четкость их проявления и ширина линейной аномалии зависят от глубины заложения разлома (мощности перекрывающих образований) и его активности. Чем ближе от земной поверхности расположен погребенный разлом и выше его тектоническая активность (вертикальные и/или горизонтальные перемещения по разлому), тем он четче проявлен на КС.

Визуальное дешифрирование линеаментов ведется через ландшафтные индикаторы: геоморфологические, почвенно-растительные, гидрогеологические, отражающие границы изменения параметров географической среды и геологической структуры. На КС локального и детального уровней генерализации в геологически закрытых районах дешифрируются мелкие элементы ландшафта, которые при наземных исследованиях нередко не наблюдаются. Анализ ландшафтно-индикационных схем, составленных по МДЗ, позволяет выделять различно ориентированные блоки с разными уклонами поверхности, ограниченные линеаменами, которые по геолого-геофизическим данным коррелируются с разломами (рис. 6.18).

Классификации линеаментов. Предложены классификации линеаментов по протяженности и по соотношению со структурой земной коры.

По протяженности выделяют глобальные, трансконтинентальные (рис. 6.19), трансрегиональные, региональные и локальные линеаменты. Выраженность их на КС различна. Они формируют либо узкие четкие линии, либо линейные зоны с внутренней структурой, либо широкие пояса, состоящие из протяженных линеаментных зон. Поэтому уровень генерализации КС имеет значение при изучении линеаментов разных рангов и глубины заложения.

Глобальные линеаменты прослеживаются через все океаны и материки. Таковым является Экваториальный линеамент, выделенный впервые Д. К. Краузе под названием «Экваториальной сдвиговой зоны». А. В. Авдонин и Е. А. Долгинов, проанализировавшие геологические и геофизические данные, пришли к выводу, что Экваториальный линеамент является не только разломно-деформационной структурой, обусловленной ротационными силами, но

также границей между обширными тектоническими провинциями океанов и континентов. Этот линеамент разграничивает Северное «материковое» и Южное «океаническое» полушария, которые являются крупнейшими латеральными неоднородностями планеты, отличающимися фундаментальными особенностями глубинного строения. Глобальное значение имеют также линеаменты, опоясывающие Землю по широте 40° севера и юга. Северный из них, проходящий большей частью по материкам, имеет наиболее надежные геологические и геофизические доказательства.

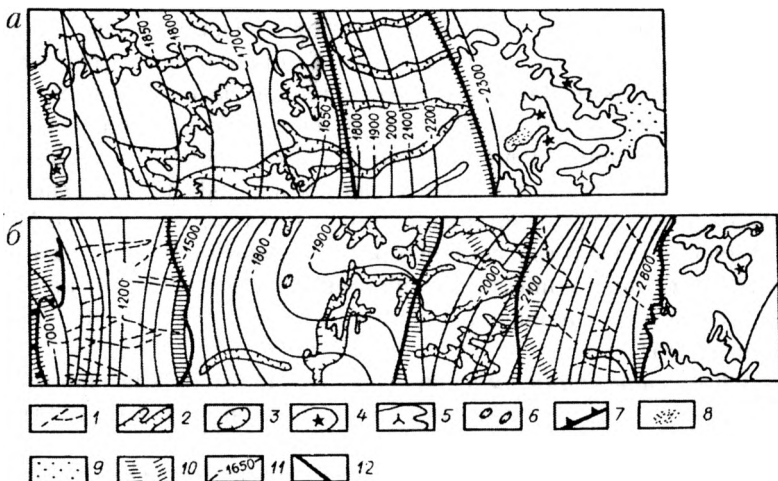


Рис. 6.18. Примеры ландшафтно-индикационного дешифрирования крупномасштабных космических снимков: *а* — южного склона Актумского поднятия Устьюрта; *б* — северного склона Южно-Мангышлакского прогиба (по Л. И. Соловьевой, Г. С. Бурлаковой, Ю. А. Лион):

1 — русла временных и слабоврезанных водотоков; 2 — долинообразные понижения; 3 — береговая линия спущенных озер; 4 — такыры; 5 — затакыренные участки; 6 — карстовые котловины; 7 — уступ плато (чинк); 8 — валиковые такыры; 9 — пески; 10 — линейные группировки макроэлементов ландшафта; 11 — изогипсы опорных отражающих горизонтов чехла (м); 12 — разломы, известные по геолого-геофизическим данным, совпадающие с границами структурно-обусловленных комплексов ландшафта, различающихся разнонаправленностью экзогенных процессов

Трансконтинентальные структуры Евразии, пересекая континент, выходят в области с океанической и промежуточного типа

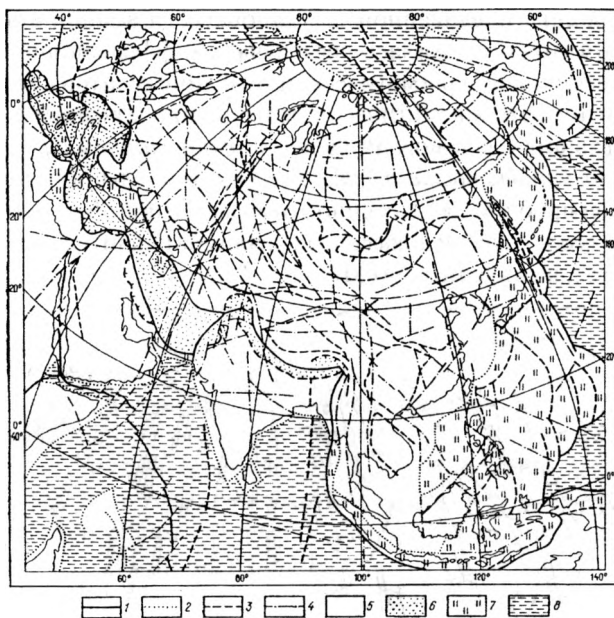


Рис. 6.19. Система трансконтинентальных разломов Евразийского материка и окружающих его пространств (по В. А. Бушу и др.):

1 — граничные разломы современных литосферных плит; границы древних литосферных плит; 2 — граничные разломы первого ранга, опоясывающие мегаблоки континентальной коры; 3 — граничные разломы второго ранга внутри континентальной коры; 4 — трансконтинентальные разломы; 5 — земная кора континентального типа; 6 — переходная земная кора Средиземноморского складчатого пояса; 7 — переходная земная кора Тихоокеанского складчатого пояса; 8 — океаническая земная кора

земной корой. Трансконтинентальные линеаментные зоны образуют четко выраженные системы: ортогональную (меридионально-широтную) и диагональные (северо-западного и северо-восточного простирания), закономерно ориентированные относительно вращения Земли (рис. 6.20). Эти направления одинаково свойственны как горно-складчатым, так и смежным с ними платформенным областям. Эта так называемая *планетарная трещиноватость* обусловлена ротационными напряжениями неравномерно вращающейся Земли и действием на нее приливных сил Луны и Солнца. Но единого мнения о конкретных причинах возникновения рег-

матической сети повышенной трещиноватости земной коры нет. Считается, что она заложилась еще в начале дифференциации литосферы, а устойчивость регматической сети линеаментов во времени объясняют тем, что энергетически более выгодна реанимация уже существовавших разломов. Разделение *планетарной трещиноватости* и *трещиноватости тектонической природы* остается пока нерешенной проблемой. Особенно это касается платформенных областей, где геологически доказанных разломов значительно меньше линеаментов, выявленных по МДЗ.

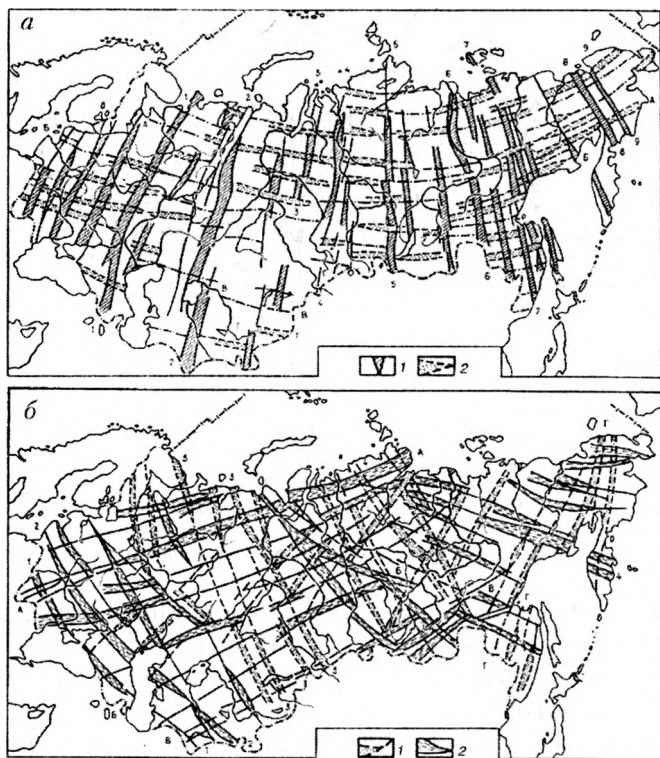


Рис. 6.20. Схемы размещения основных зон линеаментов на территории СССР (по В. А. Бушу и др.):

a — ортогональной системы: 1 — меридиональные, 2 — широтные; *б* — диагональной системы: 1 — север-северо-западные и север-северо-восточные, 2 — запад-северо-западные и восток-северо-восточные

Меридиональные зоны линеаментов образуют равномерную сеть с регулярным шагом $5-7^\circ$, расходящуюся к югу. Наиболее достоверно подтверждены геолого-геофизическими данными линеаменты Урало-Оманского пояса (2-2), Енисейской зоны (4-4) и Верхоянской зоны (6-6 и 7-7), образующие меридиональные ограничения древних платформ. Протяженность линеаментов ортогональной системы тысячи, а ширина 50-300 км. Широтные линеаменты уже меридиональных, прерывистые, расстояния между ними 250-300 км. Самым протяженным из субширотных трансконтинентальных линеаментов северной части Евразийского континента является Охотско-Московский (Б-Б). Среди диагональных систем линеаментов более распространены северо-западные, самой значимой из которых является Баренцевоморско-Тайваньская (3-3), простирающаяся в Тихий океан. Эта зона четко выражена в физических полях. Из северо-восточных систем линеаментов наиболее значительной является Балеарско-Котласская (А-А). Линеаменты диагональной системы в целом протяженнее, чем ортогональные, нередко дискретны. Ширина их изменяется от тысячи до 20-25 км.

В зависимости от соотношения со структурой земной коры линеаменты разделяют на *граничные и секущие*.

Граничные линеаменты проявлены на снимках с наибольшей выразительностью. Обычно они являются разломными границами блоков земной коры разного порядка. Самые значительные из них — системы разрывов, разделяющие основные геоструктурные области: складчатые пояса (например, в Евразии Средиземноморский, Урало-Монгольский, Тихоокеанский) и основные платформенные области (Восточно-Европейская, Сибирская, Индийская древние платформы). Менее протяженные линеаменты разделяют геоструктурные регионы (щиты платформ, плиты, складчатые системы). В пределах каждого региона устанавливается устойчивая связь линеаментов с внутренним строением верхних горизонтов земной коры.

Секущие линеаменты пересекают территории с различным геологическим строением и историей развития. Обычно они выглядят на снимках как полосовые аномалии, четкие в горно-складчатых областях и с неявными, расплывчатыми границами в пределах платформенных равнин. Эти секущие структуры проявлены на поверхности в виде зон концентрации трещин и разрывов, в изменении морфологии горно-складчатых систем, горных поясов и отдельных

форм рельефа, в смещении систем покровно-складчатых структур, замыкании, виргации зон новейших поднятий и прогибаний, в изменении высоты хребтов, сегментации, прерывистости, четковидности систем хребтов и горных впадин (рис. 6.21, 6.22).

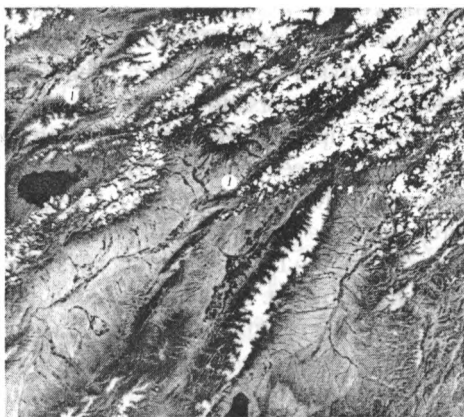


Рис. 6.21. Секущий линеймент (1), отражающий глубинную флексурно-разрывную зону. Тянь-Шань. КС

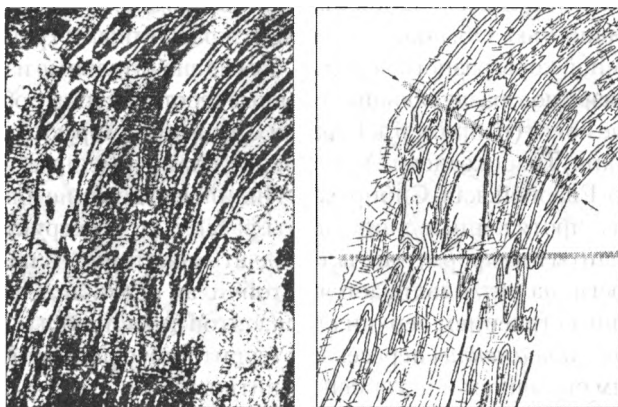


Рис. 6.22. Космический снимок Landsat и структурная схема района Аппалачских гор (по П. Кронбергу)

Складчатую структуру, осложненную продольными надвигами, секут линейменты, которые проявлены изменениями азимута простирания и рисунка складок

Установлено, что чем выше уровень генерализации и ниже пространственное разрешение КС, тем более глубинные структуры изображаются на них.

Считается, что секущие линеаменты нередко отражают позднекайнозойскую (новейшую) стадию развития земной коры. На неотектоническую активность линеаментов обратили внимание В. И. Макаров и Л. И. Соловьева, показав единство структурного плана неотектонических деформаций Тянь-Шаня и смежных районов Туранской плиты. Молодость линеаментов подтверждается их широким распространением на платформах. Многочисленные линеаменты дешифрируются в пределах плит платформенных областей, где покров мезозойско-кайнозойских отложений слабо деформирован. Несмотря на равнинный рельеф и нередко значительную антропогенную нарушенность ландшафта, линеаменты установлены на Русской плите, в Западной Сибири, равнинном Крыму и во многих других платформенных регионах (рис. 6.23, 6.24).

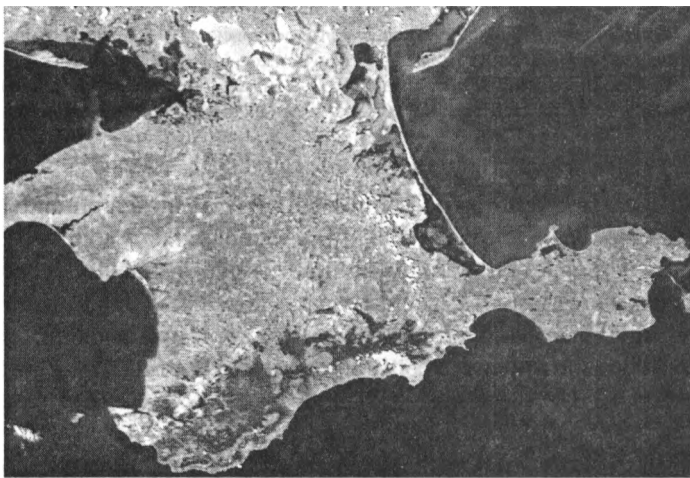


Рис. 6.23. Космический снимок Крымского полуострова. Молодая эпипалеозойская платформа, занимающая большую часть полуострова, характеризуется равнинным рельефом, который интенсивно нарушен антропогенной деятельностью. Горный Крым (южная часть снимка) отличается темным тоном

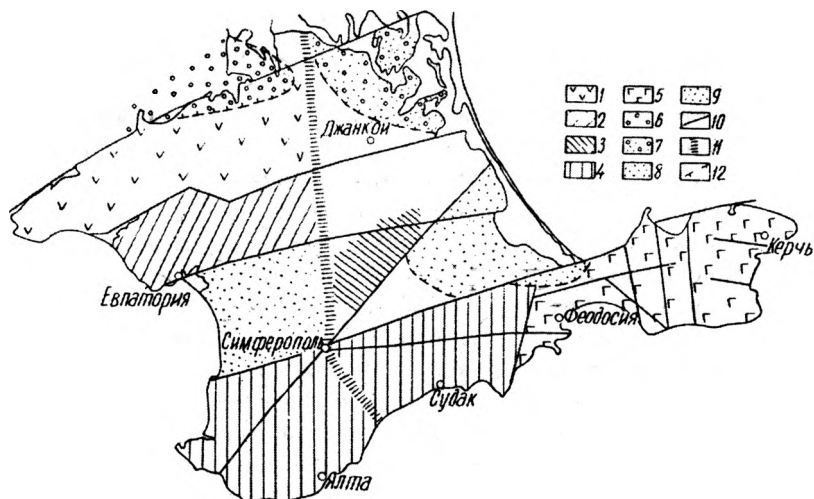


Рис. 6.24. Схема дешифрирования новейших структур Крыма (по А. Г. Рябухину, В. И. Макарову, Н. В. Макаровой).

Новейшие поднятия: 1 — Тарханкутское, 2 — Новоселовское, 3 — Симферопольское, Новоцарицынское, 4 — Горного Крыма, 5 — Керченское. Новейшие прогибы: 6 — Сивашский, 7 — Каркинитский, 8 — Альминский, 9 — Индоло-Кубанский; 10 — основные линеаменты; 11 — зона Центральнокрымского линеамента; 12 — предполагаемые границы структур

Таким образом, понятие «линеамент» не является синонимом разлома. Оно более широкое и включает, кроме разломов, которые выведены на современный денудационный срез, также погребенные разломы фундамента, флексурно-трещинные зоны осадочного чехла — линейные неоднородности земной коры и, возможно, более глубоких горизонтов литосферы, которые создают на МДЗ линейные аномалии изображения.

6.3. АНАЛИЗ ЛИНЕАМЕНТНЫХ ПОЛЕЙ

На материалах дистанционного зондирования проявляется интегральный образ разновозрастных и разноглубинных линейных структур. Линеаментный рисунок на МДЗ создается, во-первых,

разрывами разных рангов, которые выведены на современный денудационный и среди которых присутствуют как активные на новейшем и современном этапах, так и пассивные, отпрепарированные процессами денудации. Во-вторых, погребенными разломами фундамента и трещинными зонами осадочного чехла, которые отражены в элементах ландшафта линейными аномалиями. Конечно, как прямолинейные выглядят на МДЗ некоторые антропогенные объекты — дороги, линии ЛЭП, просеки и т. п., которые отбраковываются экспертом в процессе дешифрирования.

С появлением компьютерных программ автоматизированной обработки материалов дистанционного зондирования, рельефа, геофизических, геохимических полей под линеаментами часто стали понимать линейные зоны резкого изменения значений (градиенты) и оси линейных аномалий обрабатываемого поля, независимо от их происхождения.

При компьютерной обработке и проведении формализованных компьютерных преобразований (фильтрация, автоматический линеаментный анализ, классификация) выделение линеаментов осуществляется только по особенностям поля спектральной яркости. В частности, при анализе систем градиентов спектральной яркости по «зонам потери корреляции» четко выявляются поперечные по отношению к генеральному простиранию градиентов линеаменты; сгущения градиентов одного направления могут соответствовать зонам разломов. Результаты обработки представляются в виде карт в изолиниях, что облегчает их восприятие и дальнейший анализ.

Наиболее популярными видами обработки линеаментного поля являются:

- а) выделение линеаментов доминирующих простираний, в том числе с визуализацией в виде роз-диаграмм и гистограмм (рис. 6.25);
- б) выявление участков повышенной плотности линеаментов определенного направления (рис. 6.26) и узлов пересечений линеаментов разного порядка;
- в) оконтуривание участков с повышенной неоднородностью линеаментов по их направлению, длине и количеству и др.

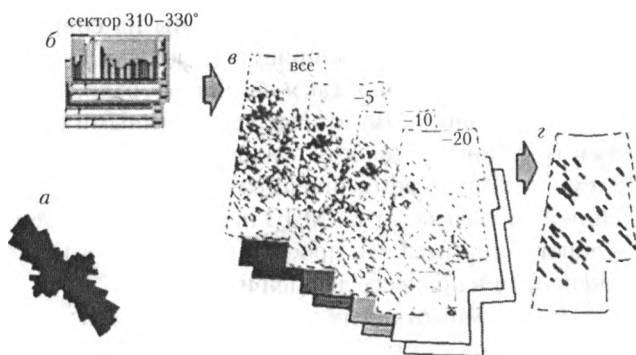


Рис. 6.25. Выделение зон повышенной плотности линеаментов из схемы дешифрирования КС Modis. Западная Якутия:

а — розы-диаграммы простираний всех линеаментов; **б** — выбор секторов фильтрации на гистограммах; **в** — варианты фильтрации линеаментов; **г** — варианты расчета плотности линеаментов заданных простираний

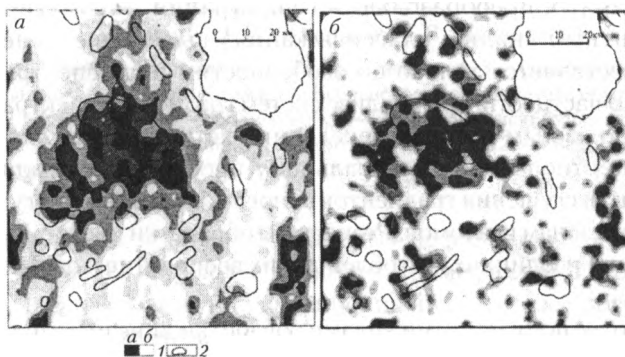


Рис. 6.26. Плотность линеаментов: **а** — всех направлений, **б** — по направлениям 55-65° и 145-155°, выделенных в автоматическом режиме по КС «Ресурс-Ф» (по И. О. Смирновой, А. А. Русановой, К. Л. Липияйнен):

1 — плотность линеаментов: максимальная (д), минимальная (б); **2** — контуры нефтегазоносных структур

Одной из известных компьютерных программ обработки линеаментных полей является программа Lessa, включенная в ERDAS и позволяющая анализировать закономерности в организации

линейных элементов дистанционных данных, а также схемы визуального экспертного дешифрирования линеаментов, схемы гидросети и т. д. Можно получать изображения (цифровые поля), которые показывают плотности штрихов различного направления, рассчитанные в окрестности каждой точки изучаемой территории, а также поля, отражающие обобщенные характеристики роз-диаграмм, такие как степень вытянутости (рис. 6.27), крестообразность, отличие от окружающих и др.

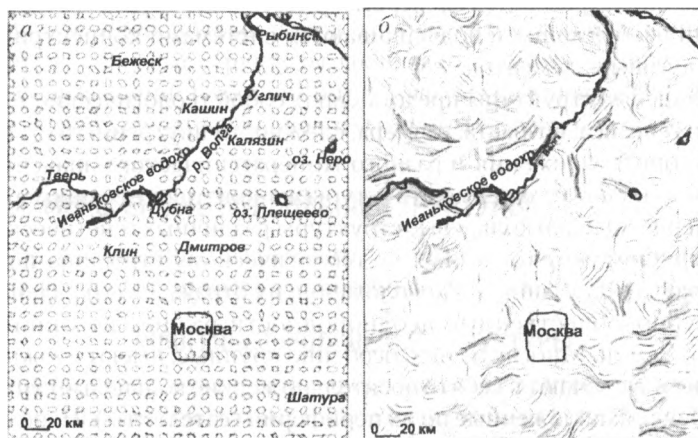


Рис. 6.27. Компьютерное дешифрирование космического снимка Landsat в программе Lessa (по О. В. Анисимовой):

а — розы-диаграммы; *б* — линии вытянутости

Глава 7

КОЛЬЦЕВЫЕ СТРУКТУРЫ

Понятие «кольцевые структуры» несколько условное. Оно объединяет образования овальной, концентрической, правильной круговой формы, часто с незамкнутыми ограничениями, состоящие из отдельных дуг и колец, но в совокупности создающие дистанционный образ кольцевой структуры. Кольцевые структуры иначе называют изометричными, концентрическими, центрального

типа, ринг-структурами и др. Такие структуры известны давно, но с появлением космических снимков они стали предметом особого внимания геологов. Большой интерес к ним вызван не столько тем, что благодаря космическим снимкам кольцевые структуры стали устанавливаться повсеместно, а главным образом потому, что более чем к 70 % из них приурочены различные виды полезных ископаемых. Выявляются кольцевые структуры различными методами: геологической съемкой, геоморфологическими, геофизическими. На МДЗ они выражаются спектрометрическими аномалиями и рисунками изображения и подчеркиваются системами концентрических и дуговых элементов.

Кольцевые структуры представляют собой геологические тела разного генезиса, возраста, размера, сложности внутреннего строения, глубины заложения и разного минерагенического значения. Распространены кольцевые структуры на континентах примерно равномерно. Однако кольцевые структуры различных генетических типов группируются в разных по геологическому строению и истории развития регионах. Расположение их отражает латеральные структурно-вещественные неоднородности разных глубинных уровней Земли. Многие из них, особенно крупные, имеют сложное строение и включают в себя относительно мелкие кольцевые структуры, чаще расположенные по их периферии (сателлиты). Нередко кольцевые структуры вытянуты вдоль разломов или приурочены к узлам пересечения линейных структур.

По строению кольцевые структуры бывают простые (монокольцевые), концентрические (поликольцевые), радиально-концентрические. Геометрический центр элементов кольцевых структур может быть один (моноцентрические) или состоять из нескольких (полицентрические). Он может располагаться в стороне от середины диаметра структуры (эксцентрические). По отношению к структурам вмещающего геологического пространства (рамы) кольцевые структуры бывают конформные и дисконформные.

Размеры кольцевых структур — от десятков километров до многих сотен и первых тысяч километров в поперечнике. Крупнейшие из них, обусловленные мантийными диапирами и нуклеары, имеют в поперечнике до 1000 км и более. Минимальные размеры кольцевых структур составляют первые десятки метров.

Наиболее полные классификации кольцевых структур и их характеристики приведены в работах В. А. Буша и Я. Г. Каца, А. И. Полетаева, Е. Д. Сулиди-Кондратьева, а также в монографии «Кольцевые структуры континентов Земли». Общепринятая генетическая классификация включает моногенные кольцевые структуры, образованные под влиянием одного ведущего геологического процесса, и сложные полигенные кольцевые образования. Чем меньше размер кольцевых структур, тем более однороден их состав (например, кимберлитовые трубки, массивы щелочных гранитов, щелочно-ультраосновных пород, карбонатитов, соляные купола). Крупные кольцевые структуры заключают в своих границах комплексы образований различного генезиса, состава и возраста, в том числе и транзитные по отношению к самим структурам.

7.1. МОНОГЕННЫЕ КОЛЬЦЕВЫЕ СТРУКТУРЫ

Среди моногенных различаются эндогенные, экзогенные, антропогенные (техногенные) и космогенные кольцевые структуры.

ЭНДОГЕННЫЕ КОЛЬЦЕВЫЕ СТРУКТУРЫ

Эндогенные структуры могут быть образованы тектоническими движениями (тектоногенные), магматической деятельностью (магматогенные) и разнообразными эндогенными процессами, которые сопровождаются изменениями ранее существовавших горных пород и образованием новых (метаморфогенные).

Тектоногенные кольцевые структуры широко развиты на всех континентах в пределах плит древних и молодых платформ (рис. 7.1-7.2, XI на цветной вклейке). По способу проявления тектонических движений кольцевые структуры могут быть связаны с дислокациями изгиба (пликативные), с разрывными дислокациями (дизъюнктивные) или с явлениями диапиризма (инъективные). Образование большинства кольцевых структур тектонического генезиса связано с поднятиями и опусканиями кристаллического фундамента, которые в осадочном чехле отражаются в виде округлых поднятий и прогибов. Тектонические кольцевые структуры бывают положительными, отрицательными, сложными и нейтральными. Среди отрицательных форм преобладают структуры диаметром в первые сотни километров, среди положительных — в первые де-

сятки километров, а среди структур диаметром от многих десятков до 150 км отмечено примерно равное количество положительных и отрицательных форм. Положительные структуры представлены антеклизмами, сводами, куполами. Некоторые из них обусловлены изостатическим всплыванием относительно легких гранитоидных массивов среди вмещающих пород субстрата и деформацией перекрывающих осадочных толщ, создающих дистанционный образ кольцевой структуры (Астраханский свод в Прикаспии, Бузачинский на Туранской плите, Вартовский, Ханты-Мансийский на Западно-Сибирской плите). Отрицательные кольцевые структуры

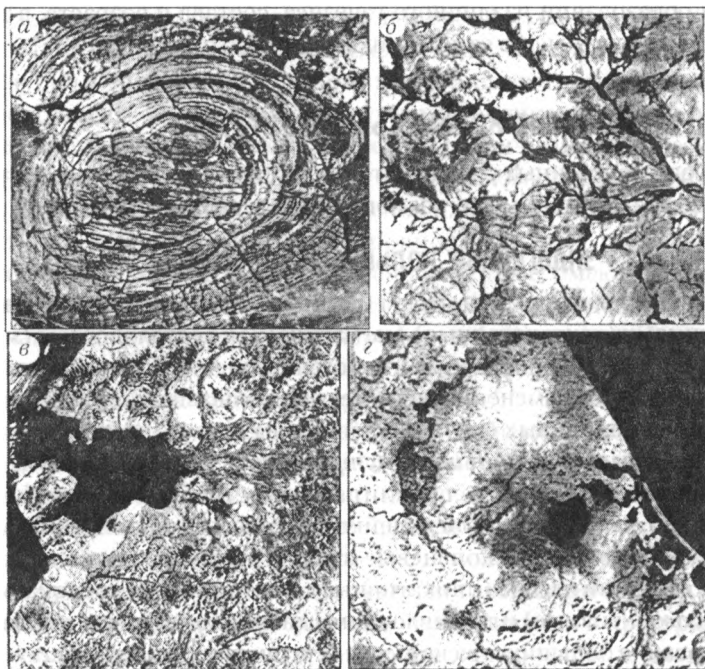


Рис. 7.1 Кольцевые тектоногенные структуры на аэро- (а, б) и космических (в, з) снимках:

а — изометричная синклираль, проявленная на снимке концентрическим рисунком изображения; *б* — изометричное поднятие, проявленное в рисунке эрозионной сети; *в*, *з* — новейшие мульдообразные впадины, проявленные в рельефе: *в* — р-н Чаунской губы, *з* — Анадырский р-н

представлены синеклизами, впадинами, синклиналиями. Крупные структуры поперечником в многие сотни километров все без исключения соответствуют крупным синеклизам, например синеклизы Конго (800 км) и Таудени (1000 км) в Африке.

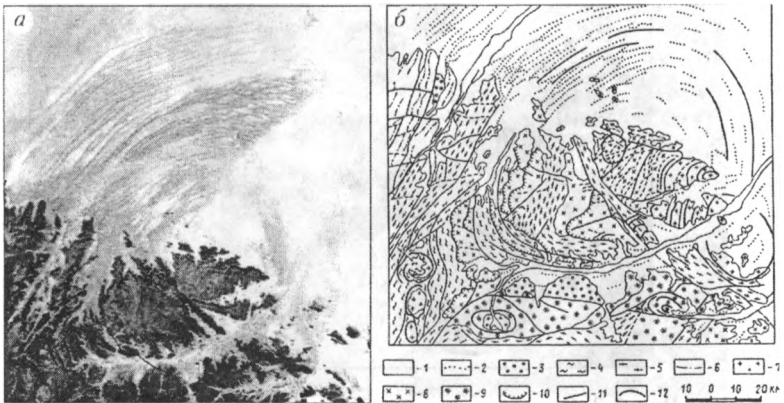


Рис. 7.2. Космический снимок Landsat (а) и геологическая карта (б). Аравийский полуостров. Йемен (по В. А. Бушу):

1 — четвертичные отложения; 2 — простирания песчаных гряд; 3 — нижнеплейстоценовые конгломераты; 4 — верхнепротерозойские зеленосланцевые толщи; 5 — нижнепротерозойские кристаллические сланцы и амфиболиты; 6 — архейские (?) — нижнепротерозойские гнейсы и мигматиты; 7 — посттектонические граносиениты и аляскиты; 8 — синтектонические граниты и гранодиориты; 9 — габбро-диориты и диориты; 10 — поверхности шарьяжей и надвигов; 11 — разломы; 12 — кольцевые структуры и их элементы, не совпадающие с разломами

Инъективные структуры связаны с проявлениями ГЛИНЯНОГО и соляного диапиризма (рис. 7.3, 7.4). Обычно это структуры небольших размеров (первые десятки километров). Они могут быть выведены на поверхность (Эльтон, Баскунчак и др. в Прикаспии, соляные купола Персидского залива) (рис. 7.5), так и погребены ПОД платформенным чехлом (диапиры Северной Германии).

Особую группу образуют вихревые структуры (рис. 7.6, 7.7). Возникновение их объясняется по-разному: горизонтальными тектоническими движениями и поворотами блоков (ротационная гипотеза Ли Сыгуана), напряжениями в земной коре, возникающими под действием неравномерного вращения и приливных сил

Луны и Солнца, и пр. Такие структуры очень похожи на циклоны воздушных масс (рис. 7.8).

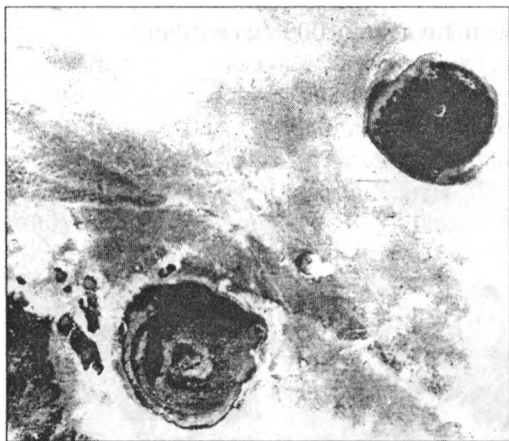


Рис. 7.3. Грязевые вулканы. Туранская плита. АФС

Грифоны потухших грязевых вулканов расположены во впадине, перекрытой четвертичными засоленными и увлажненными суглинками. Один из них — с грязевой «сопкой», другой — с водой

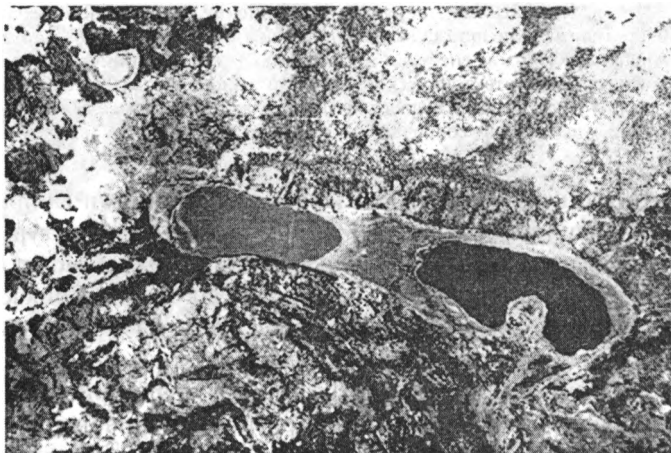


Рис. 7.4. Диапировая складка, к ядру которой приурочено соленое озеро. Виллойская синеклиза. АФС



Рис. 7.5. Соляные купола образуют кольцевые аномалии (с). Юго-западная часть Ирана. КС Landsat

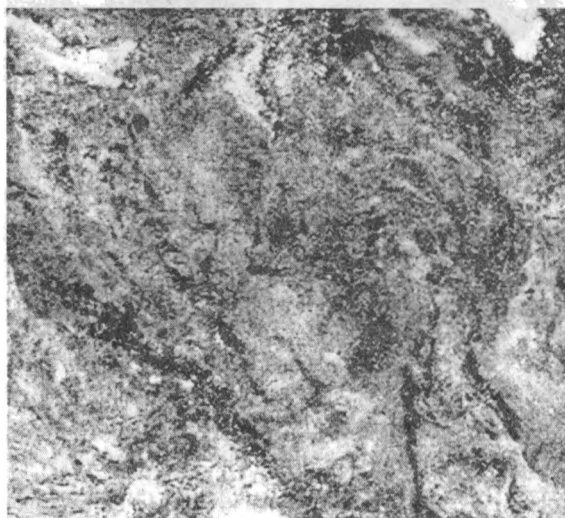


Рис. 7.6. Вихревая структура Иранского нагорья (по С. С. Шульцу)

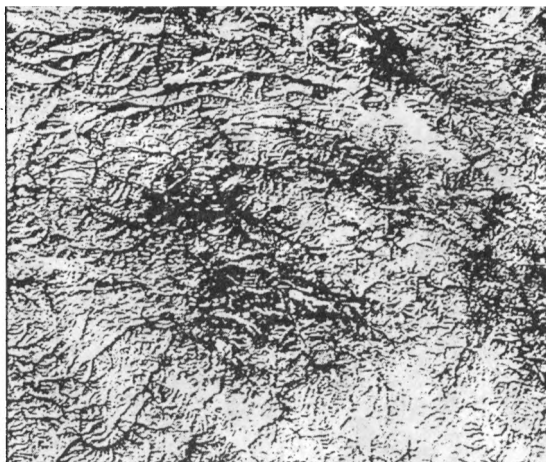


Рис. 7.7. Оймяконская структура предположительно ротационного генезиса. Северо-восток России. Колыма. КС

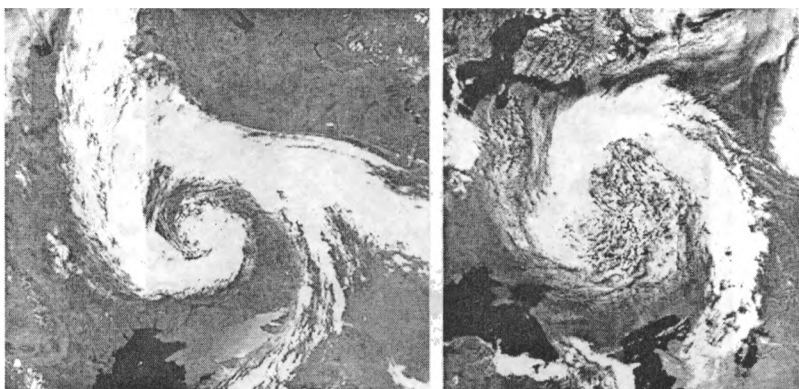


Рис. 7.8. Циклоны над Европой. КС

Магматогенные структуры широко распространены как на платформах, так и в складчатых областях и составляют более половины от всех выявляемых на космических снимках кольцевых структур. Среди них выделяются плутонические и вулканические структуры.

Плутонические структуры — это вскрытые или невскрытые интрузивные тела, проявляющиеся или изменением фототона, или дугообразными концентрическими элементами рельефа. Диаметр их не превышает 200-300 км, преобладают структуры диаметром в десятки до сотни километров. Магматогенные кольцевые структуры генетически могут быть связаны как с подкоровым, так и с коровым магматизмом.

Плутонические структуры, связанные с мантийным магматизмом (внедрением габбро-анортозитовых и щелочно-ультраосновных магм), отличаются крупными (до 200 км) размерами (Бушвельдская в ЮАР, Хибинский и Ловозерские плутоны на Балтийском щите). Возраст такого рода структур — от раннепротерозойского до палеозойского. С внедрением щелочных подкоровых магм, карбонатитов, а также кимберлитов связаны преимущественно микроструктуры размером до 15-20 км. Наряду с небольшими штоками и диатремами известны кольцевые и конические интрузии, расположение которых обычно связано с глубинными разломами (рис. 7.9).



Рис. 7.9. Щелочно-основная интрузия Немакит. Сибирская платформа.
АФС (по Е. С. Кутейникову и др.)

Интрузия представляет собой цилиндрический шток диаметром $\sim 2,5$ км. Округлые пятна в контуре интрузии и за ее пределами — штоки-сателлиты диаметром 250-350 м. Частое чередование вокруг магматического ядра концентрических колец обусловлено крутопадающими слоями осадочных пород разного вещественного состава

Плутонические структуры, связанные с коровым магматизмом, развиты в складчатых поясах различного возраста (Средиземноморский, Верхояно-Чукотский, Северо- и Южно-Американский) и реже встречаются на платформах. Эти структуры образованы гранитоидным плутонизмом и представлены крупными батолитами, имеющими большую вертикальную мощность, изометричными штоками, кольцевыми и коническими интрузиями (рис. 7.10).

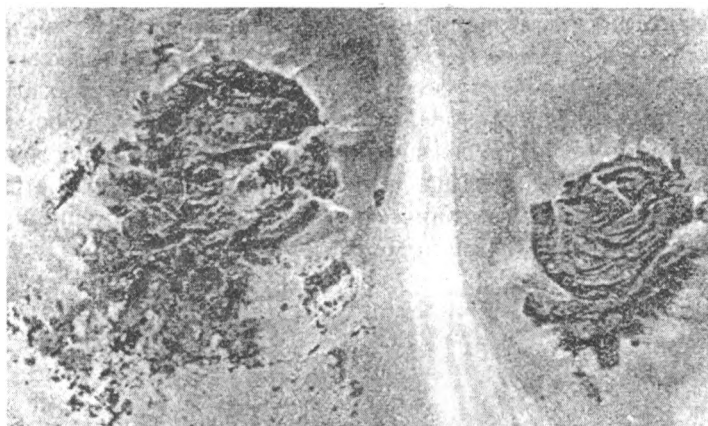


Рис. 7.10. Массивы гранитоидов. Ливия. КС

Границы их на КС могут полностью совпадать с контурами выхода плутона на поверхность или быть больше, включая породы рамы. По взаимоотношениям кольцевых структур с контурами плутонов на их эрозионном срезе выделяются три морфологические разновидности (по В. А. Бушу): эндоплутонические, лежащие целиком внутри эрозионного контура плутона; периплутонические, совпадающие с контурами выхода плутона (за исключением мелких деталей), и экзоплутонические, когда выходы гранитоидов занимают лишь центральную часть структуры. Нередко встречаются кольцевые структуры, где интрузив совсем не вскрыт эрозией, но установлен геофизическими методами. Небольшие интрузивы обычно объединены в крупную кольцевую структуру, отражающую наличие на глубине единого магматического очага.

Вулканические структуры, связанные с коровым магматизмом, имеют разные размеры в поперечнике (преимущественно 50-150 км). Наиболее характерны они для континентальных вулканических поясов (Охотско-Чукотский, Приморский, Катазиатский, Центрального Казахстана, Монголии, Алтае-Саянской области, Центральной Европы и др.) и современных вулканических островных дуг. Пространственно такие вулканические структуры тесно связаны с долгоживущими разломами, обычно располагаясь на их пересечениях, образуя ареалы и узлы. Нередко эти структуры замаскированы молодыми накоплениями, поэтому дешифрирование их требует обязательного привлечения других материалов (геофизических, геологических и пр.). Действующие вулканы и молодые вулканотектонические структуры сосредоточены главным образом в Тихоокеанском и Альпийско-Индонезийском поясах, а также на обширных сводовых поднятиях (рис. 7.11-7.13).

Вулканотектонические структуры представлены положительными обширными поднятиями фундамента поясов или чаще отрицательными структурами. Наиболее типичны среди них вулканические депрессии округлой или овальной формы. Внутренние части таких вулканоструктур испытывают пассивное проседание над опустошающимися магматическими очагами, а внешние контуры их подчеркиваются системой радиальных сбросов. В центральных частях вулканических депрессий группируются вулканические структуры размером от 20-30 до 50-70 км; они могут также располагаться по периферии депрессий, образуя структуры-саттелиты.

Вулканические и вулканоплутонические структуры, связанные с подкоровым магматизмом, характерны для трапповых полей древних платформ (Деканское в Индостане, Тунгусское на Сибирской платформе). Обычно эти структуры имеют диаметр до 100-150 км, иногда они расположены в зонах глубинных разломов. В Сибири установлена приуроченность к ним древних размытых щитовых вулканов и центров излияний, а также корневых зон крупных трапповых силлов.

Метаморфогенные кольцевые структуры представлены гнейсовыми складчатыми овалами и гранитогнейсовыми куполами (по Л. И. Салопу).



Рис. 7.11. Вулканотектонические структуры Южной Камчатки (по результатам дешифрирования среднемасштабных космических снимков) (по Б. В. Ежову и С. Е. Апрелькову)

Отложения: 1 — мезозойские, 2 — вулканы и вулканогенно-осадочные (P_3), 3 — вулканы (N_1), 4 — вулканы ($N_1^3 - N_2$); элементы структуры: 5 — эродированные кальдеры и склоны вулканов ($N_2 - Q_1$); 6 — четвертичные стратовулканы, 7 — рыхлые отложения, 8 — проявления ареального вулканизма, 9 — субвулканические тела, 10 — интрузии гранитоидов (N_1), 11 — разрывные нарушения, 12 — граниты четвертичных вулканотектонических депрессии

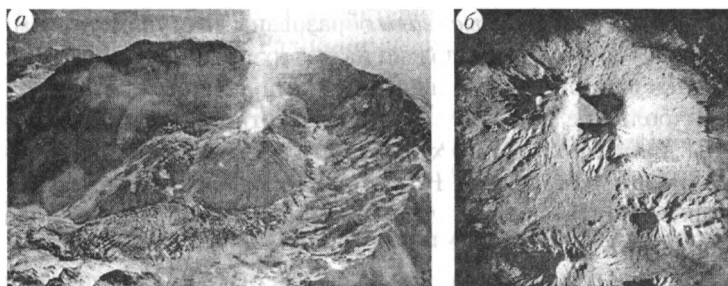


Рис. 7.12. Вулканы: а — АФС перспективный, б — космический снимок (зимний), Камчатка

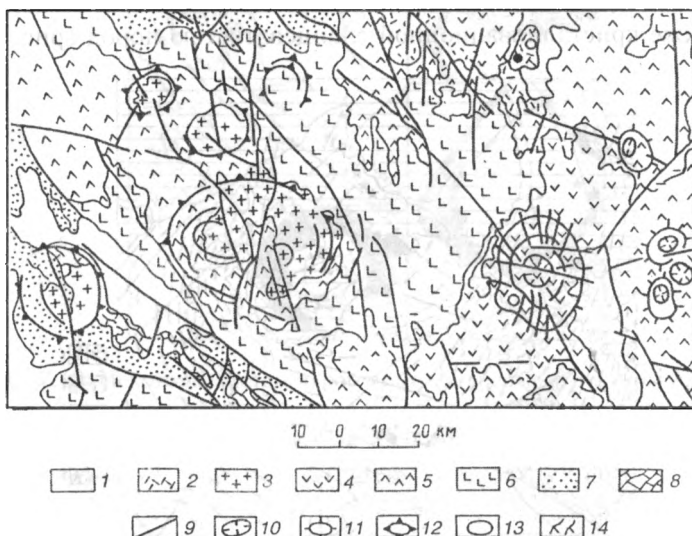


Рис. 7.13. Вулканические и вулканотектонические структуры в западной части Йемена (по В. А. Бушу):

1 — четвертичные осадочные отложения; 2 — четвертичные базальты; 3 — лейкократовые граниты неогена, йеменская «трапповая» серия (эоцен-миоцен); 4 — верхняя трахито-риолитовая толща; 5 — средняя андезитовая толща; 6 — нижняя базальтоидная толща; 7 — песчаники мела; 8 — известняки верхней юры; 9 — разломы; 10 — вулканические кальдерные кольцевые структуры; 11 — вулканокупольные кольцевые структуры (палеовулкан Маабар); 12 — вулканоплутонические кольцевые структуры; 13 — внутренние элементы кольцевых структур; 14 — залегание пород

Гнейсовые складчатые овалы образованы выступами сформировавшейся в архее (4-2,5 млрд лет назад) гранитно-метаморфической оболочки земной коры или фрагментами древних платформ. Они имеют большие размеры (сотни километров) и наиболее характерны для щитов древних платформ (Алданский, Балтийский, Украинский, Канадский). Но во многих случаях обнаружены под платформенным чехлом, где его мощности небольшие (Украина, Белоруссия).

Как правило, гнейсовые складчатые овалы находятся внутри нуклеаров или в виде сателлитов вдоль их внешних краев. Центральная часть гнейсовых складчатых овалов сложена архей-нижнепротерозойскими толщами, имеющими концентрическое строение, подчеркнутое простираниями метаморфических комплексов, а также кристаллизационной сланцеватостью пород (рис. 7.14).

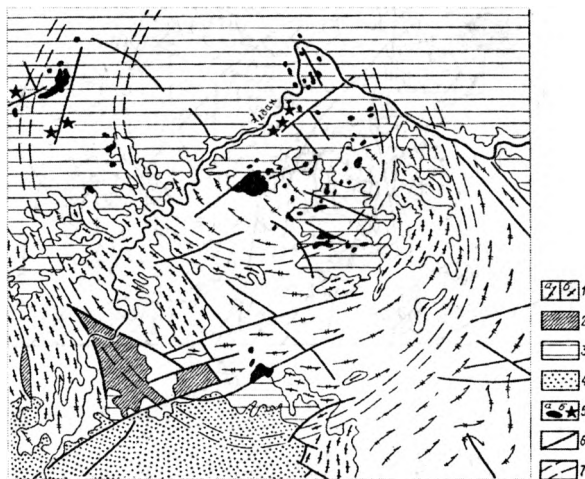


Рис. 7.14. Геолого-структурная схема центральной части Алданского щита (по М. З. Глуховскому):

1 — а — метаморфические образования архея, б — раннедокембрийские граниты; 2 — верхнеархейские-нижнепротерозойские образования трогового комплекса; 3 — платформенный чехол; 4 — юрские угленосные отложения Чульманской впадины; 5 — а — позднелюрские-раннемеловые интрузии, б — мезозойские эруптивные брекчии ультраосновных пород; 6 — разломы; 7 — дешифрируемые на КС дуговые зоны разломов Алданской кольцевой структуры

Их выявлению помогает характерный для них концентрический рисунок речной сети. Радиологический возраст метаморфических пород уменьшается, как правило, от центра к периферии структуры. Поэтому гнейсовые складчатые овалы рассматриваются как древние центры аккумуляции гранитного материала. Они подчиняют своему строению распределение других кольцевых структур.

Складчатые гнейсовые овалы широко развиты на юге Африки (рис. 7.15).

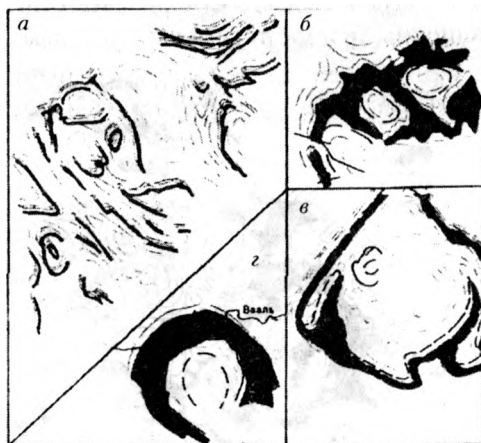


Рис. 7.15. Некоторые метаморфогенные кольцевые структуры Африки в породах докембрия (по Я. Г. Кацу, А. И. Полетаеву, Е. Д. Сулиди-Кондратьеву):

а — Мавритания; *б* — Ангола; *в* — Зимбабве; *г* — ЮАР

Гранитогнейсовые купола (рис. 7.16) связаны с процессами гранитизации и магматического диапиризма, наложенными на более древний субстрат протометаморфической коры. Слагающие их ядро гранитогнейсы и граниты легче вмещающих метаморфических пород и потому всплывают из-под них, когда низы толщи достигают амфиболитовой ступени метаморфизма и подвергаются гранитизации. Среди гранитогнейсовых куполов, кроме архейско-раннепротерозойского возраста, встречаются структуры и более молодого — позднепротерозойского возраста. Известны примеры

мезозойских (на Кубе) и кайнозойских (в Альпах) гранитогнейсовых куполов.

Как гнейсовые складчатые овалы, так и гранитогнейсовые купола сохраняются в пределах выступов фундамента и крупных антиклинориев на участках древней континентальной коры, переработанной в фанерозойских складчатых поясах. Они испытывают постумное развитие, обуславливая многие черты тектонического плана и характер структур палеозойских и мезозойско-кайнозойских образований. Обнаруживаются они и на плитах древних платформ, где мощность чехла небольшая. Эти кольцевые структуры проявляются гравитационными и магнитными аномалиями.

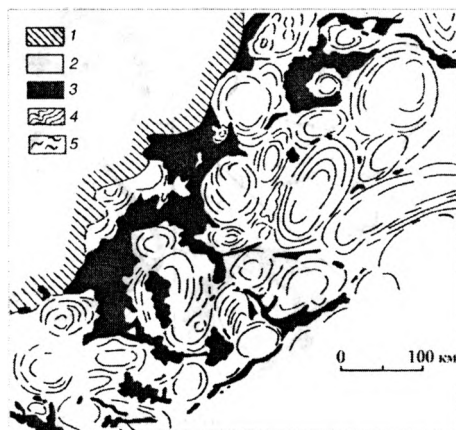


Рис. 7.16. Гранитогнейсовые купола Родезийского массива (по А. М. Макгрегору):

1 — чехол молодых отложений; 2 — граниты; 3 — кристаллические сланцы; 4 — гнейсы; 5 — мигматитовые граниты

КОСМОГЕННЫЕ КОЛЬЦЕВЫЕ СТРУКТУРЫ

На космических снимках выявляются кольцевые структуры и внеземного происхождения. Это — импактные структуры, образованные метеоритами (рис. 7.17, 7.18). При их падении на Землю выделяется большое количество энергии. С огромными давлениями (до 100 ГПа) и температурой (до 2000 °С) в точке соприкосновения



Рис. 7.17. Аризонская космогенная структура. США

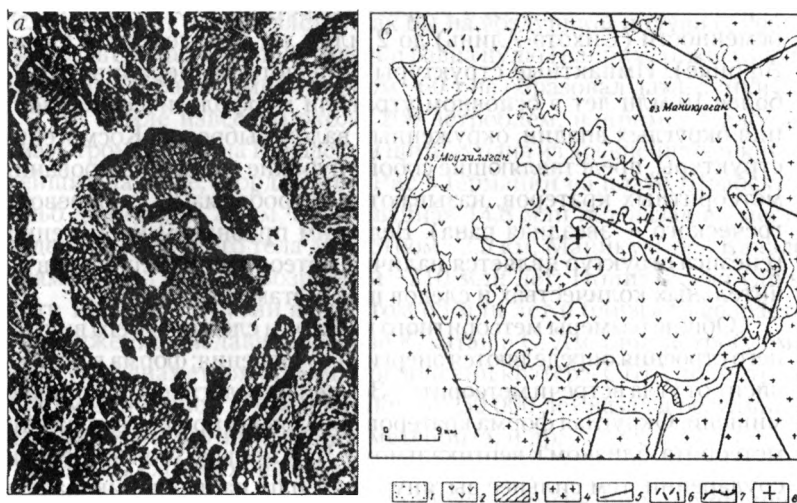


Рис. 7.18. Маникуганская космогенная структура. Канада.

a — космический снимок; *б* — геологическая карта

(по В. И. Фельдману из работы К. Л. Кбри, упрощено):

1 — рыхлые четвертичные отложения в депрессиях; **2** — вулканические породы комплекса Маникуган; **3** — отложения ордовика; **4** — породы кристаллического фундамента; **5** — основные разрывы; **6** — зоны развития шок-метаморфизма; **7** — границы центрального поднятия; **8** — геометрический центр структуры

метеорита с поверхностью (в мишени) и в результате воздействия ударной волны образуются минералы высокобарических фаз кремнезема и других соединений, шоковые (или планарные) структуры минералов, импактиты (ударные брекчии, состоящие из стекла, цементирующего обломки пород и минералов), раздробленные и брекчированные породы. Количество установленных импактных структур и их пространственное распределение определяются степенью геологической изученности территории и геологическим возрастом континентальной коры. Так, в Северной Америке и Европе известно много импактных структур, в то время как в Южной Америке и Азии — единицы.

Космогенные структуры имеют характерные морфологические особенности: небольшую глубину по сравнению с диаметром, кольцевой, периферийный вал вокруг воронки и центральную горку. Размеры их варьируют от нескольких десятков метров до 100 км (преобладают 2-33 км), а возраст известных структур — от современности (Сихотэ-Алинь) до 2 млрд лет (Вредефорт в Южной Африке). Импактные структуры большого размера с возрастом более 10 млн лет в основном утратили морфологические очертания округлых впадин, окруженных валом выбросов. Космогенные структуры, представляющие собой глубокие части эродированных метеоритных кратеров, называются астроблемами (в переводе с греческого — звездная рана). Ведущим признаком космогенного генезиса структур является наличие метеоритного вещества в значительных количествах и следов шок-метаморфизма.

Общие размеры метеоритного кратера и сложность его внутреннего строения определяются энергией соударения; форма в плане зависит от угла встречи метеорита с Землей и геологического строения мишени. Округлая форма кратеров образована при крутом падении метеорита, близком к вертикальному. Чем меньше угол встречи при соударении, тем сильнее вытянут кратер по направлению падения (например, самый крупный из кратеров Рио-Кварто в Аргентине, возникший ~10 000 лет назад, имеет длину 4,5 км, ширину 1,1 км при глубине 7-8 м). Форма и строение днища кратера усложняются с увеличением его поперечника, у крупных структур днища осложнены рытвинами, трещинами, буграми. Округлая воронка кратера окружена так называемым цокольным валом, образованным задранными пластами горных пород мишени, которые перекрыты

обломками пород, выброшенными взрывом, залегающими обычно в обратной стратиграфической последовательности и слагающими насыпной вал, обычно асимметричный (внутренний склон круче внешнего). Глубина метеоритных кратеров составляет $\sim 1/3$ диаметра, а отношение глубины воронки к диаметру — $\sim 0,30-0,33$, которое уменьшается с увеличением диаметра кратера. С увеличением диаметра кратера меняется и его внутреннее строение. Небольшие (диаметром до 3-4 км) импактные структуры имеют простую чашеобразную форму, похожую на карстовую воронку, но с периферийным валом (Соболевская в Приморье, Каалиярви в Эстонии и многие др.). При больших диаметрах воронки в ее центре наблюдается центральная горка (центральный пик), образующаяся благодаря упругой отдаче пород мишени после взрыва. При диаметрах воронки более 14-15 км появляется центральное кольцевое поднятие. Характерные формы рельефа могут не образовываться, если метеорит приземляется как бы на воздушной подушке, когда скорость соударения практически равна нулю (например, железный метеорит Хоба в Намибии весом ~ 60 т не образовал даже лунки).

На Земле известно около 200 астроблем, например Садбери диаметром 200 км на Канадском щите — одна из древнейших и крупнейших на суше; Нордлингер-Рис в Германии на плато Швабский Альб диаметром 26 км, образованная 14,8 млн лет назад на месте падения метеорного тела диаметром $\sim 2,5$ км; Маникуаган в Канаде диаметром 120 км и возрастом ~ 210 млн лет; Попигайская (диаметр 100 км) в Якутии возрастом 65 млн лет и близкого возраста обнаруженная недавно на п-ове Юкатан в С. Америке астроблема Чиксулуб диаметром 300 км; Аризонский кратер в США диаметром 1240 м и глубиной 170 м, возникший $\sim 50\,000$ лет назад в результате падения железно-никелевого метеорита, и др.

Много сходных черт с метеоритными имеют так называемые *криповзрывные структуры*, образующиеся при специфическом вулканизме, связанном с природными химическими газовыми взрывами. При развитии близповерхностного газонасыщенного магматического очага в ходе резких неоднократных колебаний температур и давлений, катастрофически быстрого отделения огромного объема газов и их взрывного окисления может возникнуть вся гамма эффектов ударного метаморфизма. Эндогенное происхождение криповулканических структур доказывается длительностью

и сложностью процессов их образования, закономерной локализацией и присутствием пород с признаками ударного метаморфизма за пределами структур, аналогией с породами явно эндогенного происхождения. Но нередко генезис таких структур остается дискуссионным. Так, например, образование Попигайской структуры (рис. 7.19) одни исследователи объясняют падением метеорита, другие — взрывным механизмом («ударом снизу»).

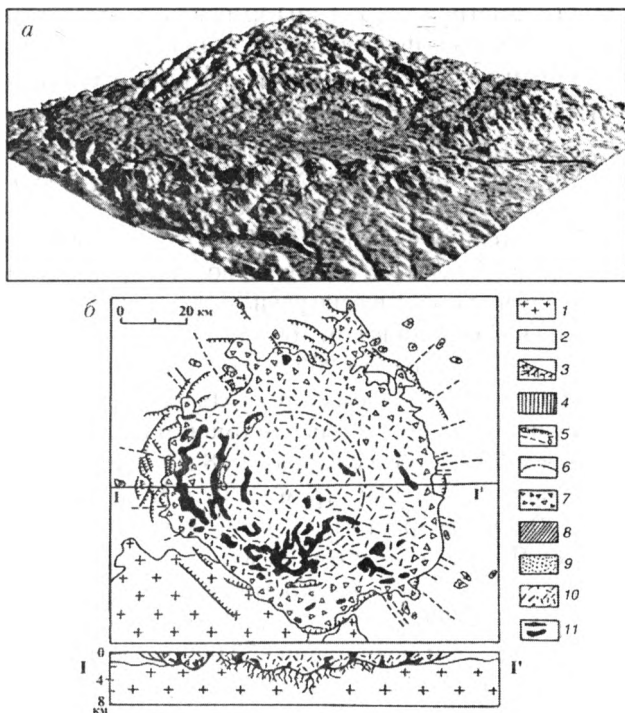


Рис. 7.19. Попигайская структура. Анабарский щит:

a — 3D модель рельефа (по Д. Г. Загубному), *б* — карта и схематический разрез Попигайского ударного кратера (по В. Л. Масайтису и др.): 1 — кристаллические породы докембрия; 2 — докайнозойский осадочный чехол; 3 — брекчирование и катаклаз; 4 — ударно-метаморфизованные гнейсы; 5 — центробежные надвиги (*a*) и радиальные разрывы (*б*); 6 — ось кольцевого поднятия; 7 — аллогенные брекчии; 8 — то же, с признаками ударного метаморфизма; 9 — базальный горизонт аллогенных брекчий; 10 — зювиты; 11 — застывшие импактные расплавы, в том числе тагамиты. I-I' — линия разреза

ЭКЗОГЕННЫЕ КОЛЬЦЕВЫЕ СТРУКТУРЫ

Физико-геологические процессы, протекающие на поверхности Земли, могут также приводить к образованию кольцевых структур, например карстовых (при растворении и выщелачивании горных пород поверхностными и подземными водами), суффозионных (при выносе подземными водами тончайших частиц), термокарстовых (при вытаивании подземного льда) просадок и т. п. (рис. 7.20). Они имеют обычно небольшие размеры, но нередко являются индикаторами развития структур тектонического генезиса. Образование и развитие мини-структур экзогенного генезиса могут быть спровоцированы антропогенной деятельностью.

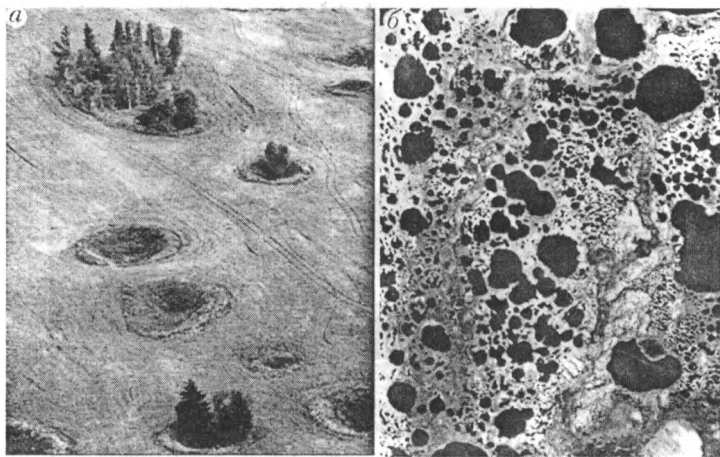


Рис. 7.20. Экзогенные кольцевые образования:

а — карстовые воронки, перспективный АФС; *б* — термокарстовые озера, плановый АФС

АНТРОПОГЕННЫЕ (ТЕХНОГЕННЫЕ) КОЛЬЦЕВЫЕ СТРУКТУРЫ

В связи с развитием горно-добывающей промышленности на Земле появились концентрические образования техногенного происхождения, созданные карьерами и отвалами (например, на руднике Расвумчорр в Хибинах, кимберлитовой трубке Мир в Якутии) (рис. 7.21). Подземная добыча сопровождается выносом на поверхность пустой породы, образованием терриконов высотой 50—200 м

(в Уэльсе до 300 м), а нередко провальных воронок (антропогенный псевдокарст) глубиной в сотни метров и площадью более тысячи км², возникающих над шахтами из-за обрушения кровли подземных выработок. Такого же антропогенного генезиса и мульдообразные просадки, возникающие под крупными городами в результате откачки подземных вод и дополнительной нагрузки сооружений, и пр.



Рис. 7.21. Открытая разработка алмазоносной трубки Мир. Западная Якутия. КС

7.2. ПОЛИГЕННЫЕ КОЛЬЦЕВЫЕ СТРУКТУРЫ

К этому классу структур относятся нуклеары и мантийно-диопирические мега- и макроструктуры.

НУКЛЕАРЫ

Нуклеары («нуклеус» — ядро) представляют особую группу среди кольцевых структур Земли и являются сложно построенными полигенными кольцевыми системами. Их возникновение связывается с нуклеарной стадией геологического развития Земли, сменившей лунную стадию 3,8 млрд лет назад. Предполагается, что

первоначально это были громадные кольцевые бассейны типа лунных или марсианских морей, на месте которых в процессе сложного осадконакопления и последующей гранитизации и метаморфизма возникли первые ядра континентальной коры материков.

Самый крупный нуклеар, выявленный в пределах древних платформ, — Северо-Американский — имеет диаметр по максимальной оси 3800 км. Несколько уступают ему в размерах Западно-Африканский (3600 км) и Амазонский (3200 км). Размеры самых маленьких нуклеаров (Оленекский, Прибалтийский) — 500 км (рис. 7.22). Некоторые нуклеары оказались разорванными в процессе перемещения литосферных плит (например, Южно- и Центрально-Африканский, западные части которых расположены в Южной Америке) (рис. 7.23).

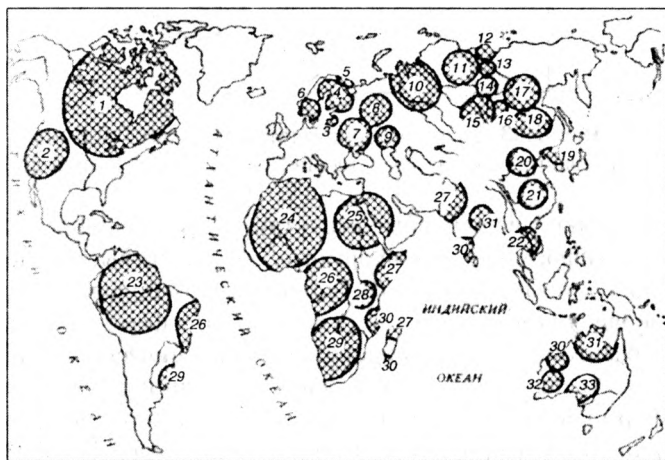


Рис. 7.22. Схема расположения нуклеаров на континентах Мира.
(по Я. Г. Кацу и др.). Нуклеары:

1 — Северо-Американский, 2 — Колорадский, 3 — Свеконоворвежский, 4 — Свекофеннокарельский, 5 — Кольско-Лапландский, 6 — Прибалтийский, 7 — Скифский, 8 — Сарматский, 9 — Прикаспийский, 10 — Обский, 11 — Хета-Оленёкский, 12 — Оленекский, 13 — Тунгский, 14 — Вилуйский, 15 — Ангарский, 16 — Витимо-Олекминский, 17 — Алдано-Становой, 18 — Амурский, 19 — Синокорейский, 20 — Сев. Китайский, 21 — Юж. Китайский, 22 — Индокитайский, 23 — Амазонский, 24 — Зап. Африканский, 25 — Аравийско-Нубийский, 26 — Центр. Африканский, 27 — Сомалийско-Аравийский, 28 — Танзанийский, 29 — Юж. Африканский, 30 — Дарваро-Мозамбикско-Пилбарский, 31 — Северо-Австралийский, 32 — Йилгарнский, 33 — Юклинский

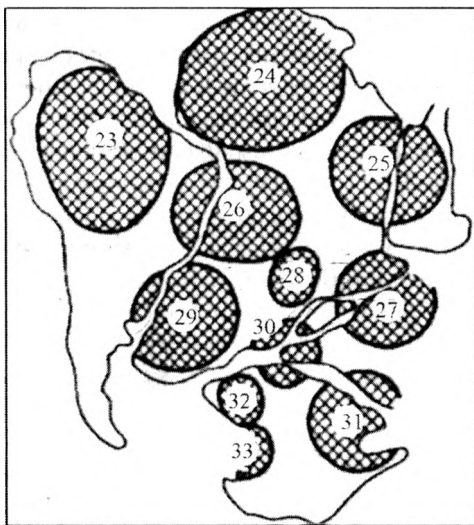


Рис. 7.23. Схема расположения нуклеаров Гондваны (названия нуклеаров см. на рис. 7.22) (по Я. Г. Кацу и др.)

Выделяют две основные структурные разновидности нуклеаров — антиформные и синформные. Антиформные нуклеары характеризуются приближенным к поверхности положением раздела Мохоровичича, преобладанием в составе литосферы тяжелых гипер-базит-базитовых пород, тенденцией к тектоническим опусканиям и положительными глубинными аномалиями поля силы тяжести. Синформная разновидность нуклеаров отличается погружениями поверхности Мохоровичича, значительными мощностями кислого гранитометаморфического слоя и глубинными отрицательными гравитационными аномалиями. По данным М. З. Глуховского и его соавторов, радиологический возраст кислых масс в синформных нуклеарах центрально омоложивается к периферии, а спиралеобразные очертания концентрических элементов некоторых нуклеаров указывают на наличие ротационных движений при их развитии.

Нуклеарные структуры оказывали влияние на формирование древних континентальных блоков на протяжении всего фанерозоя, а некоторые предопределили современные границы платформ.

Внутри нуклеаров расположены архейские и протерозойские метаморфические, магматические и вулканогенно-осадочные комплексы и более молодые отложения фанерозоя, а по периферии некоторые из них оконтурены протерозойскими мобильными поясами, иногда рифтовыми системами или крупными дугowymi разломами (например, Танзанийский нуклеар в Африке с запада оконтурен Восточно-Африканской рифтовой системой).

С нуклеарами всегда ассоциируются структуры-сателлиты (рис. 7.24).

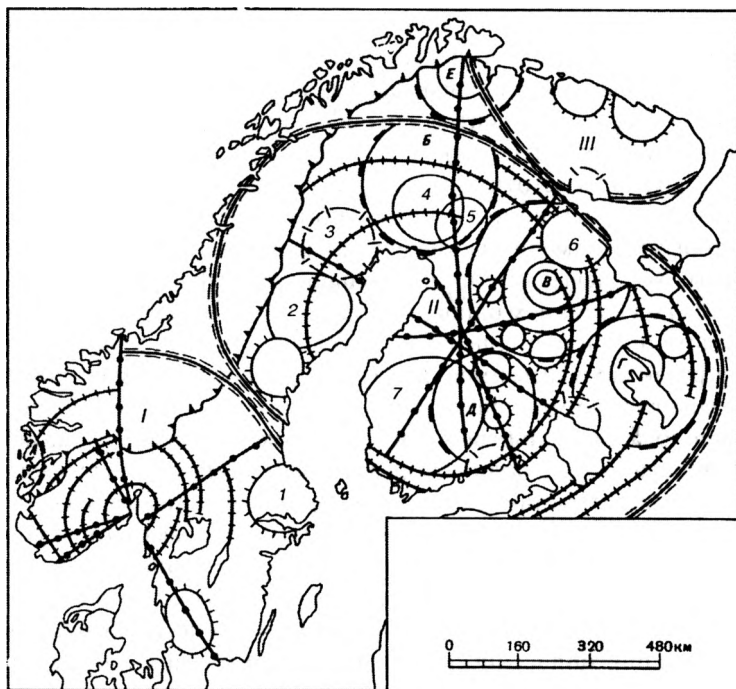


Рис. 7.24. Кольцевые и линейные структуры Балтийского щита (по М. З. Глуховскому). Нуклеары:

I — Свеконорвежский, *II* — Свекофеннокарельский, *III* — Кольско-Лапландский. Кольцевые структуры-сателлиты: *A* — Бергенская, *Б* — Лапландская, *В* — Калевальская, *Г* — Онежская, *Д* — Восточно-Финляндская, *Е* — Инарийская. Прочие кольцевые структуры: 1 — Упласа, 2 — Шеллефтео, 3 — Лулкео, 4 — Киттиля, 5 — Кемиярки, 6 — Беломорская, 7 — Центрально-Финляндская

МАНТИЙНО-ДИАПИРОВЫЕ КОЛЬЦЕВЫЕ СТРУКТУРЫ

Мантийно-диапировые кольцевые структуры, в противоположность нуклеарам, характерны прежде всего для мезозойской и кайнозойской эр. К ним относятся Паннонская, Бетско-Марокканская структуры, дуги морей Банда, Скота, архипелага Бисмарка. Образование их связано с формированием и развитием мантийных диапиров, над которыми образуется утоненная континентальная или переходного типа (вплоть до океанической) земная кора. По их периферии расположены незамкнутые полукольцевые или овальные образования из дугообразных изгибов складчатых зон и поворотов и изгибов осей складчатых сооружений. Обычно такие дугообразные изгибы сопровождаются системой шарьяжей с движением горных масс от центра к периферии кольцевой структуры (центробежная вергентность).

Итак, кольцевые структуры больших размеров являются образованиями сложного генезиса и длительного развития, в формировании которых принимали участие метаморфические и тектонические процессы. Кольцевые структуры меньших размеров обычно формируются под влиянием одного ведущего геологического фактора. Впоследствии они претерпевают длительную моделировку и постумное развитие. Самые мелкие структуры порождены одноактными геологическими процессами.

Расположение кольцевых структур на континентах отражает вещественные неоднородности разных глубинных уровней земной коры: гранитометаморфического слоя или складчатого фундамента — и, возможно, более глубинных. Кольцевые структуры разного генезиса приурочены к областям распространения разных типов строения или разных глубинных срезов континентальной земной коры: к древним щитам — метаморфические, к складчатым системам — плутонические, к вулканическим поясам — вулканические, к плитам древних и молодых платформ — тектонические. Кольцевые структуры не остаются неизменными после своего формирования. Они преобразуются, затушевываются, стираются под влиянием метаморфических, магматических и тектонических процессов, погребаются под молодыми образованиями или «откапываются» в результате, тектонических поднятий и денудации и пр.

Глава 8

ПРИМЕНЕНИЕ КОСМИЧЕСКИХ СНИМКОВ В СТРУКТУРНО-ГЕОЛОГИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЯХ

8.1. ИЗУЧЕНИЕ ТЕКТОНИЧЕСКИХ СТРУКТУР И ГЛУБИННОГО СТРОЕНИЯ ЛИТОСФЕРЫ

Уже первые изображения Земли из космоса показали исключительную их особенность по сравнению с аэрофотоматериалами. Это — *обзорность*, когда можно видеть большую территорию, не переводя взгляда, что важно для целостного восприятия картины, и *генерализация изображения*, при которой отдельные мелкие детали ландшафта и геологической структуры обобщаются, предоставляя возможность дешифровать парагенезисы структурных форм, крупные геолого-структурные объекты и элементы глубинного строения литосферы.

ПРОЯВЛЕНИЕ НА КОСМИЧЕСКИХ СНИМКАХ ГЛУБИННОГО СТРОЕНИЯ ЛИТОСФЕРЫ

Космические снимки в комплексе с другими данными (геофизики, сейсмологии, структурной геологии) дают возможность изучать глубинное строение литосферы. Давно замечено, что с уменьшением пространственного разрешения и соответственно увеличением уровня генерализации космических снимков на них проявляются все более глубинные структуры. Объясняется этот эффект тем, что чем крупнее объект, тем больше глубина его заложения, и, чтобы его увидеть, необходимы снимки с широким площадным охватом — континентального и регионального уровней генерализации. Структуры меньших масштабов и глубины заложения и детали их строения проявлены на локальных и детальных КС. Наиболее хорошо изученными элементами глубинного строения литосферы являются линеаменты.

В горно-складчатых областях выявлены структуры дискордантные, секущие по отношению к структурам приповерхностных слоев земной коры, которые определяют основные простирания и структурный рисунок территорий и наиболее четко проявлены на КС.

Аномальные по отношению к ним структурные направления обычно нечеткие и дешифрируются по косвенным признакам. Они могут проявляться в смещении систем покровно-складчатых структур, замыкании, виргации зон поднятий и прогибаний, в прерывистости, сегментации, преломлении в плане систем хребтов, четковидном строении впадин, морфологии отдельных форм и других особенностях приповерхностной структуры и рельефа. Эти линейные аномалии отражают более глубокий структурный план и проявляют дискордантность разноглубинных структурных планов. Их реальность доказывается геофизическими методами. Например, на востоке Кавказского региона приповерхностный структурный план (10-25 км) имеет субширотное простирание, а глубинный (до 60 км) — субмеридиональное (рис. 8.1).

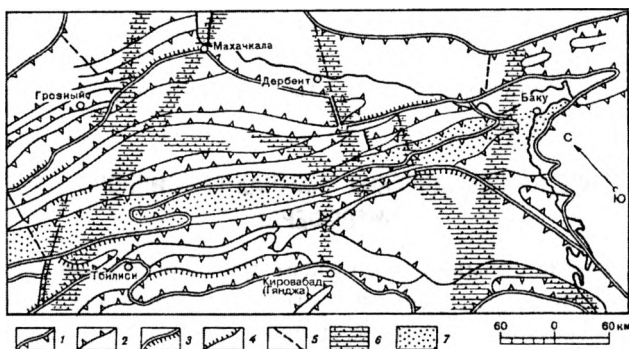


Рис. 8.1. Сопоставление разноглубинных новейших структур Восточного Кавказа (по В. Г. Трифонову):

1-5 — неотектонические элементы осадочного чехла и приповерхностной части земной коры (по Е. Е. Милановскому): 1, 2 — границы главных (1) и второстепенных (2) неотектонических элементов с показанным направлением наклона поверхности, 3-4 — главные (3) и второстепенные (4) новейшие разломы и флексуры с указанным направлением вертикального смещения, 5 — новейшие разломы с неустановленным направлением смещения; 6, 7 — глубинные зоны новейших перемещений и деформаций: 6 — на глубинах 10-25 км, 7 — на глубинах до 60 км (зона южного склона Большого Кавказа)

Секущие по отношению к приповерхностной структуре направления установлены на Тянь-Шане, Урале, Камчатке, Сихотэ-Алине и во многих других регионах. Такая дисгармония разноглубинных структурных планов объясняется *тектонической расслоенностью*

литосферы. В основе этого научного направления, разработанного в ГИН РАН, лежат представления о том, что вещественные, реологические и геофизические неоднородности литосферы при тектонических импульсах создают условия для латеральных срывов или тектонического течения поверхностных и глубинных масс, которые двигаются с разной скоростью и на разных уровнях. Это создает картину «перекрестного» структурного плана на космических изображениях.

Данные, полученные с помощью КС, о глубинном строении и тектонической расслоенности литосферы используются при прогнозе сейсмичности, выявлении структурного контроля месторождений рудных полезных ископаемых, углеводородов, подземных вод и пр.

ПАРАГЕНЕЗИСЫ СТРУКТУР И СТРУКТУРНЫЕ РИСУНКИ

В отличие от наземных наблюдений и даже аэроснимков космические снимки дают возможность изучать вещественно-структурные комплексы горных пород, их парагенезисы, расположение в пространстве. По геометрическим рисункам структур определяются их морфология и кинематика, а по характерным сочетаниям (ансамблям) этих форм — геодинамические условия формирования. Рисунки некоторых типовых парагенезисов тектонических структур приведены на рис. 8.2.

В условиях *латерального сжатия* проявляются внутренняя тектоническая расслоенность литосферы с образованием литопластин, испытывающих горизонтальные смещения, и дисгармоничные деформации разных ее слоев. Характерен сложный фестончатый рисунок складчато-взбросо-надвиговых и сдвиговых деформаций, отражающий процесс надвигания и шарьирования. Складки сопровождаются виргацией, ундуляцией, сегментацией за счет поперечных разрывов, характерна вергентность тектонических форм. Поперечные тектонические перемещения в складчато-орогенных областях приводят к формированию структурных дуг — ороклинов, которые в зависимости от направления транспорта могут быть «подвиговыми» и «надвиговыми». На фронте максимального сжатия ширина складок сужается, возникают так называемые «деформационные шейки». Продольное течение горных масс от фронта сжатия в сторону меньших напряжений сопровождается образованием пережимов и расширений орогенных поясов. Выжимание, течение и коробление верхнекорового и глубинного вещества в услови-

ях латерального сжатия обуславливают дугообразный характер границ, сложный структурный рисунок складчато-разрывных деформаций, часто линзовидную форму выходов комплексов горных пород. Эти особенности проявляются и в масштабе целых горно-складчатых систем, как, например, на фронте надвигания Памира на Тянь-Шань (рис. 8.3), так и в строении отдельных складчатых зон. Такие парагенезисы структур, отражающие геодинамические

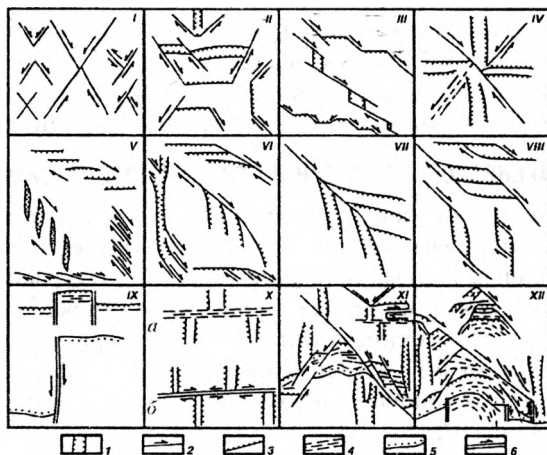


Рис. 8.2. Рисунки некоторых типовых парагенезов тектонических структур (в плане) (по Л. М. Расцветаеву):

I-IV — сопряженные сколы и отрывы: X-образный (*I*), трапециевидный (*II*), ступенчатый (*III*), ж-образный (*IV*) рисунки; *V-VIII* — типовые сочетания зон сжатия, сдвига и растяжения (по А. В. Лукьянову): *V* — «эшелон», *VI* — «конский хвост», *VII* — «елочка», *VIII* — «миндалевидная виргация»; *IX-XII* — некоторые более сложные сочетания систем тектонических нарушений: *IX* — сочетание систем скольжения (сдвиги, покровы) с системами сплющивания и скалывания в структурах покровно-надвигового типа, *X* — сочетание систем раздвижения с системами сплющивания (*a*) и скольжения (*б*) в структурах трансформного типа, *XI* — сочетание систем скалывания, скольжения и сплющивания в складчатых областях альпийского типа, *XII* — то же, с участием вторичных структур (л-образные рисунки). 1 — системы раздвижения (нормальные сбросы, раздвиги, отрывы, системы даек и жил); 2 — системы скалывания сдвигового типа (горизонтальные сдвиги, зоны сдвиговых деформаций; стрелки указывают направление относительного перемещения крыльев); 3 — системы скалывания надвигового типа (взбросы, надвиги, зоны взбросонадвиговых деформаций); 4 — системы сплющивания (кливаж, стилолиты, зоны смятия, системы складок продольного изгиба и расплющивания); 5 — системы скольжения покровного типа (точки по краю аллохтона); 6 — системы скольжения сдвигового типа (стрелки указывают направление относительного перемещения крыльев)

условия латерального сжатия, типичны для конвергентных границ литосферных плит.

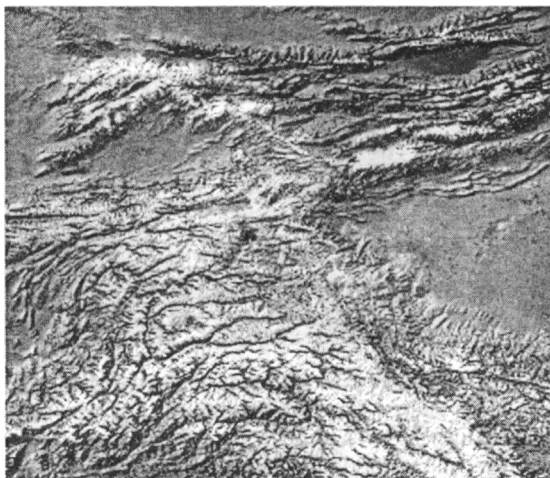


Рис. 8.3. Памиро-Тянь-Шаньская горная страна

В условиях *регионального растяжения земной коры* над линзами разуплотненной мантии формируются рифтовые зоны, наиболее распространенными структурами которых являются асимметричные и ступенчатые грабены или полуграбены, наклонные днища которых лишь с одной стороны ограничены крутым сбросом или ступенчатыми сбросами, а также системы из нескольких или многих односторонне наклоненных блоков — полуграбенов или полугорстов; реже встречаются симметричные и ступенчатые грабены. Сбросы, разделяющие блоки коры, часто листрические, выполаживающиеся с глубиной и затухающие или сливающиеся с поверхностью главного срыва — детачментом. Характерны сдвиги с впадинами присдвигового растяжения (типа pull-apart), проявления вулканизма и наличие обширных лавовых покровов. Впадины нередко расположены кулисообразно и контролируются крупными сдвиговыми зонами. На КС крупные рифтовые зоны опознаются по полосовости, обусловленной раздвиговой структурой базальтовых излияний (рис. 8.4), или по чередованию в плане узких поднятых и опущенных блоков (см. рис. I на цветной вклейке).

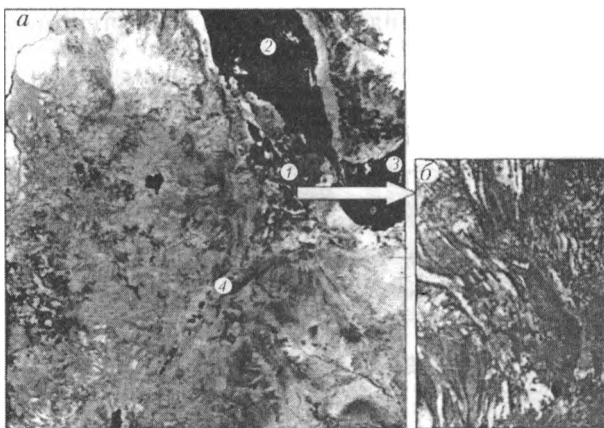


Рис. 8.4. Космический снимок Modis треугольника Афар (1), к северу от которого находятся рифты Красного моря (2) и Аденского залива (3), к югу — Эфиопский рифт (4), и полосчатая раздвиговая структура базальтовых излияний треугольника Афар (б)

8.2. ГЕОЛОГИЧЕСКАЯ ИНФОРМАТИВНОСТЬ КОСМИЧЕСКИХ СНИМКОВ

Информативность МДЗ зависит от геолого-тектонического строения территории, истории ее геологического развития, а также ландшафтно-климатических условий и условий съемки. Информативность *аэроснимков* во многом определяется обнаженностью района. В геологически открытых районах коренные горные породы выведены на земную поверхность и непосредственно формируют тон и рисунок изображения. В этих районах информативность снимков высокая. В геологически закрытых районах, там, где коренные породы перекрыты мощным чехлом рыхлых неоген-четвертичных отложений и/или густой растительностью, геологическое дешифрирование аэроснимков значительно сложнее, а информативность их ниже. Большое значение при геологическом дешифрировании МДЗ имеют ландшафтные особенности территории.

Геологическая информативность *космических снимков* также разная. Наиболее существенные различия имеют следующие геотектонические области: плиты древних и молодых платформ, щиты

древних платформ, щиты и кряжи молодых платформ в областях слабой активизации, орогенические области, континентальные вулканические пояса.

ПЛИТЫ ДРЕВНИХ И МОЛОДЫХ ПЛАТФОРМ

Плиты древних и молодых платформ характеризуются широким развитием на поверхности слабо и умеренно литифицированных отложений. На значительных площадях распространены новейшие отложения и аккумулятивный рельеф, которые сглаживают особенности геологического строения не только складчатых пород фундамента, но и отложений нижней части осадочного чехла (рис. 8.5). Наземными наблюдениями в этих районах получают сведения главным образом о литологии и генезисе четвертичных образований и выходящих на дневную поверхность коренных породах чехла. Поэтому данные, получаемые при анализе МДЗ, представляют большую ценность.

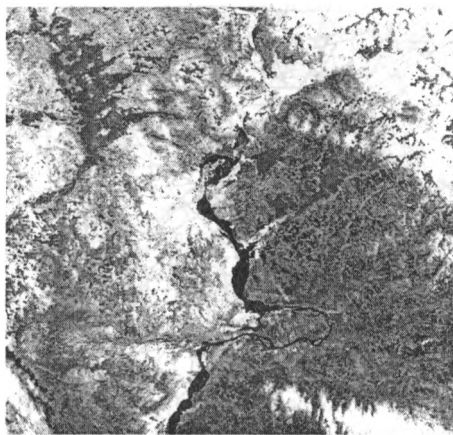


Рис. 8.5. Восточно-Европейская платформа. Река Волга. Самарская лука. КС Modis. На протяженных линейментах северо-восточного и широтного простираения наблюдаются преломление русла р. Волги и изменение направления ее течения

На КС континентального уровня генерализации проявлены крупные и глубинные элементы геологического строения платформ. Новую информацию для этих областей дали космические

снимки, прежде всего при дешифрировании линеаментов. Наиболее информативными оказались мелкомасштабные КС, позволившие выявить на всех плитах платформ многочисленные и часто ранее неизвестные линейные аномалии (рис. 8.6). Линеаментами выражаются разрывные нарушения фундамента и/или осадочного чехла. До 60-70 % линейных структур, дешифрированных на снимках, не находят соответствия в геологическом строении и не подтверждаются геофизическими данными. Линеаментами проявляются системы краевых разломов плит по обрамлению щитов, на границах со складчатыми областями, а также разломные границы крупных тектонических элементов в пределах плит, зоны разломов, связанные с авлакогенами, имеющие признаки новейшей активизации и отражение в ландшафте.

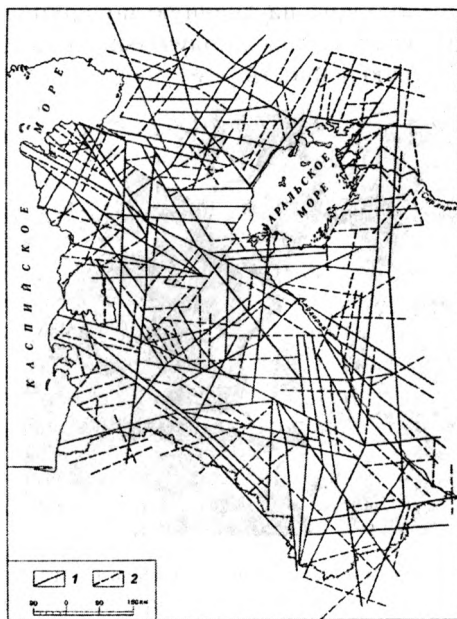


Рис. 8.6. Линеаменты Туранской плиты, отдешифрированные на мелкомасштабных космических изображениях, полученных с ИСЗ «Метеор» (по П. В. Флоренскому и В. П. Крючкову):

1,2 — линеаменты: 1 — секущие структуры первого и более высоких порядков, 2 — не выходящие за пределы структурных элементов первого порядка

Разновидность крупных кольцевых структур представляют сводовые поднятия фундамента, «просвечивающие» из-под платформенного чехла. Площадные объекты отвечают в основном неотектоническим блокам с разным режимом развития, унаследованно развивающимся от древних (рис. 8.7). Чаше унаследованность носит сложный характер, со сменой активности движений от этапа к этапу, изменением плановых очертаний структур и инверсий.

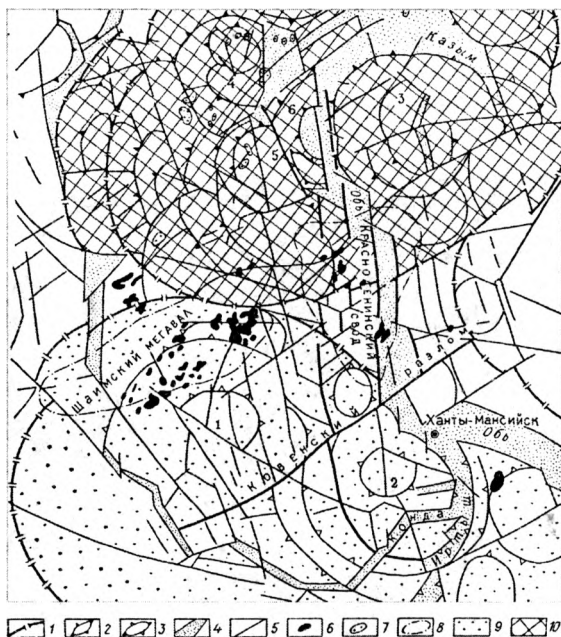


Рис. 8.7. Структурно-тектоническая схема Приуральской части Западно-Сибирской плиты, составленная на основе дешифрирования.

КС с ИСЗ «Метеор-29» (по Г. С. Бурлаковой):

1-3 — кольцевые структуры и их фрагменты: 1 — первого класса, отвечающие новейшим мегасводам, 2 — второго класса, отвечающие сводовым поднятиям и имеющие прямое выражение в рельефе, 3 — второго порядка, отвечающие поднятиям и имеющие обратное выражение в рельефе; 4 — осевые части новейших долин-грабенов, индицирующие зоны растяжения; 5 — линейные структуры, интерпретированные как разломы; 6 — нефтяные месторождения; 7 — газовые месторождения; 8 — контуры Красноленинского свода и Шаймского мегасвала; 9 — Ханты-Мансийский мегасвод; 10 — Сосьвинско-Белгородский мегасвод. Цифрами обозначены кольцевые структуры второго порядка

На региональных и локальных КС дешифрируются линеаменты, которые как правило интерпретируются разломами и зонами трещиноватости в породах осадочного чехла и/или фундамента. Они обуславливают сетчатый или мозаичный рисунок. Крупные своды и мульды осадочного чехла выражаются кольцевыми объектами, контуры которых имеют обычно менее сложную форму и большие размеры, чем реальные структуры. Многочисленные локальные структуры (брахискладки, валы, соляные купола, депрессии, котловины и пр.) отличаются разнообразием размеров и характером проявления (рис. 8.8) и выявляются на космоснимках по косвенным признакам — геоиндикаторам. Резкая смена характера эрозионного расчленения на денудационных равнинах нередко является отраже-



Рис. 8.8. Космический снимок бассейна р. Виллой

В пределах низкой залесенной равнины, перекрытой аллювиальными и озерно-аллювиальными четвертичными отложениями, выявляется Улахское полусводовое поднятие (1), которое огибают притоки р. Виллой, субширотная Виллойская зона дислокаций (2), проявленная линеаментами, и Гюкянский грабен (3), отличающийся на КС темным тоном и выраженный в рельефе понижением. Темные пятна в правой части снимка — гари от пожаров. Мелкие светлые и темные изометричные пятна — аласы, находящиеся на разной стадии развития (темные — с водой).

нием дифференцированно развивающихся блоков. Площадные объекты, выявляемые по фототону и строению рельефа, соответствуют разноамплитудным блокам и развитым на земной поверхности литолого-генетическим типам рыхлых отложений.

На детальных снимках в пределах аккумулятивных равнин дешифрируются генетические типы четвертичных отложений, а там, где выведены на земную поверхность коренные породы, — их литологические разности, а также локальные структуры и разрывные нарушения.

ЩИТЫ ДРЕВНИХ ПЛАТФОРМ

Щиты древних платформ представляют собой выходы на поверхность раннедокембрийских интенсивно метаморфизованных комплексов со своеобразными структурами, свойственными древнейшим этапам развития Земли. Они характеризуются устойчивыми поднятиями, но невысоким расчлененным рельефом. Эти особенности определяют информативность МДЗ этих территорий.

На КС низкого пространственного разрешения выделение структурно-вещественных комплексов древних щитов практически невозможно, они изображаются как гомогенные области с хорошо различимыми разными по размерам кольцевыми и линейными структурами. Иногда выделяются крупные овалы, размеры которых достигают нескольких сотен километров, отличающиеся более светлым тоном и ограниченные дугообразными более темными полосами. Такие структуры тесно связаны с крупнейшими кольцевыми системами древних щитов и разделяющими их зонами.

Линейные объекты дешифрирования представлены тремя типами. Во-первых, узкими линейными структурами, которые пересекают щиты и уходят за их пределы. Предполагается, что эти структуры соответствуют молодым тектоническим нарушениям и с внутренней структурой щитов не связаны. Во-вторых, структурами с полого извилистым строением, приспособленными к границам площадных объектов. Они интерпретируются как древние мобильные пояса, разделяющие древнейшие «ядра» щитов. И, в-третьих, линейными зонами частого чередования субпараллельных или кулисно расположенных полос различного фототона — зонами

мегакливажа, отвечающими областям рассеянной проницаемости земной коры. КС низкого и среднего пространственного разрешения используются для космотектонического районирования (рис. 8.9).

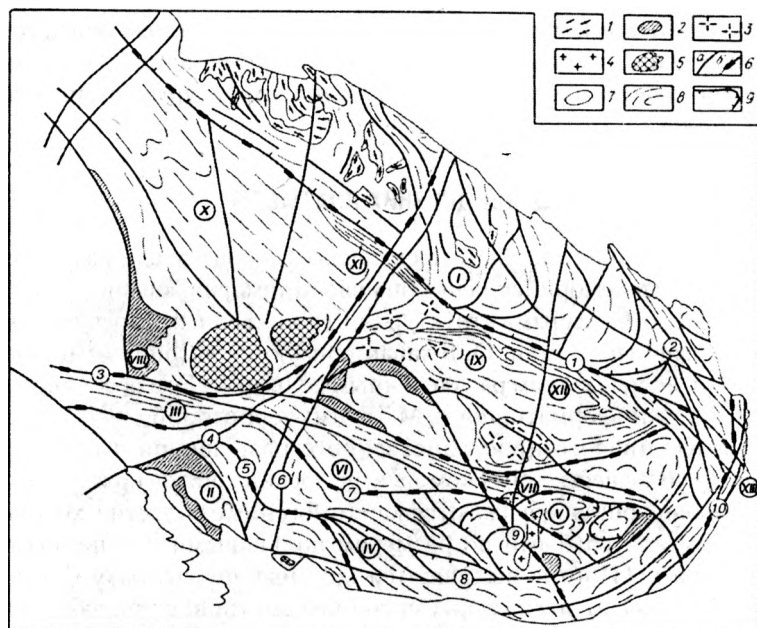


Рис. 8.9. Схема космотектонического районирования Кольского полуострова (по В. Н. Брюханову)

Массивы палингенно-метасвматических и интрузивных пород: 1 — гранитоидов; 2 — пород основного состава; 3 — щелочных гранитоидов; 4 — пегматоидных гранитов; 5 — ультраосновных щелочных пород; 6 — разломы (а — глубинные, б — разделяющие основные структуры); 7 — геологические границы; 8 — дешифрирующиеся структурные линии; 9 — границы площадей широкого развития гранито-гнейсовых куполов; основные структурные элементы (цифры и кружки): I — Мурманский блок; II — Кандалакшско-Колвицкий блок; III — Пиренгская зона; IV — Варзугский блок; V — Восточный блок; VI — Варзугская зона; VII — Пурначская зона; VIII — массив Главного хребта; IX — Кейвский «синклиниорий»; X — Центрально-Кольский блок; XI — зона Колмозера-Воронья; XII — Кейвская сланцевая зона; XII — Качковско-Снежинская зона; основные разломы (цифры в кружках): 1 — Марманский (Севере-Кейвский); 2 — Поной-Святоносский; 3 — Пиренгский; 4 — Харловский; 5 — Канозерский; 6 — Цагинский; 7 — Южно-Варзугский; 8 — Турий-Нижнепонойский; 9 — Кукшинско-Стрельнинский; 10 — Восточно-Кольский

КС среднего и высокого разрешения областей выхода фундамента на поверхность содержат сведения о внутренней структуре складчато-метаморфических толщ и магматических тел (рис. 8.10). В виде площадных объектов на них хорошо отделяются кристаллические образования протоплатформ от менее метаморфизованных, часто слоистых и пологозалегающих вулканогенно-осадочных толщ протоплатформенных чехлов верхнего архея — нижнего протерозоя. Часто выделяются троговые комплексы и зеленокаменные образования, тектонические клинья и грабены, выполненные фанерозойскими образованиями. Среди магматических пород лучше всего дешифрируются граниты, щелочные интрузии центрального типа и ультраосновные породы. Линейные структуры представлены в основном трещинами без смещения и относительно короткими (до 15-20 км) разрывными нарушениями с небольшой амплитудой. Они группируются в зоны сгущений, соответствующие линейным структурам региональных снимков. На детальном снимке проявляется слоистость метаморфических пород, даже если она замаскирована кристаллизационной сланцеватостью.



Рис. 8.10. Космический снимок Landsat среднего пространственного разрешения района Балтийского щита. Гранитоиднейсы интенсивно нарушены разрывами. Темным тоном выделяются дайки габбро-амфиболитов

ЩИТЫ И КРЯЖИ МОЛОДЫХ ПЛАТФОРМ
В ОБЛАСТЯХ СЛАБОЙ АКТИВИЗАЦИИ

Щиты и кряжи молодых платформ в областях слабой активизации представляют собой выходы на поверхность складчатых палеозойских или, частично, докембрийских комплексов фундамента. Для них характерны умеренный метаморфизм пород, интенсивная их дислоцированность, присутствие широкой гаммы осадочных, вулканогенных и интрузивных пород, умеренная расчлененность рельефа. Сочетание этих факторов обуславливает высокую геологическую информативность КС всех уровней генерализации.

На КС континентального уровня генерализации по тону и рисунку изображения выделяются отдельные складчатые системы, микроплиты, наложенные впадины, а в некоторых случаях антиклинории, отдельные складчатые зоны и геологические тела. Линейные структуры, как правило, легко сопоставляются с крупными глубинными разломами, ограничивающими главные структурные элементы. Иногда в виде узких полосовых темных аномалий выделяются офиолитовые швы. Линеаменты нередко имеют секущее положение. Они отражают строение глубинных частей земной коры и нередко не устанавливаются на земной поверхности. Кольцевые структуры чаще всего связаны с вскрытыми или невскрытыми, но расположенными вблизи поверхности гранитоидными массивами.

На КС регионального уровня генерализации можно расшифровать структуру отдельных блоков и состав слагающих их пород: преимущественного развития карбонатных, терригенных или вулканогенных образований; кремнисто-кварцитовые толщи и офиолиты. Дешифрируются крупные структурные формы, внутреннее строение отдельных блоков, элементы слоистости и пр. (рис. 8.11). Характер фотоизображения зависит от степени дислоцированности пород и различен для изоклинальных, линейно- и коробчато-складчатых зон. Линейные структуры могут быть либо зонами разломов, либо границами между стратиграфическими и литологическими комплексами. Кольцевые структуры связаны или с интрузиями гранитов или с полями относительно молодых вулканитов.

КС локального уровня генерализации содержат информацию о вещественном составе горных пород. Особенно уверенно разделяются пачки пород, имеющие контрастный (по оптическим свой-

ствам) литологический состав; достаточно надежно выявляются поля распространения интрузивных образований. В пределах гранитных массивов удастся установить фазы внедрения, а на полях вулканитов не только центры излияния, но и отдельные лавовые потоки. Выявляются пояса даек, даже отдельные дайки и их состав. Во многих случаях возможно определение кинематических характеристик разрывных нарушений и морфологии складок, а также соотношения вулканических фаций и магматических фаз.

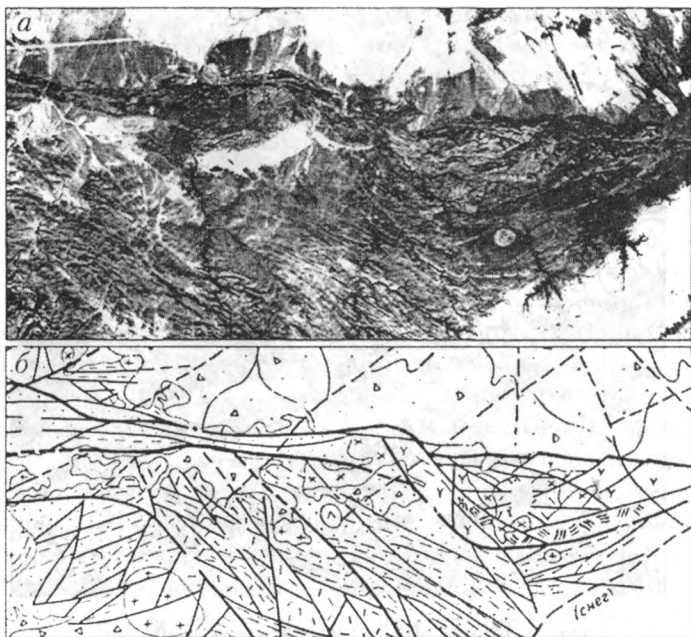


Рис. 8.11. Космический снимок восточной части хр. Тарбагатай (а) и схема его дешифрирования (б) (по Н. С. Афанасьевой и др.)

ОРОГЕНИЧЕСКИЕ ОБЛАСТИ

В зависимости от рельефа, климатических особенностей, распределения растительного покрова, активности современных движений информативность КС горных областей может быть самой различной.

Очень низкой информативностью отличаются высокогорные плато (Памир, Тибет), закрытые ледниковыми образованиями, а также залесенные склоны (Кавказ, Карпаты) (рис. 8.12). Здесь прежде всего видны позднекайнозойские неотектонические структуры.

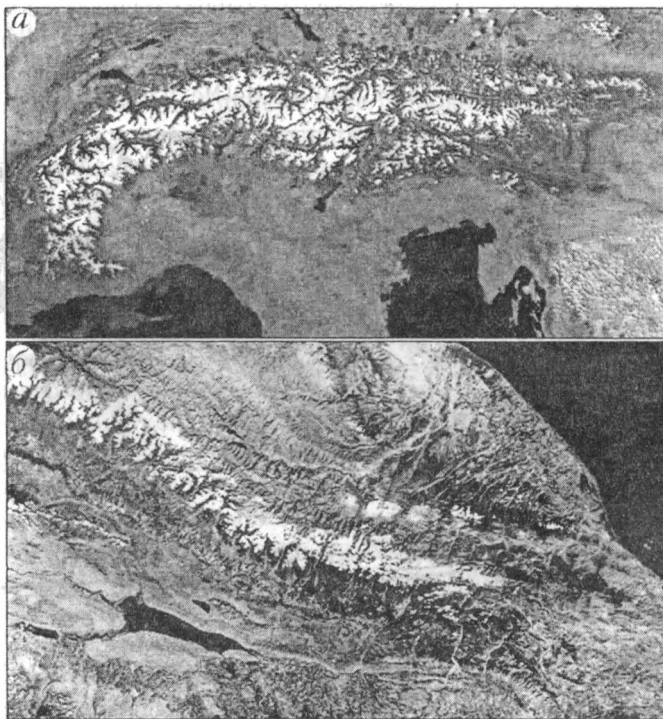


Рис. 8.12. Орогены на КС «Прозрачный мир»:

а — Альпы, б — Кавказ

Современный рельеф земной поверхности в основных своих чертах сформировался на неотектоническом этапе, который охватывает сравнительно короткий (~35 млн лет) позднекайнозойский отрезок в геологическом развитии Земли. В это время проявилась глобальная активизация тектонических процессов, которая привела к формированию новейших орогенов — областей с горным рельефом, отличающихся высокими градиентами пространственных

изменений различных геологических, геофизических и физико-географических характеристик. Орогены возникли на континентальной коре разного возраста, захватив бывшие подвижные и платформенные территории.

На КС континентального уровня генерализации обособляются основные орографические элементы: горные хребты и массивы, а также межгорные депрессии. Среди линейных объектов наиболее четко выделяются разломы, в том числе ограничивающие горные массивы и межгорные впадины. Практически всегда на снимках орогенных областей обнаруживаются трансорогенные линейные структуры.

КС регионального уровня генерализации по геологической информативности для многих регионов оказываются близки к континентальным снимкам. В то же время на снимках районов межгорных впадин и их обрамления могут выявляться локальные складчатые структуры, а также морфология и кинематика разрывных нарушений. Кольцевые структуры отражают либо выходы интрузивных и вулканических массивов, либо дуговые системы разломов и ундуляции линейных складок; в некоторых случаях — участки молодого прогибания. Геологическая природа значительного числа кольцевых структур остается неизвестной.

Информативность КС локального уровня в сильной степени зависит от региональных геологических и географических особенностей изучаемых территорий. При благоприятных условиях локальные снимки могут быть использованы в качестве основы для составления близких к кондиционным геологических карт.

КОНТИНЕНТАЛЬНЫЕ ВУЛКАНИЧЕСКИЕ ПОЯСА

Континентальные вулканические пояса сложены почти исключительно вулканическими породами и широко распространенными коагматичными интрузиями гранитоидов. По структурному рисунку области палеовулканизма, неовулканизма и современной вулканической активности четко обособляются на КС от территорий другой геологической природы. Своеобразно внутреннее строение вулканических толщ, для которых характерны не собственно складчатые структуры, а тектоновулканические — депрессии, грабены, экструзивные купола, кальдеры обрушения и др.

На КС континентального и регионального уровней генерализации вулканические пояса выделяются по особенностям фотоизображения. Наиболее уверенно проводятся разломные границы вулканических поясов. Линейные структуры обычно отвечают глубинным разломам, параллельным или поперечным простираанию поясов (рис. 8.13). Отдельные звенья вулканических поясов нередко отличаются рисунками изображения.

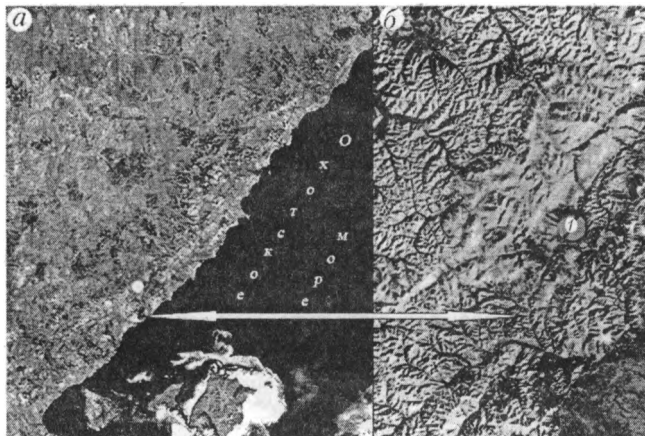


Рис. 8.13. Звено Охотско-Чукотского вулканического пояса на космических снимках: *а* — низкого, *б* — среднего пространственного разрешения:

1 — глубинный разлом; черное поле — Охотское море. На КС видны многочисленные вулканические и вулканотектонические кольцевые структуры разного размера (стрелкой показана одна и та же концентрическая структура)

Одна из самых характерных особенностей вулканогенных поясов — широкая гамма различных по размерам кольцевых структур (рис. 8.14, 8.15). Космические снимки локального уровня генерализации позволяют дешифровать кольцевые структуры вулканического происхождения, а также лавовые потоки, пласты туфов, субвулканические и экструзивные тела, вулканические аппараты, кальдеры обрушения, корни трещинных излияний. В виде площадных объектов выделяются отдельные вулканотектонические депрессии, грабены и наложенные впадины. Они различаются по рисунку изображения и общему тону.

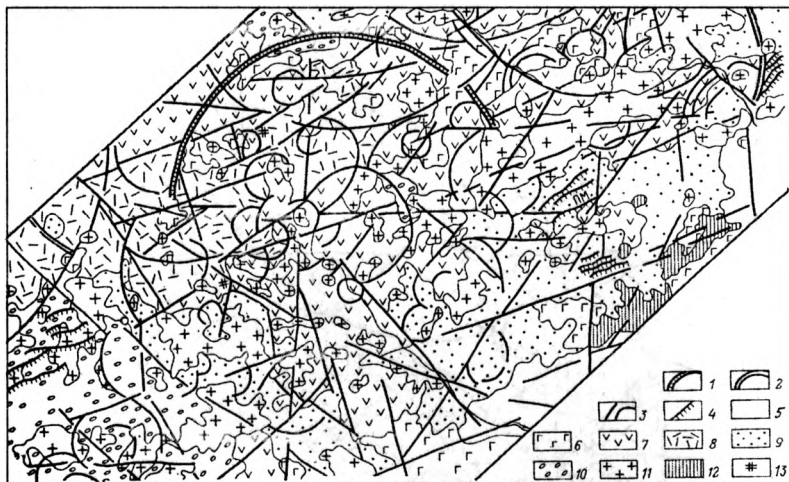


Рис. 8.14. Строение Верхнеокланской кольцевой мегасистемы и сопредельных районов (по Н. И. Филатовой и Ф. А. Маженштейну):

1 — дуговые разломы внешнего обрамления Верхнеокланской кольцевой мегасистемы; 2 — дуговые разломы прочие; 3 — линейные разломы; 4 — надвиги; 5 — рыхлые четвертичные отложения; 6 — палеогеновые и поздне меловые вулканиды преимущественно основного состава, 7-8 — меловые вулканиды преимущественно: 7 — среднего состава, 8 — кислого состава; 9 — нижнемеловые терригенные отложения; 10 — верхнепалеозойские и нижнетриасовые осадочные отложения; 11 — меловые интрузии кислого состава; 12 — меловые и палеогеновые субвулканические массивы; 13 — интрузивные массивы немасштабные

Космические снимки детального уровня генерализации (как и АФС) позволяют дешифрировать пачки вулканогенно-осадочных образований, разной формы и петрографического состава субвулканические и экструзивные тела, отдельные вулканические аппараты, неки, шлаковые конусы, образующие кольцевые объекты диаметром ~ 10 км (рис. 8.16).

На КС континентальных вулканических поясов обнаружено огромное количество кольцевых структур разных размеров, значительно изменивших ранее существовавший план складчатых и блоковых деформаций. Крупные кольцевые объекты, имеющие в поперечнике ~100 км (например, Омонская, Пенжинская в Охотско-Чукотском вулканическом поясе), нередко выходят за пределы

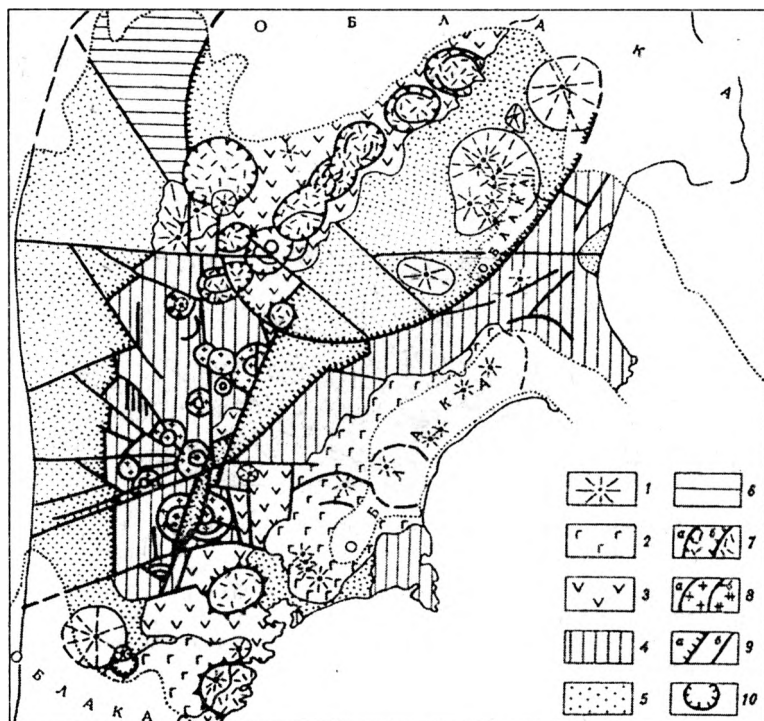


Рис. 8.15. Морфоструктуры молодых вулканических областей Камчатки.

Схема дешифрирования КС «Метеор»

(по Б. В. Ежову и С. Е. Апрелькову):

1 — четвертичные щитовые вулканы и стратовулканы; 2 — вулканы Восточно-Камчатского пояса; 3 — вулканы Центрально-Камчатского пояса, 4 — докайнозойские и мел-палеогеновые комплексы в основании вулканических поясов; 5 — рыхлые и слабо консолидированные отложения в депрессиях; 6 — район разобленных выходов пород основания в Западно-Камчатской депрессии; 7 — вулканотектонические кольцевые структуры депрессионного (а) и купольного (б) типов; 8 — магмо-тектонические кольцевые структуры: а — ядра метаморфических куполов, б — корневые части вулканотектонических структур, 9 — разрывы, ограничивающие районы блоковых поднятий (а) и прочие (б); 10 — кальдера вулкана Опал

вулканических поясов, пересекая структуры обрамления. Среди кольцевых структур среднего размера (10—50 км в поперечнике) преобладают положительные вулканотектонические структуры, являющиеся дистанционным образом глубинных магматических

очагов; вулканно-тектонические депрессии, ограниченные дугowymi сбросами, по которым происходило проседание центральных частей структуры, заполненных преимущественно излившимися и субвулканическими фациями, и крупные интрузии гранитоидов. Размещение кольцевых структур нередко контролируется крупными разломами (Сихотэ-Алиньское звено пояса), особенно узлами их пересечения.

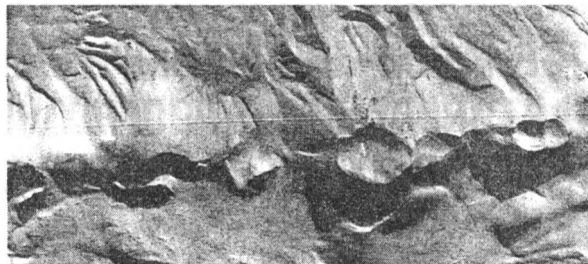


Рис. 8.16. Цепочка шлаковых конусов вдоль разрывного нарушения, перекрытого лавовым потоком. АФС. Камчатка (по Н. А. Гусеву)

Часть III

ПРИМЕНЕНИЕ АЭРОКОСМИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ ПРИ ГЕОЛОГИЧЕСКОМ КАРТИРОВАНИИ И ПРОГНОЗНО- ПОИСКОВЫХ ИССЛЕДОВАНИЯХ

Глава 9

ПРИМЕНЕНИЕ МАТЕРИАЛОВ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ПРИ ГЕОЛОГИЧЕСКОМ КАРТИРОВАНИИ

9.1. ВИДЫ ГЕОЛОГИЧЕСКИХ РАБОТ С ПРИМЕНЕНИЕМ МАТЕРИАЛОВ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ

В конце 60-х — начале 70-х гг. XX в. были разработаны и внедрены в практику новые виды региональных геологических исследований: групповая геологическая съемка, аэрофотогеологическое картирование, геологическое доизучение ранее заснятых площадей, глубинное геологическое картирование, геолого-минералогическое картирование. В объединении «Аэрогеология» были разработаны основные положения методики построения космогеологических картографических документов по данным дешифрирования материалов космических съемок. Это — космотектонические и космогеологические карты, которые не дублируют традиционные геологические карты.

Космофотогеологическое картирование (КФГК) является самостоятельным видом геологических исследований. Его

цель — расшифровка глубинного геологического строения крупного участка земной коры на основе дешифрирования материалов космических съемок с использованием результатов геофизического зондирования и ранее полученных геологических материалов. Космофотогеологическое картирование обычно сопровождается относительно небольшим объемом полевых геологических и геофизических наблюдений с целью сбора материалов о поверхностном геологическом выражении наиболее типичных космогеологических структур, но основной объем информации получают при дешифрировании МДЗ. При этом большая часть времени отводится на камеральный период, предшествующий полевым работам. В поле изучаются эталонные линейные, кольцевые и площадные объекты, а также объекты с неясным геологическим строением, участки несоответствия данных дешифрирования с ранее полученными геологическими и геофизическими данными. На этапе окончательного камерального дешифрирования составляются космофотогеологические карты.

Космофотогеологические карты суммируют геологическую информацию, получаемую при дешифрировании материалов космических съемок преимущественно регионального и детального уровней генерализации. Геологическая природа дешифрированных элементов изображения (космогеологических объектов) интерпретируется путем сопоставления с имеющимися геологическими материалами или предполагается по аналогии. На космофотогеологических картах изображаются в основном три основные группы объектов — линейные, кольцевые и площадные. *Линейные структуры* — это разломы разных рангов, в том числе разграничивающие тектонические и структурные блоки различных порядков или рассекающие их без существенной трансформации внутренней структуры (линеаменты). Многие разломы на основании данных дешифрирования могут получить геодинамическую характеристику. *Кольцевые структуры* разделяются на главнейшие генетические типы: пликативные, плутонические, вулканические, диапировые, импактные и др., выявляется характер выражения кольцевых структур в особенностях аномального геомагнитного и гравитационного полей, а также в рельефе и ландшафте (поднятия, депрессии, кольцевая гидросеть и т. д.). Своеобразная группа кольцевых структур отражает не вскрытые на дневной поверхности или

погребенные под молодыми осадками геологические тела (крупные массивы plutонических пород, вулканические сооружения и очаги, поднятия кристаллического фундамента платформ или складчатых зон и т. и.). *Площадные космогеологические объекты* представляют вещественно-структурные комплексы, распространенные преимущественно в горно-складчатых областях и отвечающие основным структурным этажам земной коры. Космические снимки регионального и локального уровней генерализации позволяют вести прямое картирование сочетаний формационных типов горных пород со степенью и характером их дислоцированности. Например, для континентальных вулканических формаций известково-щелочного ряда характерны вулканотектонические кальдерные и вулканоплутонические структуры; в зеленосланцевых толщах, как правило, развиты изоклиная складчатость или чешуйчато-надвиговые структуры; офиолитовые толщи характеризуются шарьяжными и олистостромовыми структурами с протрузиями серпентинитов и т. д.

Площадные космогеологические объекты в платформенных регионах, образуемые вещественно-генетическими подразделениями верхней части чехла плит, как правило, связаны с геолого-геоморфологическим строением недислоцированных осадочных отложений и не раскрывают глубинной структуры платформенного чехла и кровли складчатого фундамента. Поэтому для территорий плит предлагается построение карты рыхлых отложений осадочного чехла (по данным дешифрирования площадных космогеологических объектов и геолого-геоморфологической и неотектонической их интерпретации) и карты по результатам дешифрирования линейных и кольцевых космогеологических объектов на основе тектонической интерпретации геолого-геофизических данных о глубинной структуре плит. Рыхлые четвертичные отложения расчленяются по генетическому принципу.

Для обозначения характера дислокаций стратифицированных горных пород рекомендуется применять цвет, а вещественных комплексов, в которых дислокации проявлены, — крап. Плутонические (нестратифицированные) комплексы на космогеологических картах разделяются по составу. Кроме того, отражается (различными типами «матрасной» окраски) соотношение плутонических пород с вмещающими их структурно-вещественными комплексами.

При составлении космогеологических карт дешифрирование ведется от общего к частному. Вначале проводится районирование территории с выделением крупных площадных объектов, протяженных линеаментов и кольцевых структур. Затем в пределах фотополей выделяются линеаменты и кольцевые структуры различных рангов, структурно-вещественные комплексы горных пород. При дальнейшей детализации используют снимки с высоким пространственным разрешением. Космогеологические карты содержат наряду с известной геолого-геофизической информацией принципиально новые сведения и более полно, чем традиционные геологические карты, отражают глубинное строение земной коры и поверхностной геологической структуры.

Космотектонические карты строятся с целью отразить новую интерпретацию тектонического строения региона на основе новых данных, полученных при дешифрировании материалов космических съемок. В основе легенд космотектонических карт лежат легенды тектонических карт изучаемого региона, которые дополняется условными знаками, отражающими линейные, кольцевые, дуговые структуры (как правило, ранжированные по их геологическому значению), а также некоторые геофизические данные, отражающие глубину проникновения дешифрированных структур в земную кору. Для построения космотектонических карт масштаба 1 : 5 000 000 — 1 : 2 500 000 рекомендованы космические снимки континентального уровня генерализации.

Аэрофотогеологическое картирование (АФГК) основано на геологической информации, полученной преимущественно дистанционными методами. АФГК средних масштабов проводилось на территориях с простым геологическим строением, где главными объектами дешифрирования выступали литолого-генетические комплексы четвертичных отложений и слабо дислоцированные породы осадочного дочетвертичного чехла. Основными материалами служили мелко- и отчасти среднемасштабные АФС. Заверка данных дешифрирования осуществлялась с помощью геофизических методов и бурения. Помимо традиционной для геологических карт нагрузки, на аэрофотогеологических картах нашли отражение разрывные нарушения и кольцевые структуры, не выходящие на земную поверхность.

Групповая геологическая съемка (ГГС) ориентирована на относительно простые по строению территории, где не требуется густая сеть наземных маршрутов. Значительный объем информации получается на основе дешифрирования МДЗ, а полевые работы планируются с учетом степени дешифрируемости, сложности геологического строения и размещения признаков полезных ископаемых.

Глубинное геологическое картирование (ГГК) основано главным образом на данных геофизических методов исследований, структурного и картировочного бурения, а дистанционные методы являются вспомогательными. На основе дешифрирования космических снимков создаются модели структурной основы изучаемой территории, которые анализируются совместно с геолого-геофизическими данными.

Для целей глубинного картирования В. Б. Соколова предложила нетрадиционный метод дешифрирования, базирующийся на двух дешифровочных признаках, не зависящих от ландшафтных особенностей регионов, — линиях предпочтительной ориентировки и линеаментах. Под линиями предпочтительной ориентировки понимаются границы литолого-петрографических разностей пород (рис. 9.1). Группы линий предпочтительной ориентировки со сходными «узорами» образуют изолированные поля, которые

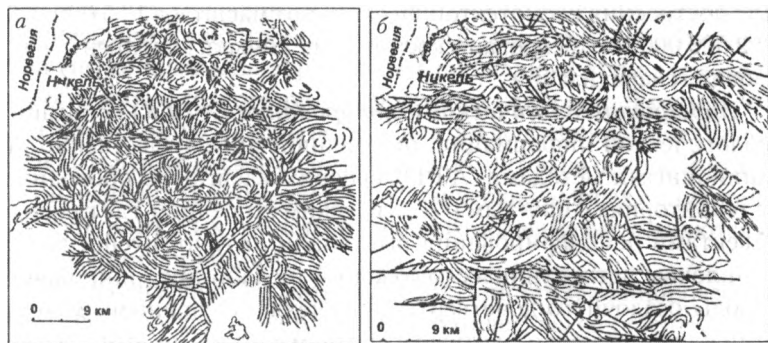


Рис. 9.1. Линии предпочтительной ориентировки (тонкие линии) и линеаменты (толстые линии) в породах кристаллического фундамента, дешифрированные по снимкам масштаба 1 : 50 000. Предположительная глубина кристаллических образований, км:
а — 12; б — 10 (по В. Б. Соколовой)

интерпретируются. Метод базируется на выявлении текстурных и структурных особенностей изображения горных пород, залегающих на глубине, по контактными отпечаткам, изготовленным из первичных (голотипных) негативов, и существенно зависит от индивидуального восприятия снимка геологом.

Геолого-минерагеническое картирование (ГМК) — выявление, изучение и картирование рудоконтролирующих факторов и поисковых признаков, определение их информативности, установление закономерностей размещения полезных ископаемых и выделение перспективных объектов. ГМК всегда специализировано в отношении определенного ведущего для региона типа оруденения. Задачами ГМК являются установление литолого-стратиграфических подразделений, интрузивных тел, складчато-разрывных деформаций, зон метаморфизма и пр., выявление связей оруденения с фотоаномалиями, установление признаков прогнозируемого оруденения (рудоносных пластов, зон метасоматоза, сгущения жил и пр.). В полевой сезон ведется обследование эталонных объектов (рудных зон, полей, месторождений), участков с известными проявлениями, ореолами, потоками рассеяния полезного ископаемого. При проведении геолого-минерагенического картирования используются многозональные снимки и применяются различные методики их обработки.

Геологическое доизучение площадей заложения сверхглубоких и глубоких скважин (ГИП) представляет собой специализированные среднемасштабные региональные геологические исследования, которые проводятся с целью выбора мест заложения сверхглубоких и глубоких скважин. В основе работ — комплексный анализ дистанционных и геолого-геофизических данных.

9.2. ДИСТАНЦИОННАЯ ОСНОВА ГЕОЛОГИЧЕСКИХ КАРТ НОВОГО ПОКОЛЕНИЯ

Итоговым документом исследований, концентрирующим все геологические данные, являются геологические карты. В настоящее время при создании Государственных геологических карт наряду с геофизической и геохимической информацией обязательно используются материалы дистанционного зондирования,

которые позволяют повышать информативность, обзорность и достоверность геологических карт. С помощью МДЗ и на их основе составляется дистанционная основа карт геологического содержания.

Дистанционная основа (ДО) — это информационный продукт, созданный по МДЗ, результатам их формализованных преобразований, дешифрирования и интерпретации, используемый при составлении геологической и других карт, входящих в комплекты Госгеолкарты-1000/3 и Госгеолкарты-200/2. ДО представляется в цифровой форме, в том числе в виде, пригодном для распечатки, соответственно в масштабах 1: 500 000 или 1:100 000 цветных композитов видимого и инфракрасного диапазонов спектра. Анализ МДЗ должен быть целенаправленным на выявление тех объектов, которые должны быть показаны на карте в соответствии с Требованиями к ДО-1000/3 и ДО-200/2, которые регламентируют содержание, основные методические и технологические аспекты создания ДО Госгеолкарт нового поколения. Требования к ДО-200/2 обязательны при проведении геологической съемки, а также при составлении Госгеолкарты масштаба 1 : 200 000 без полевых работ; при геологическом доизучении ранее заснятых площадей; среднемасштабном глубинном геологическом картировании и геолого-минерагеническом картировании масштаба 1 : 200 000. Требования дополняют инструктивные и методические документы по подготовке Госгеолкарт и обязательны для всех организаций и предприятий, осуществляющих эти работы.

ВЫБОР МАСШТАБНОГО РЯДА ИЗОБРАЖЕНИЙ

МДЗ, используемые для создания дистанционных основ, должны удовлетворять требованиям обзорности, т. е. охватывать значительные территории, и детальности, при которой на снимках будут отражены минимальные по размеру объекты картографирования заданного масштаба, а также должны быть представлены в нескольких информативных спектральных каналах. Наиболее информативные каналы съемки для решения конкретных задач выявляются в процессе дешифрирования и интерпретации ДО. Геологические объекты в разных каналах съемки имеют различную выразительность, что зависит от их отражательной способности в соответствующих диапазонах съемки, наличия косвенных индикаторов и ландшафт-

ной обстановки, в которой находятся эти объекты. В общем случае для структурного дешифрирования наиболее информативны съемки в ближнем инфракрасном диапазоне, специфика растительности лучше проявляется в видимом и ближнем инфракрасном, а почв и горных пород — в среднем инфракрасном диапазоне. В тепловом (дальнем инфракрасном) диапазоне фиксируются объекты, отличающиеся по температурным и излучательным характеристикам. Сезон съемки должен обеспечивать лучшее изображение природных индикаторов картируемых объектов.

В зависимости от масштаба составляемых карт используются МДЗ различных уровней генерализации. При составлении тематических карт рекомендуется использовать МДЗ как основного масштабного уровня, который соответствует масштабу карты, так и более обзорного, а на часть территории с наиболее сложным геологическим строением — более высокого разрешения. Эти три уровня генерализации МДЗ: обзорный, рабочий (в котором проводится исследование) и детальный, должны изменяться в 2,5–4 раза. Так, для рабочего масштаба 1 : 1 000 000 обзорные снимки будут масштаба 1: 2 500 000, а детальные — 1 : 250 000. Пространственное разрешение МДЗ при создании ДО-1000/3 хотя бы для одного из каналов съемки должно быть не хуже 80 м, а для масштаба 1 : 200 000 — 15 м.

Для формирования необходимого масштабного ряда можно использовать снимки, полученные с разнорельефных летательных аппаратов. Но, как известно, материалы из разных источников усложняют процесс их пространственной привязки и яркостной коррекции, а кроме того, при этом необходимо применять различные алгоритмы обработки. Поэтому предлагается другой способ формирования базы данных, который используется НИИКАМ при подготовке ДО для Госгеолкарты-1000. В качестве исходных МДЗ выбираются такие изображения, разрешение которых может обеспечить работу на детальном уровне. Другие уровни генерализации получают за счет «загрубления» изображения. Но этот подход приемлем только для цифровых изображений, позволяющих при компьютерной обработке преобразовывать пространственное разрешение без потери информации. Оптимальное пространственное разрешение материалов основного масштабного уровня ДО Госгеолкарты-1000/3 составляет, как правило, 80–100 м.

Базовыми материалами для формирования фактографической части дистанционной основы (ДО-200) являются материалы съемочной системы МК-4 в спектральных диапазонах 0,52-0,57; 0,64-0,69; 0,81-0,9 мкм. Материалы съемочных систем КАТЭ-200 и/или КФА-1000 используются как дополнительные или в качестве исходных, если отсутствуют материалы съемок МК-4 на данную территорию. Для основного масштабного уровня в качестве дополнительных должны использоваться материалы фотографической съемочной системы ТК-350 и сканерной МСУ-Э. КС обзорного масштабного уровня должен покрывать территорию не менее 2-3° по долготе и 1-2° по широте, в центре которой обязан располагаться соответствующий лист Гостеолкарты-200. Рекомендуются материалы масштаба 1: 1 000 000, полученные съемочными системами МК-4, КАТЭ-200 или ТК-350, а также МСУ-СК, NOAA AVHRR и др. Использование материалов *детального масштабного уровня* не носит обязательного характера. Дополнительно могут быть использованы другие МДЗ (видимой, инфракрасной и радиоволновой зон спектра электромагнитных волн, а также материалы ретроспективных аэрокосмических съемок).

Материалы космических съемочных систем и аэросъемок, рекомендуемые к использованию при создании ДО-1000/3, приведены в табл. 9.1, а при создании ДО-200/2 — в табл. 9.2.

Таблица 9.1. Материалы космических съемочных систем и аэросъемок, рекомендуемые к использованию при создании ДО-1000/3. По «Требованиям к дистанционным основам Гостеолкарты-1000/3 (ДО-1000/3) и Гостеолкарты-200/2 (ДО-200/2)»

Системы съемок	Масштабный уровень		
	основной (1: 1 000 000)	обзорный (1: 2 500 000 и мельче)	детальный (1: 200 000 и детальнее)
Landsat ETM+	XXX	XXX	XX
Landsat TM	XXX	XXX	XX
Terra Aster	XX	X	XX
Gbers-1	XX	X	XX
МК-4	X	X	XXX

Системы съемок	Масштабный уровень		
	основной (1: 1 000 000)	обзорный (1: 2 500 000 и мельче)	детальный (1: 200 000 и детальнее)
МСУ-Э	X	-	-
КАТЭ-200	X	XX	X
ТК-350	X	X	X
КФА-1000	X	X	XXX
МСУ-СК	-	X	-
NOAA AVHRR	-	X	-
JERS-1 (в оптиче- ском диапазоне)	XX	X	XX
Terra MODIS	-	XX	-
Landsat MSS	X	X	-
Adeos	X	X	X
IRS	X	X	X
SPOT	X	X	X
ERS-2	-	X	-
Аэрофотосъемка (фотографическая, сканерная, радио- локационная)	X	X	XX
Космические (Radarsat, Алмаз 1А, SIR-C, JERS-1 и др.) и авиацион- ные радиолокаци- онные съемки	X	X	X

Примечание. XXX — материалы, рекомендуемые в качестве базовых; XX — дополнительные материалы, которые могут использоваться в качестве базовых; X — дополнительные материалы.

Таблица 9.2. Материалы космических съемочных систем и аэросъемок, рекомендуемые к использованию при создании ДО-200/2. По «Требованиям к дистанционным основам Госгеолкарты-1000/3 (ДО-1000/3) и Госгеолкарты-200/2 (ДО-200/2)»

Системы съемок	Масштабный уровень		
	основной (1 :200 000)	обзорный (1:1000 000)	детальный (1 :50 000 и детальнее)
Landsat ETM+	XXX	XXX	XX
Terra Aster	XXX	X	XX
Gbers-1	XXX	X	XX
Landsat TM	XX	XXX	X
JERS-1 (в оптическом диапазоне)	XX	X	XX
МК-4	X	XX	XX
МСУ-Э	X	-	-
КАТЭ-200	X	XXX	X
ТК-350	X	X	XX
КФА-1000	X	X	XXX
МСУ-СК	-	X	-
NOAA AVHRR	-	X	-
Terra MODIS	-	X	-
Ресурс-ДК1	-	-	X
Landsat MSS	X	X	-
Adeos	X	X	X
IRS	X	X	XX
IKonos-2	-	-	X
Quick Bird	-	-	X
OrbView3	-	-	X

Системы съемок	Масштабный уровень		
	основной (1:200 000)	обзорный (1:1000 000)	детальный (1:50 000 и детальнее)
SPOT	X	X	X
ERS-2	-	X	
KBP-1000	-	-	X
КФА-3000	-	-	X
Аэрофото- съемка (фото- графическая, сканерная)	X	X	XX
Космические (Radarsat, Ал- маз 1А, SIR-C, JERS-1 и др.) и авиацион- ные радиоло- кационные съемки	X	X	X

Примечание. XXX — материалы, рекомендуемые в качестве базовых; XX — дополнительные материалы, которые могут использоваться в качестве базовых; X — дополнительные материалы.

СОСТАВНЫЕ ЧАСТИ ДИСТАНЦИОННОЙ ОСНОВЫ ГОСГЕОЛКАРТЫ

Дистанционная основа состоит из двух частей: фактографической и интерпретационной.

Фактографическая часть дистанционной основы представляет собой единое цифровое изображение (мозаику нескольких снимков) на территорию номенклатурного листа в трех спектральных диапазонах, цветное синтезированное изображение по трем спектральным диапазонам и набор формализованных обработок. Таким образом, она включает, во-первых, *нормализованные МДЗ* (одного или нескольких диапазонов) в цифровой и аналоговой формах. Нормализация материалов предусматривает трансформирование в картографическую проекцию и геодезическую систему топогра-

фической основы листа Госгеолкарты-200 и/или Госгеолкарты-1000, монтаж отдельных снимков в единое изображение и координатную привязку, а также геометрическую и радиометрическую коррекции исходных снимков. Этот процесс выполняют специальные организации, и поэтому потребителю могут предоставляться МДЗ, прошедшие предварительную обработку.

Фактографическая часть дистанционной основы включает, кроме того, *результаты преобразований нормализованных МДЗ* по всей территории и/или ее фрагментам, осуществляемые с помощью компьютерных программ. Формализованные преобразования МДЗ представляют собой контрастирование, межканальные, цветовые преобразования (RGB), классификации (с обучением и без него), различного рода пространственно-частотные фильтрации, которые осуществляются компьютерными средствами по всей площади ДО или ее фрагментам (отдельным снимкам или их частям, из которых формируется ДО). Эти преобразования должны быть направлены на выявление трудно дешифрируемых объектов, подчеркивание тех признаков, которые могут быть индикаторами геологического строения и экологического состояния природной среды. Тематическая обработка предусматривает преобразования структуры изображения и спектральных характеристик МДЗ.

Как правило, исходные изображения представлены в виде отдельных спектральных каналов. Информативные изображения получают путем различных комбинаций трех зон (R, G, B), позволяющих получать цветные изображения. Красная, зеленая и синяя зоны создают композицию истинного цвета, привычного для невооруженного глаза. Ближняя ИК, красная и зеленая зоны создают композицию ложного цвета (например, растительность изображается красным, а вода — темно-синим или черным цветом). Средняя ИК, ближняя ИК и зеленые зоны создают композицию псевдоцвета, где цвет не соответствует естественному (например, дороги могут быть красными, вода — желтой и пр.). Выбор формализованных преобразований определяется типом составляемой карты (геологическая, полезных ископаемых, четвертичных отложений, эколого-геологическая и пр.) и ландшафтно-геологическими условиями территории. Геологическая информативность цифровых моделей синтеза каналов МДЗ зависит от геолого-ландшафтных условий. Наиболее информативна она, как показывает опыт НИИКАМ, для

покровно-складчатых сооружений и в меньшей мере — для щитов платформ.

Для построения сводной цифровой геолого-структурной модели картируемой территории используется также анализ линеаментных полей. Интересующая эксперта геологическая информация может быть более контрастно представлена при обработке геолого-структурной модели территории путем пороговой фильтрации.

Нормализованные материалы в цифровой форме и формализованные преобразования, которые использованы для выделения геологических элементов (элементы фактографической части ДО), включаются в базу данных как самостоятельные тематические слои.

Интерпретационная часть дистанционной основы. Компонентами интерпретационной части ДО являются схемы дешифрирования и схемы интерпретации результатов дешифрирования. Схемы дешифрирования отображают выделенную по изображениям информацию о линейных и площадных геологических объектах. Интерпретационные схемы составляются для всех видов карт, при создании которых используется получаемая по МДЗ информация. Они создаются по результатам анализа фактографической части основы с учетом имеющейся геологической, геофизической и другой информации. Схемы дешифрирования и интерпретации результатов дешифрирования создаются по результатам экспертного визуального и компьютерного интерактивного анализа фактографической части ДО. Такой анализ обеспечивается современными ГИС-технологиями, которые позволяют совмещать различные тематические слои.

Экспертное дешифрирование предусматривает визуальный анализ как первичных изображений разных каналов, так и разнообразных композит, подготовленных в различных программных пакетах обработки МДЗ. Дополнительную информацию о тектоническом строении изучаемой территории дает анализ цифрового рельефа.

Аналоговая форма фактографической части дистанционной основы может обрабатываться вручную. Экспертный анализ проводится независимо двумя-тремя специалистами. Составляются различные схемы: геологических границ и структурных линий, линеаментов, кольцевых, складчатых и блоковых структур, структурно-геоморфологическая и пр., которые затем сравниваются.

При дешифрировании используются прямое распознавание геологических объектов, образы которых известны исследователю, сравнение с эталонами (контрастно-аналоговый метод) и, главным образом, ландшафтные геоиндикаторы (ландшафтно-индикационный метод).

Последовательная детализация материалов дешифрирования достигается применением МДЗ разных уровней генерализации. На каждом последующем уровне генерализации увеличивается детальность геологической информации. Для уточнения ранее составленных геологических карт и подтверждения геологической природы тех элементов, которые впервые установлены по МДЗ, проводится дополнительный интегрированный анализ изображений, геологических и геофизических материалов. Использование ДО при составлении геологических карт предусматривает поэтапный анализ с другими видами геологической и геофизической информации.

На окончательных материалах результаты дешифрирования и интерпретации отражаются в принятых условных обозначениях с разделением на достоверные, подтвержденные геолого-геофизическими материалами, и предполагаемые, которые интерпретируются неоднозначно. В объяснительной записке приводятся те сведения, которые необходимы для обоснования содержания карт и выводов авторов об особенностях геологического строения, истории развития, минерализации, эколого-геологических условиях территории. Интерпретационные схемы должны составляться для всех видов карт, при создании которых используется получаемая по МДЗ информация.

Пример Госгеолкарты-200/3 приведен на рис. XII на цветной вклейке.

ДО позволяет уточнять ранее сложившиеся представления о геологическом строении территории, корректировать границы геологических тел, выявлять закономерности размещения полезных ископаемых, определять степень нарушенности современных ландшафтов, потенциально опасные для обитания и деятельности человека процессы и явления и пр.

На основе ДО Госгеолкарт могут создаваться другие карты геологического содержания, в том числе *карты четвертичных отложений* (рис. XIII на цветной вклейке), для чего объекты картирования, выделенные в результате тематического дешифрирования

и интерпретации МДЗ на подготовительных этапах, распознаются и оконтуриваются на ДО. Использование ГИС-технологий позволяет каждое стратиграфо-генетическое подразделение легенды к карте четвертичных образований отражать в виде тематического слоя. Сначала предлагается наносить наиболее выразительные фотогеологические объекты, а затем к полученному таким образом структурному каркасу карты добавлять менее выразительные объекты.

Для составления Госгеолкарты третьего поколения потребуется переход к моделированию геологических и минерагенических объектов, а также к созданию геоинформационных экспертных систем — ГИЭС. Они состоят из цифровых пакетов интегрированной геологической информации, структурированной в виде пространственно распределенных количественных характеристик, и ранжированной системы моделей, которые связывают эти характеристики со свойствами объектов. При таком подходе требуется переосмысление принципов геологического картографирования с ориентацией на формализацию этого процесса и более широкое использование информации, такой как результаты дистанционных, геохимических и геофизических съемок.

9.3. ГЕОЛОГО-ЭКОЛОГИЧЕСКОЕ КАРТИРОВАНИЕ

Геоэкологические исследования предусматривают изучение геологической среды как многокомпонентного объекта с изменяющимися во времени и пространстве свойствами. Они сопровождаются составлением геоэкологических карт, карт оценки экологического состояния, которые используются для обоснования предельно допустимых нагрузок на геологическую среду, а также прогнозирования геоэкологических ситуаций в связи с изменением природных условий и инженерно-геологической деятельностью человека. Геоэкологические карты входят в комплект обязательных карт при геологической съемке. Они содержат информацию как о природном, так и о техногенном ландшафте и связанных с ними аномалиях, а также рекомендуемые мероприятия. Такие карты важны для оперативного прогноза и контроля опасных процессов и для принятия управленческих решений.

Наиболее важными геоэкологическими факторами изменения геологической среды являются землетрясения и извержения вул-

канов. Все сильные землетрясения приурочены к крупным активным (живым) разломам, распространенным в орогенных поясах, и локализованы чаще всего в зонах активных надвигов и сдвигов и редко — в зонах активных раздвигов и сбросов. Воздействие сильных землетрясений на окружающую среду может быть значительным, хотя в большинстве случаев область, в которой происходят изменения, не превышает 100-200 км. Возможность концентрации напряжений и угроза землетрясений существуют также в активных зонах, скрытых на глубине под толщей слабодислоцированных отложений или под тектоническими покровами. При сильных и катастрофических землетрясениях в пределах активных разломов возникают многообразные сейсмогенные деформации земной коры (оползни, обвалы, гравитационно-сеймотектонические клинья, тектоно-гравитационные провалы, оседания склонов гор, земляные и каменные потоки, сели и т. д.), которые обычно хорошо проявлены на МДЗ. Последствия землетрясений разнообразны. Это разрушения жилых строений и искусственных сооружений, пожары, прорывы водохранилищ, разрывы нефте-, газо- и водопроводов, разлитие нефтепродуктов, утечка газа, выбросы вредных химических и радиоактивных веществ в окружающую среду, вследствие повреждения производственных объектов, коммуникаций, хранилищ и т. д. На ядерных объектах, опасных химических производствах, подземных газохранилищах даже слабые сейсмические толчки могут привести к критическим ситуациям.

Опосредованное влияние на изменение геологической среды оказывают медленные тектонические процессы: неотектонические опускания или поднятия, а также активизация древних разломов, в том числе погребенных, которые проявляются на космических снимках линеаментами. Изучение линеаментов ведется с помощью МДЗ. Погребенные разломы в условиях любых молодых напряжений проявляют свою активность изменением трещиноватости и проницаемости перекрывающих их отложений, что приводит к активизации экзогенных процессов.

Экзогенные процессы по характеру воздействия на эколого-геологическую обстановку разделяют на эволюционные, реализующиеся постоянно или в течение нескольких времен года (крип, выветривание, карстообразование, эрозия, суффозия, абразия, мерзлотные и озовые процессы и т. п.), эпизодические (осыпи,

лавины, сели и т. п.) и процессы, с которыми связаны глубокие и необратимые изменения природной среды (оползни, горные обвалы, провалы карстовых полостей и т. д.). Экологическое значение многих из них проявляется или усиливается в результате техногенного воздействия на окружающую среду.

Анализ по МДЗ взаимоотношений и пространственного распространения разновозрастных генетических типов отложений и форм рельефа помогает понять общие тенденции современной динамики поверхностных процессов. Для каждой природно-климатической зоны характерны свои специфические рельефообразующие процессы, связанные с активизацией техногенных факторов. Для криолитозоны характерны солифлюкционные процессы, связанные с течением грунта, морозное выветривание, термокарстовые явления; для зоны тайги — в основном эрозионно-аккумулятивные процессы, связанные с деятельностью поверхностных вод речных бассейнов и оврагообразованием; для лесостепной и степной зон характерны как эрозионно-аккумулятивные, так и суффозионно-карстовые, олово-дефляционные рельефообразующие процессы, создающие при нарушении природного равновесия кризисные экологические ситуации.

Геолого-экологические исследования обязательны при геологосъемочных работах, результатом которых являются схема эколого-геологических условий и схема оценки эколого-геологических опасностей (или схема районирования территории по эколого-геологическим опасностям). При их создании велика роль материалов дистанционного зондирования.

Схема эколого-геологических условий (СЭРУ). Согласно Инструкции по проведению геологической съемки масштаба 1 : 200 000 (1995), на схеме показываются геологические природные и техногенные объекты и процессы, которые влияют на экологическую обстановку территории. Основными элементами СЭРУ являются типы и формы рельефа, вещественный состав четвертичных отложений, геологическое строение коренных пород, которые составляют фоновую ландшафтную основу схем. Для каждого из выделенных ландшафтных подразделений дается характеристика его геохимического и геодинамического потенциала, т. е. его способности противодействовать природному и техногенному физико-механическому воздействию или геохимическому заражению и восстанавливать

свои прежние параметры и возвращаться в прежнее состояние после снятия нагрузок. СЭРУ может составляться на основе геоморфологической карты или карты четвертичных отложений, если изучаемая территория характеризуется однообразием ландшафтов или слабой техногенной нагрузкой.

На эколого-геологических схемах показывают:

- 1) природные экологически неблагоприятные (опасные) объекты (ареалы и зоны развития обвалов, осыпей, оползней, лавин, селей, оврагов, карста, термокарста, засоленных почв, заболачивания, водной, русловой, ветровой и др. эрозий и т. п.); поля развития неблагоприятных отложений и форм рельефа (например, подвижные осыпи, курумы и пр.); проявления современных глубинных эндогенных процессов (зоны сейсмичности, современного вулканизма и пр.);
- 2) техногенные объекты, нарушающие геологическую среду на глубине (карьеры, зоны фильтрации вод по подземным выработкам, закачки отработанных вод, зоны развития природных геологических процессов, возникших или усиливающихся при антропогенном воздействии и пр.);
- 3) техногенные объекты, нарушающие геологическую среду на поверхности: а) интенсивно (города, объекты открытой добычи полезных ископаемых, крупные гидротехнические сооружения и пр.); б) средней степени нарушения (места лесоразработок, геологоразведочных работ, пахотные земли, транспортные магистрали и пр.); в) малой степени нарушения (пастбищные и луговые земли и т. п.);
- 4) ареалы, зоны и потоки вредных веществ природного и техногенного происхождения и пр.

Многие объекты эколого-геологических схем хорошо проявлены на МДЗ (рис. 9.2-9.4, с сайта «Прозрачный мир»). МДЗ позволяют оценивать масштабы современных опасных эндогенных и экзогенных геологических процессов.

Схема оценки эколого-геологической опасности (СЭГО)

является, по существу, картой районирования территории по эколого-геологическим условиям (или по геологическим опасностям) и отображает экспертную оценку геолога экологической ситуации на изучаемой территории. Она оценивается по пяти градациям:

благоприятная, удовлетворительная, напряженная, кризисная и катастрофическая. Четкие критерии подобных оценок еще не разработаны, но во всех случаях должны учитываться в первую очередь интенсивность проявления опасных геологических процессов, интенсивность геохимического и радиоактивного загрязнения почвы, поверхностных и подземных вод и т. п. На эту же схему наносятся различные природоохранные рекомендации (предложения по организации заповедников, водо- и других охранных зон и т. п.), а также предлагаются необходимые ограничения хозяйственной деятельности (зоны, опасные для строительства зданий и промышленных объектов, нежелательные для лесозаготовок, участки, предпочтительные для захоронения отходов, и т. п.).

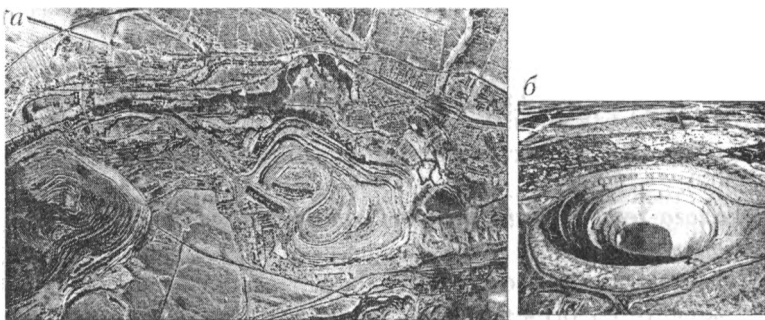


Рис. 9.2. Районы добычи полезных ископаемых: *а* — Курская магнитная аномалия, *б* — алмазоносная трубка Мир

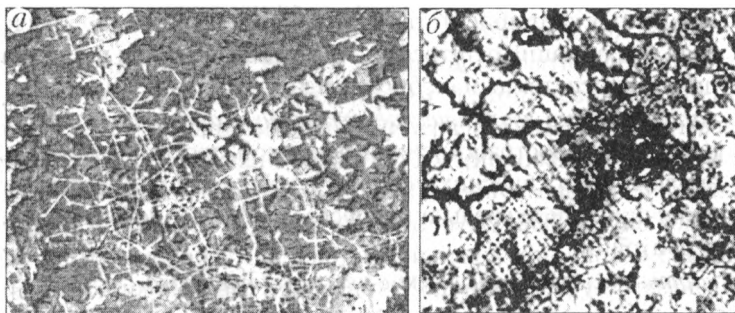


Рис. 9.3. Космические снимки районов добычи нефти (*а*) и поисков алмазов (*б*) (точки — буровые скважины). КС Landsat



Рис. 9.4. Овражно-балочная эрозия пахотных земель. Волгоградская область. 2000 г. КС IRS-1D

В настоящее время разработаны принципы составления эколого-геологических карт нового поколения (Эколого-геологические карты. Теоретические основы и методика составления. М.: Высш. шк., 2007).

Эколого-геологические карты нового поколения включают;

- *карты эколого-геологических условий* синтетические, на которых отражают всю совокупность параметров современной эколого-геологической ситуации, и аналитические, несущие информацию лишь об одной экологической функции;
- *карты эколого-геологического районирования*, также двух типов: синтетические и аналитические. В легенде этого типа оценочных карт присутствуют два блока: эколого-геологическая информация о литосфере и ее компонентах и информация об экосистемах и их биотических составляющих;
- *карты эколого-геологические прогнозные аналитические*, отражающие пространственно-временной прогноз изменения эколого-геологических условий в ходе естественной динамики природной среды и процесса хозяйственного освоения территории;
- *карты эколого-геологические рекомендательные*.

Эколого-геологические карты нового поколения составляются на основе специальных эколого-геологических исследований с использованием аэрокосмической информации.

Глава 10

ПРИМЕНЕНИЕ МАТЕРИАЛОВ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ПРИ ПРОГНОЗНО-ПОИСКОВЫХ ИССЛЕДОВАНИЯХ

Материалы дистанционного зондирования нашли широкое применение при поисках полезных ископаемых, и уже накоплен большой положительный опыт их эффективного использования. В этих целях давно применяются аэрофотоматериалы, хотя непосредственно на снимках месторождения и рудопроявления не отражаются, а выявляются лишь их косвенные дешифровочные признаки.

10.1. ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МАТЕРИАЛОВ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ПРИ ПРОГНОЗНО-МИНЕРАГЕНИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЯХ

Аэрокосмическая информация используется главным образом для выявления рудоконтролирующих структур и создания прогнозно-поисковых моделей.

ОБЪЕКТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Линеаменты. Тектоническим факторам контроля оруденения всегда уделялось большое значение. Важными объектами исследований являются разломные рудоконцентрирующие и рудоконтролирующие зоны глубинного происхождения. Идея о существовании сквозных систем разломов (скрытых линеаментов), пересекающих области с различным тектоническим строением и ответственных за размещение минерализации, разрабатывается с 40-х гг. XX в., начиная с работ В. И. Смирнова. Линеаменты выявлялись по комплексу признаков, и в первую очередь по геологическим и морфоструктурным аномалиям. В 1968 г. И. Н. Томсоном и М. А. Фаворской была сформулирована концепция сквозных *рудоконцентрирующих структур*. Под этими структурами понимаются «системы дислокаций глубокого заложения, отличающиеся длительностью и многоактностью активизации и проявляющиеся на многих участках в скрытом, завуалированном виде. Их метал-

логеническое значение заключается в том, что они... определяют размещение наиболее крупных объектов полезных ископаемых в пределах той или иной минерагенической провинции». Были определены основные признаки, отличающие сквозные рудоконцентрирующие структуры от других дизъюнктивов глубокого заложения. Структуры первого порядка пересекают не только платформы и разновозрастные складчатые системы, но и границы континенто-океана. Среди сквозных структур всех масштабов преобладают широтные и меридиональные. Они проявлены в элементах рельефа, как правило, отражаются в строении поверхности М, но не всегда имеют единую выраженность в геофизических полях. Сквозные зоны нарушений преимущественно широтного и меридионального простирания, неявно проявленные на земной поверхности, отвечают обычно структурному плану докембрийского фундамента. Они отличаются неоднородностью геологического строения, так как, заложенные в докембрии, испытывали неоднократное оживление в периоды тектоно-магматической активизации. В них локализованы рудоносные и нефте- и газonosные площади (рис. 10.1). На протяжении рудоконцентрирующих структур месторождения могут принадлежать к различным типам.

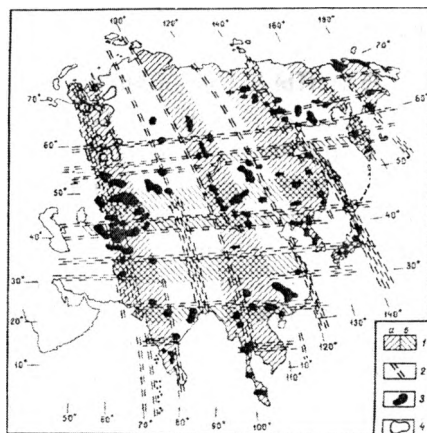


Рис. 10.1. Схема соотношений рудоносных, нефте- и газonosных площадей с ортогональной системой нарушений Азии (по М. А. Фаворской и др.):

1 — главные ортогональные системы нарушений, выявленные на основе анализа геологических данных: **а** — меридиональные, **б** — широтные; **2** — то же, по морфоструктурным данным; **3** — рудоносные площади; **4** — нефте- и газonosные площади

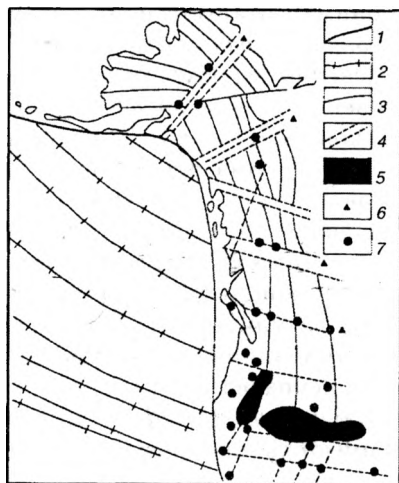


Рис. 10.3. Схема размещения крупных разломов и месторождений Кордильер Северной Америки (по И. К. Волчанской):

1 — зоны субдукции; 2 — трансформные разломы дна Тихого океана; 3 — крупнейшие линеаменты в горно-складчатом поясе Кордильер; 4 — сквозные системы нарушений; 5 — области четвертичного вулканизма; 6-7 — крупнейшие месторождения: 6 — нефтяные, 7 — рудные

В 1984 г. была составлена Космогеологическая карта СССР масштаба 1 : 2 500 000. Оказалось, что эндогенные месторождения, особенно крупные, в большинстве своем пространственно совпадают с выделенными на этой карте линеаменами. Причем связь эта отмечается не только с линеаменами меридионального и широтного, но и северо-западного и северо-восточного простираний, а также с узлами их пересечений (рис. 10.4).

Например, в Транскавказском линеаменте (4) находятся все месторождения Большого и Малого Кавказа. В Енисейском линеаменте (8), в узле пересечения его с широтными и северо-восточными линеаменами, расположены крупнейшие медно-никелевые месторождения Норильского района. В узле пересечения меридионального линеаamenta (11) с линеаменами северо-восточного и северо-западного простираний локализованы месторождения молибдена, вольфрама, золота, олова Юго-Восточного Забайкалья. Обычно одна и та же линеаментная зона проявлена на космических

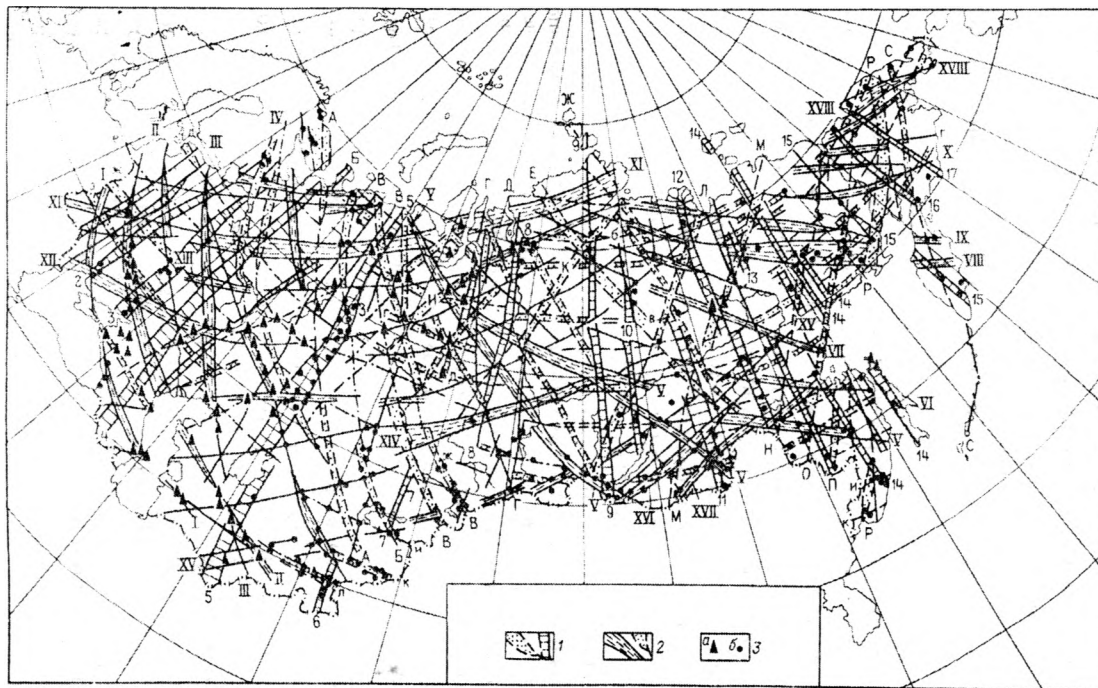


Рис. 10.4. Линеamentная сеть и месторождения полезных ископаемых СССР (по В. В. Архангельской):

1 — линеаменты ортогональной системы; 2. — линеаменты диагональной системы; 3 — месторождения нефти и газа (а) и твердых полезных ископаемых (б)

снимках прерывисто, фрагментарно, дискретно и может маркироваться разными признаками, неодинаково выраженными на всем ее протяжении. Они обычно имеют различную глубину заложения на своем протяжении и пересекают разные структурно-формационные зоны. Их минерагеническая специализация определяется особенностями минерагении той крупной геоструктурной области, которую линеамент пересекает.

Линеаментные зоны способствуют концентрации оруденения главным образом в узлах их пересечения, нередко сопровождаемых кольцевыми разломами. Это — участки аномально высокой раздробленности и проницаемости земной коры (*узлы длительной эндогенной активности*), к которым приурочены наиболее интенсивные проявления магматических и гидротермальных процессов. В них наиболее ярко выражены аномальные геологические, геоморфологические, геофизические и геохимические признаки. К ним приурочены поля даек, вулканитов, интрузивные образования различной основности, а также продукты флюидных мантийных тепломассопотоков. Узлы пересечения линеаментов нередко рудоносны на целый комплекс различных полезных ископаемых, а рудообразование в них могло проявляться неоднократно (с докембрия до кайнозоя). Чем больше линеаментов сходится в узле, тем больше месторождений в нем находится. Длительная эндогенная активность линеаментов проявляется в появлении полихронных магматических масс разного, преимущественно основного и повышенно щелочного состава. В линеаментах и особенно в узлах их пересечения соседствуют месторождения не только разных полезных ископаемых, но и разных генетических типов и возраста, что объясняется сохранением высокой проницаемости таких узлов на протяжении длительной геологической истории. Именно в них сосредоточены наиболее крупные и богатые месторождения, формирующиеся, как правило, длительное время и в несколько этапов.

Для одних рудных месторождений, приуроченных к линеаментам, устанавливается генетическая связь магматизма и оруденения, другие месторождения, ассоциирующие с магматическими породами, связаны с ними парагенетически — единством источника магмы и оруденения. Как полагают М. А. Фаворская и другие исследователи, у большинства месторождений, локализованных в линеаментах, процесс образования шел близкодновременно с магматическим,

источником руд являлись мантийные сквозьмагматические флюиды, а образование магм и рудных эманаций является результатом единого глубинного процесса, проявившегося в структурных зонах (в линейментах) в верхних этажах земной коры.

Примеры структурного контроля рудных объектов приведены на рис. 10.5 и 10.6.

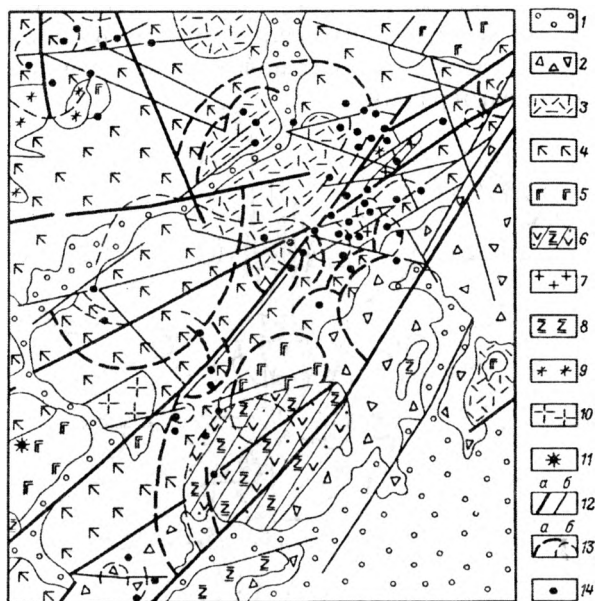


Рис. 10.5. Структурная позиция рудного узла в Анадырском секторе (по Н. И. Филатовой и А. Н. Дворянkinу):

1 — четвертичные рыхлые отложения; 2 — фундамент Охотско-Чукотского пояса (вулканогенно-терригенные юрско-раннемеловые отложения); 3-5 — меловые вулканогенные отложения Охотско-Чукотского пояса; 3 — кремнекислые вулканиды, 4 — известково-щелочные вулканиды, нерасчлененные; 5 — вулканиды субщелочные, нерасчлененные; 6 — габбро-плагиограниты и их экзоконтактные породы; 7 — раннемеловые гранитоиды; 8 — позднемеловые гранитоиды; 9 — позднемеловые граносиениты; 10 — раннемеловые габбро-плагиограниты; 11 — субвулканы показаны вне масштаба; 12 — разломы главные (а) и второстепенные (б); 13 — дуговые разломы кольцевых метасистем (а) и структур (б); 14 — рудные объекты

Кольцевые структуры также являются важным объектом современных прогнозно-поисковых работ. Они бывают различных

генетических типов и таксономических рангов и имеют разное металлогеническое значение. Каждый тип кольцевых структур имеет свой набор полезных ископаемых. Для многих кольцевых структур, особенно небольшого и среднего диаметра, устанавливается отчетливая связь с линеаментами. Статистическим анализом установлено, что рудоконцентрирующими служат кольцевые структуры, осложняющие линеаменты, или кольцевые структуры больших диаметров. Малые структуры (например, кимберлитовые трубки) контролируют только один вид полезных ископаемых, крупные структуры — целый ряд их.

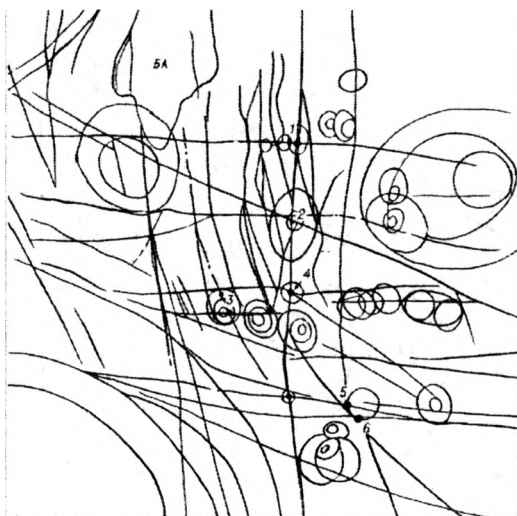


Рис. 10.6. Схема дешифрирования космического снимка Южного Урала и Мугоджар (по С. С. Шульцу)

Месторождения меди: 1 — Сибайское, 2 — Подольское, 3 — Юбилейное, 4 — Блявинское, 5 — Гайское, 6 — Приорское; БА — Башкирский антиклинорий

Нуклеары и метаморфогенные кольцевые структуры являются самыми крупными кольцевыми образованиями, вмещающими множество месторождений полезных ископаемых, нередко генетически с ними связанных (рис. 10.7). Периферические части этих структур отличаются наибольшей мобильностью, раздробленностью и пронизанностью. К ним приурочены зеленокаменные пояса, в которых

обнаружено наибольшее число месторождений железа (Пилбар, Австралия), кобальта и никеля. Например, во внешней части Алдано-Станового нуклеара локализованы крупные месторождения железистых кварцитов, а Витимо-Олекминского — месторождения асбеста и полиметаллов, генетически связанные с основными и ультраосновными породами. Во внешней части нуклеаров известны месторождения не только докембрийского возраста, но также ассоциирующие с молодыми интрузиями щелочных ультраосновных пород (например, Хета-Оленекская структура).

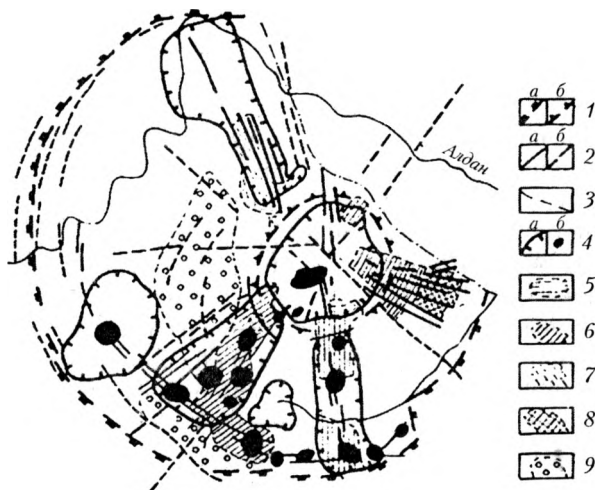


Рис. 10.7. Схема расположения рудоносных и магноактивных зон в центральной части Алданской кольцевой структуры (по В. В. Середину и И. М. Томсону):

1 — границы (а — концентрической структуры, б — ядерной части); 2 — радиальные и концентрические дислокации: а — крупнейшие (К — Каранахская, Э — Эльконская, Д — Джекондинская, Т — Томмотская, Ю — Юхтинская), б — прочие; 3 — зона скрытых разломов, выявленная по геофизическим данным; 4 — зоны концентрации магматических образований (а — их границы, б — крупнейшие массивы щелочных и щелочно-ультраосновных пород); 5-9 — зоны развития разнотипной рудной минерализации: 5 — сульфидной, б — связанной с пирит-анкерит-калиевошпатовыми метасоматитами, 7 — связанной с пирит-кварцевыми метасоматитами, 8 — молибденит-кварцевой, 9 — участки распространения россыпей

С метаморфогенными кольцевыми структурами связаны докембрийские месторождения железа, титаномагнетита, медно-ни-

келевых руд апатита, флогопита, располагающиеся по периферии гнейсовых складчатых овалов в зонах глубокого метаморфизма. В. М. Моралев и М. З. Глуховской объясняли возможность локализации оруденения в периферических частях метаморфогенных кольцевых структур процессами выноса и переотложения фемических и других элементов.

Магматические структуры. Интрузии различного состава, вулканические и субвулканические тела представляют большой поисковый интерес, так как с ними связаны многие виды важнейших полезных ископаемых. Среди них на МДЗ преобладают магматогенные структуры, которым на земной поверхности соответствуют вскрытые или не вскрытые массивы интрузивных пород, зоны влияния не вскрытых интрузивных тел на вмещающие породы, вулканические поднятия (вулканы, неки и др.) или, чаще, депрессии (кальдеры опускания, котловины) и т. д.

Магматические кольцевые структуры, как правило, не превышают в диаметре 200-300 км, причем plutонические и вулканические структуры обычно мелкие (50-70 км и меньше), а вулканоплутонические — как крупные, так и более мелкие. Располагаются магматогенные структуры изолированно и группами, часто маркируют глубинные разломы. Месторождения, генетически связанные с массивами интрузивных пород, но расположенные целиком или частично за их границами, локализуются как внутри, так и по краям магматогенных plutонических кольцевых структур, а низкотемпературные гидротермальные и скарновые месторождения попадают большей частью на периферию таких структур.

Дешифрирование на МДЗ тел гранитных плутонов дает основание для предварительных прогнозов об их химизме и рудной специфике. По данным С. С. Шульца мл., в зависимости от проекции гранитных плутонов на земную поверхность, наклона их контактов, последующих деформаций, глубины денудационного среза один и тот же гранитный массив может иметь различную форму. Но, несмотря на это, каждому геохимическому типу гранитоидных массивов соответствует не более двух-трех морфологических типов на аэро- и космических снимках. Например, крупнейшие медно-порфировые месторождения Чили, Перу, США и Мексики связаны с массивами, которые на снимках имеют всего три морфологических вида: «дракон», «пень» и «корень», близко соответству-

ющие изображения. К такому же типу относятся и многие другие медно-порфировые месторождения — Кальмакыр в Альмалыкском рудном районе Тянь-Шаня, Боцекуль и Коксай в Центральном Казахстане, Каджаран и Акarak в Закавказье. Массивы апатиноносных пород часто изображаются в виде «колец» и «бус». Специфические рисунки на снимках имеют и тела сиенит-диоритов с вольфрамовым и молибден-вольфрамовым оруденением, щелочные граниты и граниты с оловорудной минерализацией и т. д. Выявленные своеобразия морфологических типов изображения на снимках гранитных плутонов с разной рудной специализацией расширили перспективы прогноза и поиска рудных месторождений по МДЗ.

К положительным вулканическим магматогенным структурам тяготеют некоторые месторождения мышьяка, ртути, золота, особенно в зонах молодого вулканизма, а к отрицательным вулканическим структурам и вулканоплутоническим — медно-порфировые, медно-молибденовые, некоторые свинцово-цинковые и отдельные медно-колчеданные месторождения. Вулканические магматогенные рудоносные кольцевые структуры известны в Кличкинском районе Забайкалья, в Пенжинском и Анадырском регионах Камчатско-Корякского вулканогенного пояса (рис. 10.8). Изучение МДЗ вулканических областей вместе с геодинамической и петрохимической информацией позволили выявить месторождения свинцово-цинково-медных массивных руд, меди и полиметаллов, медно-цинковых в Японии, Канаде, Мексике, на Кубе, Аляске, Большом и Малом Кавказе, в Среднем и Юго-Западном Тянь-Шане, в Центральном Казахстане, на Алтае, в Приморье.

Структуры, возникновение которых обязано вертикальному давлению поднимавшихся магматических масс, называют *очаговыми* (по И. Н. Томсону, М. А. Фаворской и др.). Очаговые структуры имеют свои особенности. Они наложены на складчатые структуры и возникают в периоды автономной тектоно-магматической активизации. В центральных частях структур отмечаются гравитационные минимумы, а в периферической — зоны положительных магнитных аномалий. К ним приурочены ареалы магматических пород разной, преимущественно кислой и средней основности, близких генетически и по возрасту. В этих структурах локализованы рудные узлы, поля, районы, месторождения, причем размещение месторождений контролируется внутренними дислокациями. С кольцевыми

структурами диаметром более 350 км связана как глубинная, так и коровая поверхностная рудоносность, а с более мелкими — только поверхностная.

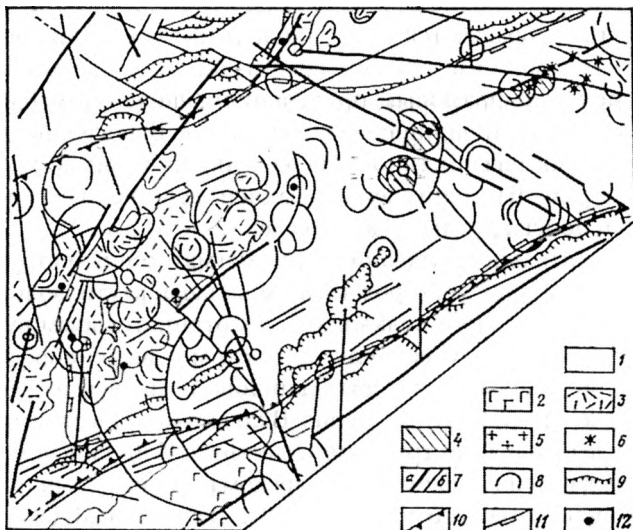


Рис. 10.8. Рудоконтролирующие структуры в Западно-Корякском секторе Камчатско-Корякского пояса
(по И. В. Егорову и Н. И. Филатовой):

1 — выступы фундамента Камчатско-Корякского пояса; 2 — вулканические породы Олюторской тектонической зоны; 3-6 — палеоген-неогеновые образования Камчатско-Корякского пояса: 3 — вулканические породы. 4 — нескрытые интрузивные массивы, предполагаемые по космогеофизическим данным, 5 — гранитоиды, 6 — экструзии и субвулканы; 7 — разломы крутонаклоненные (а — главные, б — второстепенные); 8 — дуговые разломы кольцевых тектоно-магматогенных структур; 9 — надвиги; 10 — границы Камчатско-Корякского пояса; 11 — контуры отрицательной гравиметрической аномалии; 12 — рудные объекты

Выявлены общие закономерности контроля оруденения кольцевыми структурами. Рудное вещество концентрируется (по В. В. Соловьеву): 1) во внешних или периферических контурах кольцевых структур, особенно в условиях, когда они оконтурены кольцевыми разломами или представляют собой плутоны разных размеров; 2) за контурами кольцевых структур (но вблизи них), если они окаймляются складчатыми поясами; 3) в зонах пересече-

ния кольцевых структур с пересекающими их или с сопряженными с ними разломами (или линейamentsами) различных рангов и размеров; 4) в областях интерференции (сгущения) кольцевых структур разного размера и различного генезиса; 5) в апикальных частях плутонов, отраженных в виде кольцевых структур.

МЕТОДИКА ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ОРУДЕНЕНИЯ НА ОСНОВЕ МАТЕРИАЛОВ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ

При формировании прогнозно-поисковых моделей рудоносных площадей используется комплекс разнообразных методов, и в этом ряду методы дистанционного зондирования занимают все более заметное место. С их помощью выделяются крупные тектонические ансамбли, контролирующие рудоносность крупных регионов в целом, и локальные структуры, объединяющие минерализацию определенного типа в пределах конкретных районов.

Современная методика прогнозирования на основе МДЗ, разработанная в России в НИИКАМ, базируется на принципе *поэтапного минерагенического анализа территории разных уровней генерализации*. Этот принцип реализуется путем использования разномасштабных космоструктурных прогнозных моделей. Оптимальным считается изучение региона на трех-четырех уровнях генерализации, отличающихся в 2,5-5 раз; наиболее детальный из них должен соответствовать масштабу планируемых работ. При этом исследования на каждом новом этапе должны опираться на материалы предыдущего уровня с обязательным использованием всего комплекса данных (структурных, геофизических, магматических, геохимических, неотектонических и пр.). Задачей работ на каждом уровне генерализации является изучение определенного металлогенического таксона, в результате чего в его пределах выявляются рудные объекты более детального уровня. При прогнозно-минерагенических исследованиях на основе МДЗ применяется комплекс методов. Помимо дешифрирования МДЗ, широко используются геофизические данные (карты магнитного поля, гравиметрические, результаты аэрогамма- и аэрогамма-спектрометрической съемки и др.), неотектонический анализ для выявления рудоконтролирующей роли неотектонических структур, структурно-магматический анализ.

Технология работ, разработанная сотрудниками НИИКАМ, включает следующие этапы.

Подготовительный этап предусматривает подбор, заказ и подготовку исходных МДЗ и топографических карт; трансформирование снимков в картографическую проекцию и предварительную обработку; составление сводных гравиметрических, магнитных, аэрогамма-спектрометрических и других карт; систематизацию геологических, геохимических и других материалов и минерагенических данных; выделение соответствующих таксонов.

Этап предварительной обработки данных. На этом этапе проводят дешифрирование МДЗ визуально и в интерактивном режиме; их преобразования; количественную обработку данных дешифрирования (линеаментный анализ, районирование по особенностям разрывной тектоники и розам-диаграммам, выявление криптоструктур, разделение структурно-вещественных комплексов и др.). Проводятся анализ геофизических данных, трансформирование физических полей, морфоструктурные, неотектонические и другие построения, структурный анализ карт магматических формаций и геохимических данных.

Этап первичной интерпретации. Составляются предварительные схемы основных структурных элементов (по каждому из применяемых методов), проводятся их геологическая интерпретация и корреляция с минерагеническими данными; выявляются частные факторы контроля рудоносности. Разрабатывается предварительная прогнозно-поисковая модель.

Основной этап. На этом этапе проводятся анализ развития и особенностей проявления структур на различных этапах их развития, комплексная интерпретация данных, составляются структурная сводная схема и предварительная прогнозно-поисковая модель. Осуществляется совместный анализ минерагенических данных и сводной структурной схемы, проводится ревизия известных и выявленных новых рудоконтролирующих структур и их характеристик. Составляется структурно-минерагеническая схема.

Этап построения модели предусматривает получение преобразованных материалов (МДЗ, геофизических, минерагенических и др.), извлечение дополнительной информации; уточнение структурно-минерагенической карты и разработку структурных критериев и комплексного геолого-геофизического критерия. Разрабаты-

вается промежуточная (уточнение предварительной) комплексная прогнозно-поисковая модель искомого минерагенического объекта. Выбираются способы дополнительных преобразований материалов с учетом промежуточной прогнозно-поисковой модели.

Этап оптимизации модели и окончательного прогноза. Проводятся дополнительные целенаправленные преобразования МДЗ, геолого-геофизических и других данных, коррекция промежуточных прогнозно-поисковых моделей и комплексного геолого-геофизического критерия. Составляются итоговые структурная и прогнозно-минерагеническая карты.

ПРОГНОЗНО-ПОИСКОВЫЕ МОДЕЛИ КРУПНЫХ РУДНЫХ ОБЪЕКТОВ

Наиболее рациональным методом формирования дистанционных прогнозно-поисковых моделей является изучение в материалах разного вида и детальности эталонных площадей. Одним из ведущих факторов прогнозно-поисковых моделей является *структурный контроль локализации оруденения*.

Установлено, что на *глобальном уровне генерализации* структурным фактором локализации оруденения являются кольцевые мегаструктуры диаметром 600--1000 км (например, Байкальский мегазвод с Ленской золоторудной провинцией с месторождением Сухой Лог). Крупнейшие рудные объекты расположены на участках пересечения их внешних колец с транзитными зонами глубинных разломов главным образом рифтогенного генезиса. На *континентальном уровне* для рудных областей структурным фактором являются участки транзитных зон разломов глубинного заложения, рифтогенные зоны в пределах мегакольцевых структур или секущие их. Рудные области приурочены к осевым частям линейных структур или к зонам их оперения, к местам их пересечения с внешними кольцами мегаструктур. На *региональном уровне* (рудные районы и узлы) основными структурными элементами прогнозно-поисковых моделей являются блоки с различным глубинным строением и аномально повышенной плотностью кольцевых структур поперечником до 30 км. Наиболее крупные рудные объекты расположены внутри мелких кольцевых структур, которые приурочены к высокопорядковым узлам (6-8) пересечения разломов. Для *более детальных уровней генерализации* (рудные поля) структурный контроль

различных типов оруденения более разнообразен. Это могут быть зоны смятия, складки различных порядков, фрагменты низкопорядковых структур, узлы пересечения разломов и зон трещиноватости, оперяющие разломы, трещины, очаговые структуры и пр. На МДЗ локального уровня генерализации отражаются и региональные, и детальные структуры, характеризующие рудоносные формы в пределах рудных районов и узлов. *Рудные поля и месторождения* связаны непосредственно с локальными рудоносными формами.

Реализация технологии иллюстрируется на примерах прогнозно-поисковых моделей медно-колчеданных объектов Урала, опубликованных в книге «Аэрокосмические методы геологических исследований» (2000).

Центральная часть медно-колчеданной провинции Урала, включающая средние, крупные и уникальные месторождения, на *глобальном уровне* генерализации (масштаб 1:1 000 000) контролируется субмеридиональной структурой (Главный Уральский разлом), которая трассируется линейными положительными гравитационными и магнитными аномалиями, и крупнейшей кольцевой структурой поперечником ~900 км (рис. 10.9).

Рудоконтролирующими структурными компонентами прогнозно-поисковой модели *континентального уровня* генерализации (1:2 500 000) для наиболее продуктивной Южно-Уральской рудной области являются из космогеологических: мегаблок 370x200 км со специфической решеткой транзитных разломов антиуральских направлений (45-60° и 120-130° при шаге 60-70 км), главный Уральский разлом в наиболее выдержанной по простиранию части протяженностью 300 км, локальная северо-восточная зона разломов шириной 60 км, контролирующая размещение крупных месторождений. Геофизические компоненты модели — прогибание поверхности М до 52 км при подъеме в центральной части Южно-Уральской медно-колчеданной области границы К до 12 км; крупная (160x110 км) интенсивная обособленная положительная гравитационная аномалия, продольная ось которой существенно (17°) отклонена к западу от Уральского простирания (рис. 10.10).

На *региональном уровне* генерализации (1:1 000 000) основными элементами космоструктурной прогнозно-поисковой модели *крупнейших рудных районов* Южно-Уральской медно-колчеданной области (рис. 10.11) являются: 1) крупнейшая субмеридиональная

зона интенсивных положительных гравитационных аномалий и расположенные в ее пределах меридиональные зоны разломов шириной 10-25 км; 2) транзитная для Южного Урала зона разломов запад-северо-западного простираения (Орская) шириной 70-75 км, длиной более 600 км; 3) северо-восточные локальные зоны разломов; 4) кольцевые структуры поперечником 15-28 км, являющиеся ядрами более крупных структур (диаметром 45 км); 5) область понижения магнитного поля.

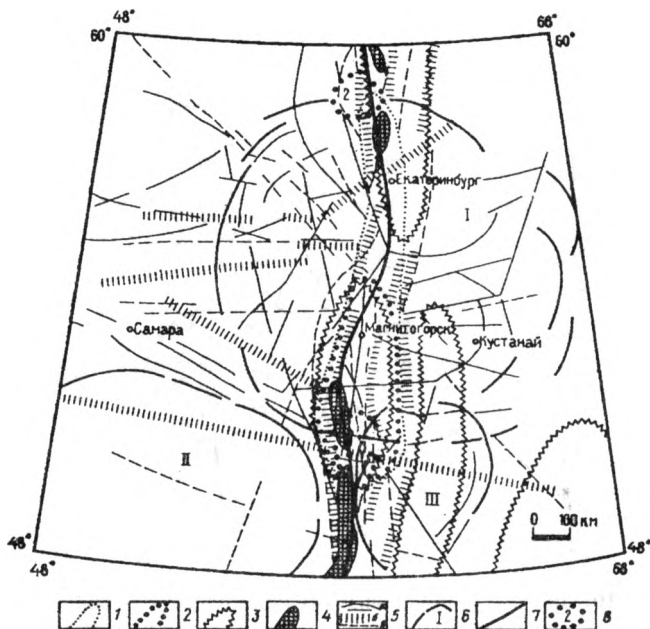


Рис. 10.9. Прогнозно-поисковая модель центральной части медно-колчеданной провинции Урала. *Глобальный уровень генерализации* (по Г. В. Гальперову, А. В. Перцову, В. С. Антипову и др.):

1 — контур центральной части медно-колчеданной провинции, включающий средние, крупные и крупнейшие месторождения; 2 — контур территории с крупными и крупнейшими месторождениями; 3 — контуры территории с глубиной залегания поверхности Мохоровичича (М) более 45 км; 4 — положительная гравитационная аномалия Урала; 5 — разломы по данным дешифрирования КС (а), гравитразведки (б) и магнитразведки (б); 6 — кольцевые структуры, выявленные по КС: Уральская (I), Прикаспийская (II), Иргизско-Ульякская (III); 7 — главный Уральский разлом (по тепловым КС); 8 — уникальные узлы концентрации крупных и крупнейших месторождений: 1 — меди, хрома, асбеста, 2 — меди, хрома, железа

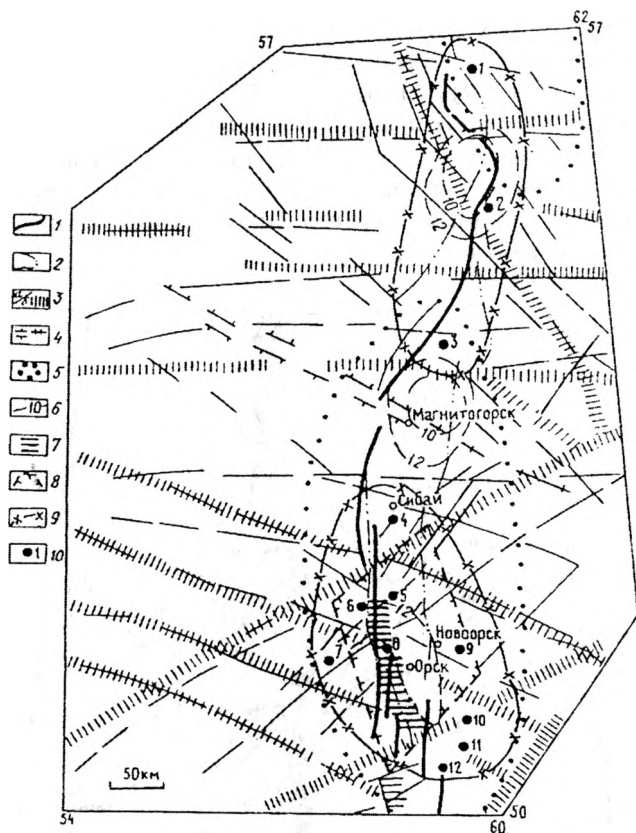


Рис. 10.10. Прогнозно-поисковые модели медноколчеданных областей Урала. *Континентальный уровень генерализации* (по Г. В. Гальперову, А. В. Перцову, В. С. Антипову и др.):

1 — Главный Уральский разлом (по данным дешифрирования КС); 2 — оси уральских гравиметрических аномалий; 3 — разломы поперечных рудоконтролирующих систем: а — по КС, б — по геофизическим данным; 4 — зона разломов — граница южного и северного рудоносных блоков; 5 — контуры территорий с глубиной залегания поверхности М более 45 км; 6 — изоглубины куполовидных поднятий кровли базальтового слоя, км; 7 — интенсивные гравиметрические аномалии; 8 — контуры блока с аномальными характеристиками гравитационного поля; 9 — контуры медноколчеданных рудных областей; 10 — наиболее значительные месторождения (1 — Дегтярское, 2 — Карабашское, 3 — Учалинская группа, 4 — Сибайское, 5 — Подольское, 6 — Бурибайское, 7 — Комсомольское и Блявинское, 8 — Гайское, 9 — Джусинское и Барсучье, 10 — Летнее, 11 — Весеннее, 12 — имени 50-летия Октября)

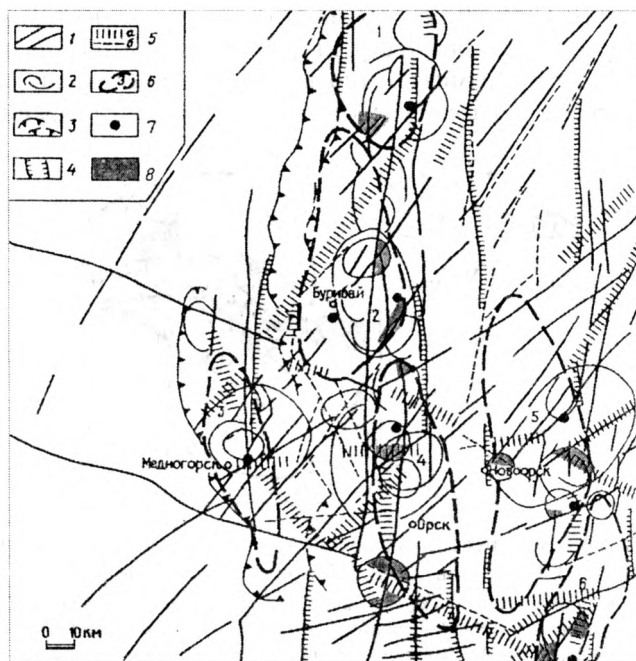


Рис. 10.11. Космоструктурные прогнозно-поисковые модели медно-колчеданных районов Южного Урала. *Региональный уровень генерализации* (по Г. В. Гальперову, А. В. Перцову, В. С. Антипову и др.):

1-3 — структуры по данным дешифрирования космических снимков и морфоструктурного анализа: 1 — главные продольные и секущие разломы, 2 — кольцевые структуры, 3 — фронтальные части надвиговых структур: а — дешифрируемые уверенно, 6 — предполагаемые; 4 — границы зон интенсивных гравиметрических аномалий уральского простирания; 5 — разломы рудоконтролирующих систем по данным гравиразведки (а) и магниторазведки (б); 6 — границы рудных районов: Сибайского (1), Баймакско-Бурибайского (2), Медногорского (3), Гайского (4), Джусинского (5), Домбаровского (6); 7 — центры наиболее интенсивного оруденения районов; 8 — прогнозные участки

В прогнозно-поисковых моделях *рудных полей и месторождений* также важен структурный контроль. Например, месторождение золота Мурунтау (Центральные Кузылкумы), по данным сотрудников НИИКАМ, находится во внешнем поясе кольцевой структуры размером по вытянутой оси ~150 км, в узле пересечения субмеридиональных и субширотных зон разломов, которые представляют собой

пологие дуги (рис. 10.12) Кроме этих факторов, месторождение контролируется кольцевой структурой простого строения диаметром 22 км и локальными (по отношению к рудному району) зонами разломов северо-восточного и северо-западного простираения.

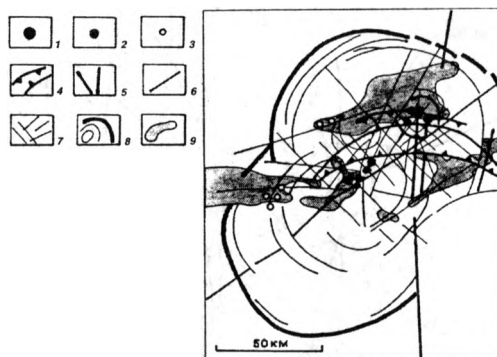


Рис. 10.12. Космоструктурная модель золоторудного района Мурунтау (по Г. В. Гальперову, А. В. Перцову, В. С. Антипову и др.):

1 — рудное поле Мурунтау; 2 — мелкие золотые и золотосеребряные месторождения; 3 — рудопроявления золота; 4 — границы ступенчатого грабена (рифта) — разломы со смещением до подошвы базальтового слоя; 5 — главная линейная зона транзитных разломов; 6 — второстепенная зона транзитных разломов; 7 — локальные зоны рудоконтролирующих разломов; 8 — кольцевые структуры; 9 — выходы пород палеозойского фундамента на поверхность

Космоструктурные прогнозно-поисковые модели золоторудных объектов Абитибид (Канада) и Витватерсранд (ЮАР) приведены на рис. 10.13. Эти модели крупных золоторудных объектов, по существу, однотипные, а потому могут быть использованы для прогнозной оценки новых площадей.

Космоструктурные и геофизические компоненты прогнозно-поисковой модели Бамского золоторудного узла приведены на рис. 10.14. Структурными факторами контроля Бамского золоторудного узла (рис. 10.15) являются сложная трехкольцевая структура концентрически-радиального строения (55x60 км), вмещающая по периферии мелкие кольцевые структуры (до 10 км в диаметре); транзитная зона разломов северо-западного простираения шириной 10-20 км, почти полностью вмещающая рудный узел; зона разломов восток-северо-восточного простираения шириной до

3 км, расположенная в главной кольцевой структуре (на пересечении ее с транзитной зоной находится Бамское месторождение).

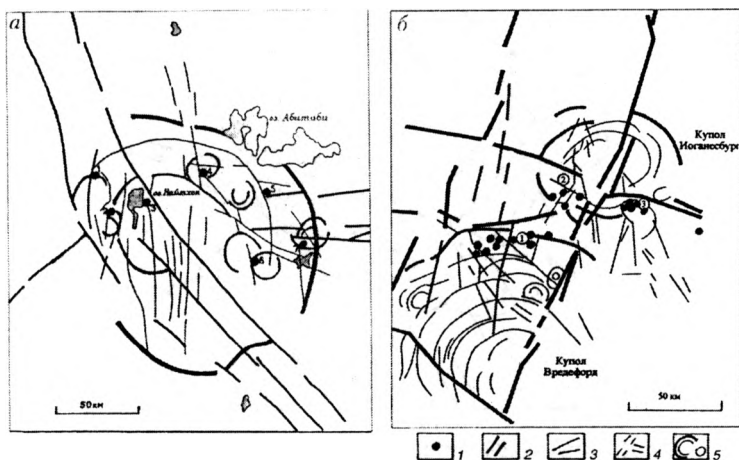


Рис. 10.13. Космоструктурные модели: а — золоторудной субпровинции Абитибий, б — золоторудного бассейна Витватерсранд (по Г. В. Гальперову, А. В. Перцову, В. С. Антипову и др.):

1 — рудные поля и месторождения; 2 — главные зоны транзитных разломов; 3 — второстепенные зоны транзитных разломов; 4 — зоны локальных рудоконтролирующих разломов; 5 — кольцевые структуры; а — рудные поля: 1 — Тимминс, 2 — Поркьюпайн; месторождения: 3 — Айварис, 4 — Холтир, 5 — Мак-Дермот, 6 — Керк-Ленд; 7 — Керр Эдисон; б — главные промышленные комплексы (в кружках): 1 — Дальний Западный Ранд, 2 — Западный Ранд, 3 — Центральный и Восточный Ранды и Хейдельберг

На каждом уровне генерализации способы решения задач прогнозирования имеют свои особенности. На региональном уровне наиболее информативными являются линеаментный анализ и выявление сводовых, блоковых, складчато-надвиговых и покровных структур; при крупномасштабных исследованиях — геоиндикационный анализ. На каждом уровне генерализации ведется изучение определенного металлогенического таксона (провинции, области, рудного района, узла), в результате чего в его пределах выявляются рудные объекты более детального уровня. Оптимизация информации, содержащейся в МДЗ, в настоящее время достигается путем создания дистанционных основ для территорий ведения прогнозных и поисковых работ.

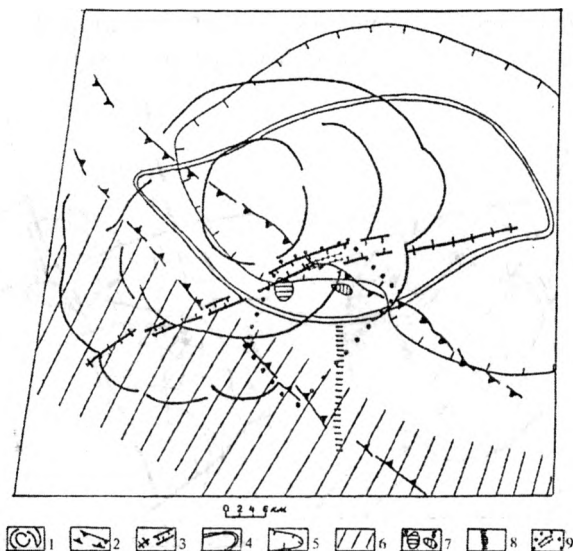


Рис. 10.14. Космоструктурные и геофизические компоненты прогнозно-поисковой модели Бамского золоторудного узла. *Локальный уровень генерализации* (по Г. В. Гальперову, А. В. Перцову В. С. Антипову и др.):

1 — сложная кольцевая структура Бамская; 2 — транзитная зона разломов; 3 — локальная зона разломов; 4 — контур крупного гравиметрического минимума интенсивностью до -20 мГл; 5 — граница крупного минимума магнитного поля интенсивностью до -200 нГл; 6 — региональная зона максимальных значений горизонтального градиента поля силы тяжести; 7 — центральные части локальных аномалий: а — гравиметрической, б — магнитного поля интенсивностью 500 нГл; 8 — локальная субмеридиональная зона максимальных значений горизонтального градиента гравитационного поля; 9 — контуры Бамского золоторудного узла и одноименного месторождения

Локальные рудоносные структуры, вмещающие рудные поля и месторождения, отличаются спектрально-геометрическими образами, типизация которых позволяет использовать эти индикационные признаки для поисков. Рудоносные блоки проявляются при различии руд и вмещающих пород по составу и по физико-механическим свойствам (рис. 10.16), особенно при тематических обработках снимков, увеличивающих контрастность их изображения. Геометрия блоков оказывается также важным критерием для оценки их перспективности. Замечено, что значительное число

рудных полей расположено в клиновидных и линейно вытянутых блоках.



Рис.10.15. Космоструктурная модель района Бамского золоторудного узла. *Локальный уровень* (по Г. В. Гальперову, А. В. Перцову, В. С. Антипову и др.):

1 — кольцевые и дуговые структуры; 2 — разломы; 3 — зоны сгущения мелких линейных элементов; 4 — контуры Бамского узла и одноименного месторождения

С целью обнаружения рудоперспективных ареалов современной активизации разработана *полихронная тепловая космическая съемка* (ПТКС), заключающаяся в специализированном выборе и обработке данных разновременных сеансов космической съемки, выполненных в тепловом (дальнем инфракрасном) диапазоне электромагнитных волн для сбора данных о радиоярких (тепловых) аномалиях поверхности Земли. С помощью ПТКС, по свидетельству В. С. Антипова, обнаружены аномалии радиоярких температур, которые контролируют размещение крупных рудных объектов России (Гайского меднорудного узла, Федорово-

Панского платинометалльного узла, Печенгского узла локализации медно-никелевых руд, Мончегорского медно-никелево-хромоплатинометалльного и Онежского уран-ванадий-благороднометалльного районов, Костомукшинского железорудного узла, района Бураковской расслоенной интрузии с месторождениями титана и хрома, золоторудных узлов Мурунтау и Кокпатас, Норильского и Талнахского медно-никелевого благороднометалльных рудных узлов, а также рудоперспективных аномалий в разных регионах).

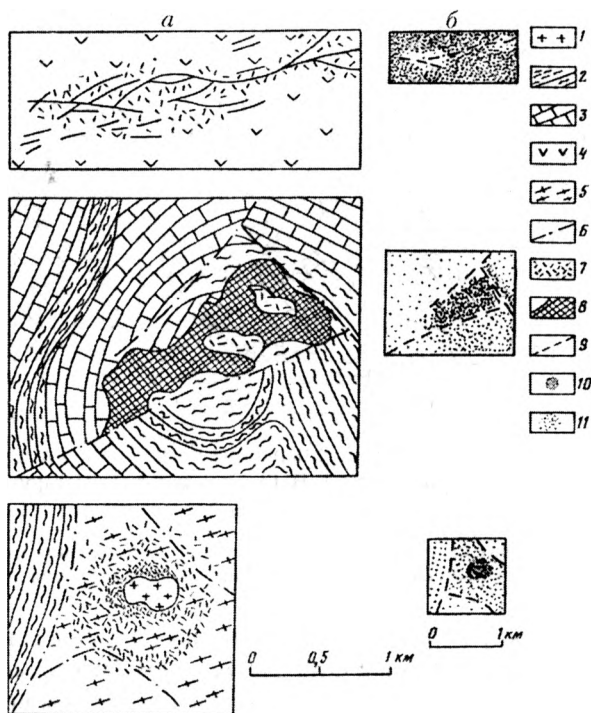


Рис. 10.16. Основные виды локальных рудоносных структурных форм земной коры в плане (а) и их спектрально-геометрические образы (б) (по Ю. Г. Сафонову и В. Д. Парфенову):

1-4 — породы: 1 — гранитоидные, 2 — осадочные терригенные, 3 — карбонатные, 4 — вулканогенные; 5 — кристаллические сланцы; 6 — разломы; 7 — участки гидротермально измененных пород; 8 — рудные тела; 9 — линейменты; 10, 11 — участки с различной отражательной способностью — от слабой (10) до сильной (11)

Для поисков месторождений полезных ископаемых применяется метод обнаружения микросодержаний элементов в атмосфере — *лидарная спектроскопия*. Эта съемка обычно проводится в комплексе с инфракрасной и радиотепловой съемками. На летательном аппарате устанавливают импульсный источник излучения (лазер) и приемное устройство для анализа спектрального состава рассеянного (или поглощенного) исследуемым веществом излучения. Эти устройства называются лидарами. Для выявления площадей, перспективных на поиски полезных ископаемых, вначале обрабатывают полигоны с хорошо изученными геотермическими и геохимическими условиями, которые дают фоновые и аномальные значения над определенными видами полезных ископаемых. Комплексование геотермической съемки, дающей возможность выделить участки и зоны прогрева, и лидарной спектроскопической съемки, позволяющей оконтуривать участки по аномальным содержаниям соединений-индикаторов в приповерхностной атмосфере, наиболее перспективно при *прямом поиске* месторождений полезных ископаемых.

10.2. ПРИМЕНЕНИЕ МАТЕРИАЛОВ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ПРИ ПОИСКАХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ АЛМАЗОВ

Практически все коренные месторождения алмазов мантийного происхождения располагаются в пределах древних платформ, или кратонов, с возрастом фундамента более 1,5 млрд лет (правило Клиффорда). Однако в последнее время открыты месторождения алмазов в краевых частях платформ и в протерозойских и верхнепротерозойских подвижных поясах. Промышленные месторождения алмазов приурочены главным образом к трубкам взрыва. Благоприятными тектоническими обстановками проявления кимберлитового магматизма многими исследователями считаются архейские кратоны в областях взаимодействия мантийно-коровых линейных структур, характеризующихся повышенными мощностями земной коры и литосферы, с рифтогенными структурами, активизированными в период кимберлитообразования. «Космические портреты» некоторых алмазоносных площадей приведены на рис. 10.17 и XIV на цветной вклейке.

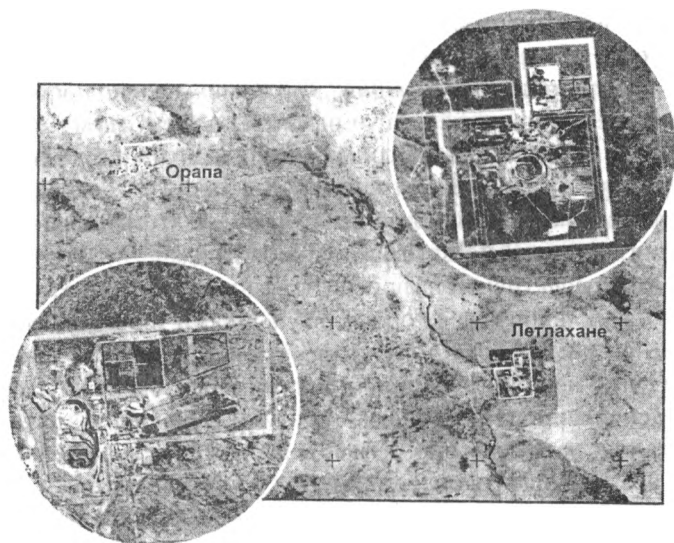


Рис. 10.17. Космический портрет алмазоносной площади Орапа — Летлахане в Ботсване (съемка 1991 г.) (по Ю. Н. Серокурову)

ОБЪЕКТЫ ДЕШИФРИРОВАНИЯ

Объектами дешифрирования МДЗ при поисках месторождений алмазов являются кимберлитовые тела и лампроитовые массивы, то есть структуры глубинного магматизма, с которыми связаны алмазы. Они иногда дешифрируются в виде небольших субизометрических тел, отличающихся, как правило, цветом на аэроснимках, если не перекрыты (рис. 10.18), и на специально обработанных МДЗ. Но обычно на закрытых территориях использование методов дистанционного зондирования для прямых поисков кимберлитов мало- или бесперспективно.

Первые результаты применения материалов радиолокационной аэросъемки при выявлении структур трубочного типа на территории Ленинградской и Новгородской областей получены В. А. Старостиным. На основе дешифрирования РЛ-снимков были (оставлены структурно-тектонические схемы, выявлены структуры, отождествляемые со структурами, связанными с кимберлитовым магматизмом, которые будут локализованы при проведении высо-

котонной аэромагнитной съемки, электроразведки и других методов. Многочастотная радиолокационная съемка особенно эффективна в залесенных заболоченных районах Северо-Запада России (рис. 10.19). Проникающая способность радиоволн позволяет «преодолевать» экранирующий эффект растительного покрова и получать информацию о свойствах земных грунтов.

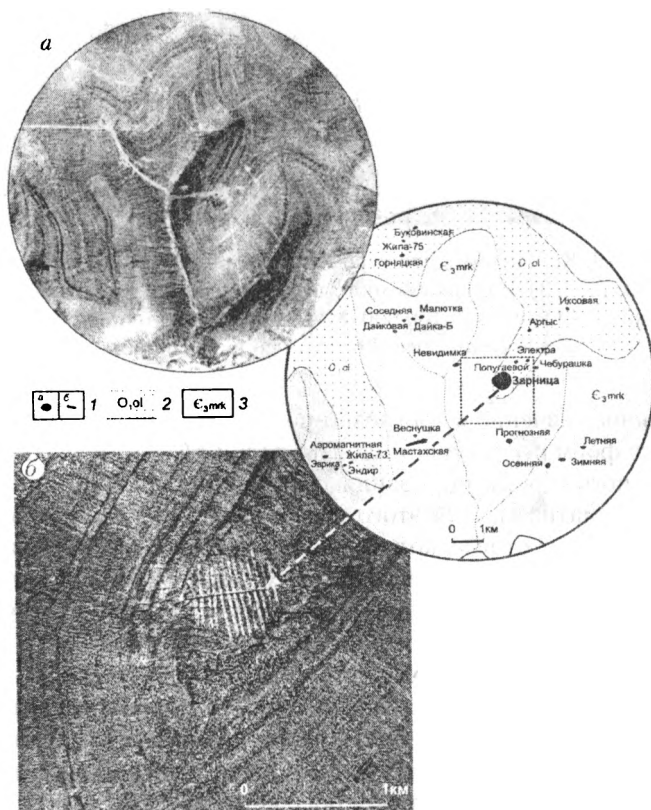


Рис. 10.18. Кимберлитовая трубка Зарница: *а* — космический снимок высокого разрешения (1986 г.), *б* — аэрофотоснимок (1956 г.), Восточная Сибирь (по Ю. Н. Серокурову и др.):

1 — кимберлитовые трубки (*а*) и дайки (*б*); 2 — олдонинская свита ордовика (доломиты с прослоями мергелей, алевролитов); 3 — морокинская свита кембрия (известняки, доломиты, мергели, аргиллиты)

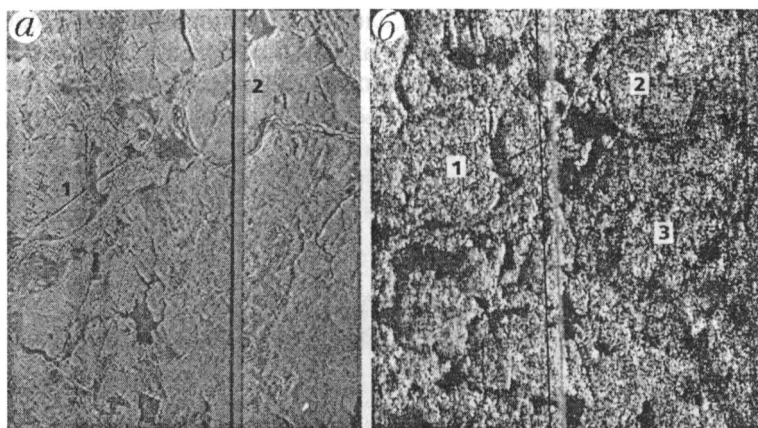


Рис. 10.19. Кольцевые структуры, соответствующие кимберлитовым трубкам (1, 2, 3). РЛ-аэроснимки сантиметрового (а) и метрового (б) диапазонов. Масштаб 1:100 000. Мощность рыхлого покрова 50-70 м. СЗ России. Зимний берег (по А. В. Перцову)

Важное значение в прогнозно-поисковых работах имеет обнаружение форм структурного контроля кимберлитов, особенности аномального структурирования участков проявления кимберлитового магматизма. Для этого привлекаются различные методы исследований — от высокоточных магнитных и гравиметрических съемок, электрических и сейсмических зондирований до дешифрирования космических снимков. Отсутствие однозначных критериев поисков источников алмазов приводит к необходимости выявления контролирующей их системы структурно-вещественных неоднородностей (иерархического ряда линейных и ареальных тектонических образований) фундамента и чехла, специфичных для каждой алмазоносной территории. В России известны три алмазоносные субпровинции с коренными и россыпными месторождениями: Якутская, Уральская, Архангельская. Несмотря на повышенный интерес и хорошую изученность кимберлитовых трубок, в вопросах их образования и структурного контроля среди геологов нет единого мнения. Поэтому при проведении прогнозно-поисковых исследований очень важны научные и модельные представления эксперта.

МЕТОДЫ ПОИСКОВ КИМБЕРЛИТОВЫХ ТЕЛ

Для выявления участков, перспективных на обнаружение кимберлитовых полей, применяются различные методы линейamentного анализа (рис. 10.20), а также специализированные обработки МДЗ, например классификации с обучением.

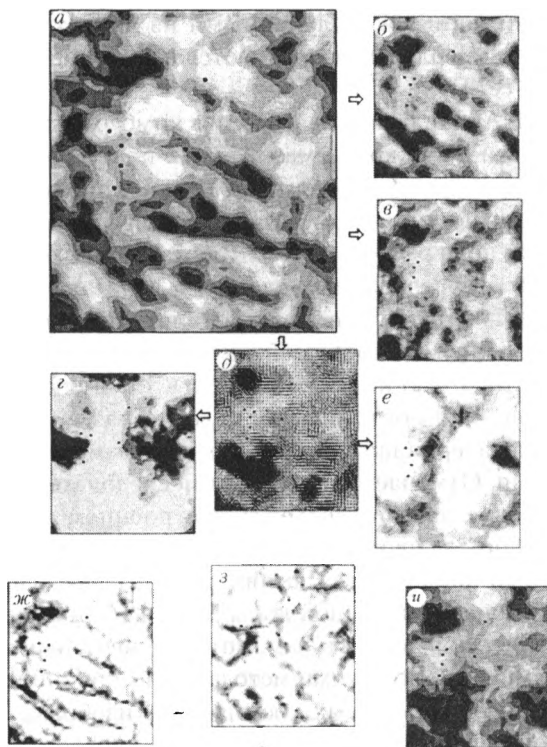


Рис. 10.20. Схемы обработки линейamentов одного из районов Западной Якутии (по Д. Г. Загубному):

a — плотность линейamentов всех направлений; *б-в* — плотность линейamentов избранных простираний; *г* — аномалии поля изотропии; *д* — векторы максимумов роз простираний линейamentов; *е* — аномалии поля анизотропии линейamentов в окне 10х10 км; *ж* — зоны, выделенные по схождению линейamentов в область диаметром 1 км в окне радиусом 3 км; *з* — градиентные зоны (окно 5 км) поля анизотропии-изотропии; *и* — сумма величины длин линейamentов, выходящих за изотропную область, рассчитанная в окне 10 км. Точки — кимберлитовые трубки

При компьютерной обработке линеаментных полей внимание обращается на аномальные участки повышенных значений плотности линеаментов, их группировку, места «обрыва» линий, пучки и узлы пересечения линеаментов, длинные прямолинейные участки градиентных зон, которые могут проявляться и в расположении экстремумов и пр. Результаты таких обработок необходимо сопоставлять с данными, полученными из других источников. Замечено, что кимберлиты располагаются на изотропных участках линеаментной сети.

Работами Г. А. Ландера с соавторами в кимберлитовых районах Архангельской и Якутской алмазоносных провинций показано, что анализ структуры линеаментных полей, дополненный морфоструктурными построениями, выявляет общую закономерность, кимберлитовые поля располагаются в бортах протяженных структур фундамента, образованных сложным сочетанием горсто- и грабенообразных структур, выделяемых по цифровым моделям предполагаемого рельефа фундамента.

Отчетливо выраженных разломов в пределах платформ немного; более распространены скрытые разломы, которые проявлены на материалах дистанционных съемок линеаментами и их зонами. Отмечаемая многими исследователями тесная корреляция современного рельефа со строением чехла и фундамента платформ позволяет использовать морфоструктурный и линеаментный анализы для выявления рельефа и структуры погребенных горизонтов земной коры. Большое внимание уделяется концентрическим структурам, которые не обнаруживаются традиционными геологическими методами, но так или иначе проявляются на преобразованных космических изображениях, при компьютерной обработке схем линеаментов, цифрового рельефа и речной сети. Так, по данным Ю. Н. Серокурова и его соавторов, одним из ведущих факторов структурного контроля кимберлитов в Далдыно-Алакитском кимберлитовом районе Якутии является радиально-концентрическая структура диаметром ~200 м (рис. XV на цветной вклейке), обусловленная глубинными процессами, связанными с разогревом верхней мантии, и расположенная в узле интерференции трансрегиональных линеаментных зон. Эта структура осложнена секущими линеаментами, среди которых

преобладают северо-западные ($320-330^\circ$), согласные с простиранием структур фундамента, и северо-восточные ($40-50^\circ$), согласные с простиранием полосы известных здесь кимберлитовых тел, и локальными концентрическими структурами меньших размеров. Концентрические структуры, пространственно контролирующие кимберлитовый магматизм на Сибирской платформе, проявлены, хотя и неявно, в современном рельефе и в новейшем структурном плане (рис. 10.21), что делает полезным неотектонический и морфоструктурный анализ при прогнозно-поисковых работах.

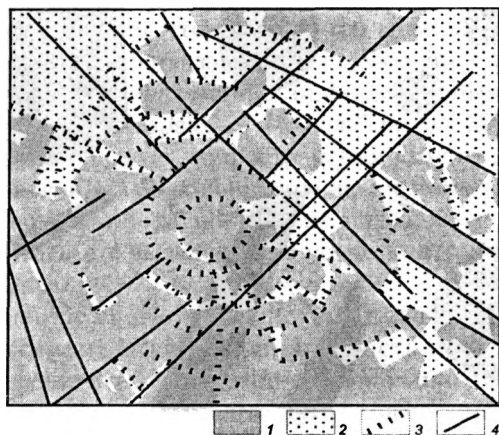


Рис. 10.21. Проявленность в новейшем тектоническом плане радиально-концентрической структуры Далдыно-Алаakitского района. Западная Якутия:

***a* — 1-2 — новейшие поднятия: 1 — умеренные; 2 — слабые; 3 — элементы структуры; 4 — секущие линеаменты**

Главными элементами сводной космоструктурной схемы Далдыно-Алаakitского района кимберлитового магматизма, по данным Ю. Н. Серокурова с соавторами, стали крупнейшие зоны линеаментов, фиксирующие линейные участки наибольшей деструкции и проницаемости земной коры, а также радиально-концентрические системы, фиксирующие следы крупных очагов активизации, функционирующих в фанерозое и влияющих на строение осадочного

чехла и современный ландшафт территории. Космоструктурные компоненты прогнозно-поисковой модели района приведены на рис. 10.22. Геофизические компоненты прогнозно-поисковой модели включают участки относительного разуплотнения коры, фиксирующиеся понижением поля силы тяжести, минимальной дифференцированности градиентов поля силы тяжести, относительного размагничивания пород фундамента по ослаблению маг-

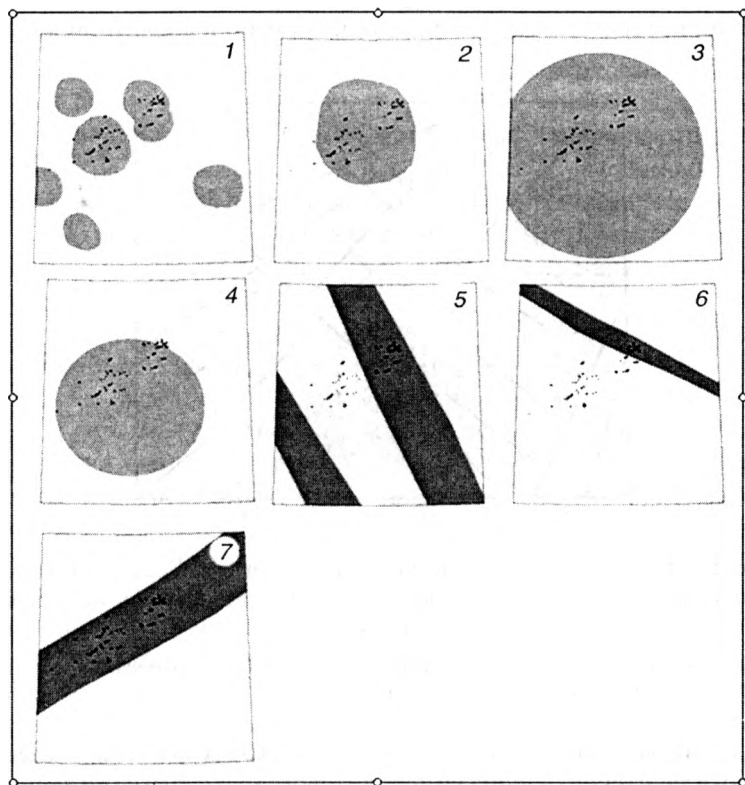


Рис. 10.22. Космоструктурные компоненты прогнозно-поисковой модели района кимберлитового магматизма, представленные отдельными слоями (по Ю. Н. Серокурову и др.):

1-3 - радиально-кольцевые структуры диаметром: 1 — ~30 км, 2 — ~80 км, 3 — 200 км, 4 — центральная (ядерная) часть структуры диаметром 200 км, 5-7 — зоны сгущения однонаправленных линейментов. Точками показаны кимберлитовые трубки

нитного поля, минимального развития высокочастотных магнитных аномалий.

Прогнозные модели распространения разновозрастных кимберлитовых тел в Западной Якутии получены Д. Г. Загубным на основе дистанционных данных (космических снимков, цифрового рельефа, речной сети) с использованием методов компьютерного моделирования. Им выявлены информативные поисковые признаки структурного контроля кимберлитовых тел. Для областей распространения палеозойских трубок характерна повышенная плотность линеаментов. Анизотропность линеаментной сети является отрицательным признаком, трубки тяготеют к изотропным областям. Установлено, что кимберлиты мезозойского и палеозойского возраста имеют различный структурный контроль, что нередко отражается в различных информативных интервалах. Кроме того, найден интервал 1-го канала снимка Modis, маркирующий основные области распространения кимберлитов. Оценка информативности признаков проводилась с помощью специализированной компьютерной программы, позволяющей определить, можно ли считать, что выделенный признак контролирует искомые объекты.

При решении прогнозно-поисковых задач объектами, для которых рассчитывается информативность поля структурных признаков, служат эталоны — месторождения или рудопроявления полезных ископаемых. Под полем признаков понимается сетка или матрица данных: цифровые или сканированные снимки, цифровая модель рельефа, геофизические и геохимические поля, результаты тематической обработки исходных материалов и данных, полученных при обработке векторных и растровых материалов (схем дешифрирования, геологических, тектонических, металлогенических и др. карт). В процессе выделения информативного интервала ориентируются на коэффициент информативности и процент попадания точек объекта в выделенный интервал (рис. 10.23). Эмпирически для информативного признака процент попадания должен быть не менее 70 %, а коэффициент информативности не менее 2 (т. е. на 35 % площади распространения признака должно приходиться не менее 70 % исследуемых объектов). Коэффициент информативности позволяет создать на его основе прогнозную статистическую модель.

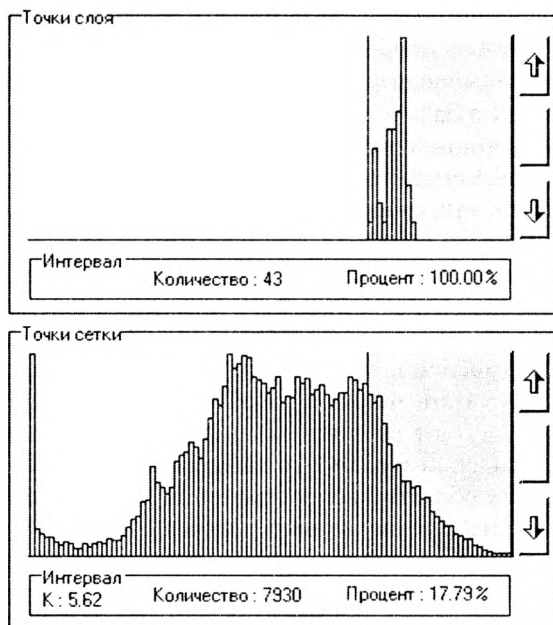


Рис. 10.23. Оценка информативности поля плотности линеаментов относительно полей палеозойских кимберлитовых трубок. Западная Якутия (по Д. Г. Загубному)

ТЕХНОЛОГИЯ РАБОТ ПРИ ПОИСКАХ АЛМАЗОВ

Обобщенная *технологическая схема работ* при прогнозе и поисках месторождений алмазов на основе МДЗ включает: создание базы знаний и банка цифровых данных (МДЗ, материалы геологических, геохимических, геофизических и ландшафтных работ); создание на основе МДЗ различного пространственного разрешения дистанционных основ на район работ; тематическую компьютерную обработку МДЗ и дистанционных основ; их комплексную интерпретацию с использованием геологических, геофизических, геохимических и ландшафтных данных; составление по этим результатам разномасштабных итоговых схем и карт (тектонического районирования алмазоносных провинций; разломной тектоники и трещиноватости; модели алмазоносных районов и полей и др.).

10.3. ПРИМЕНЕНИЕ МАТЕРИАЛОВ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ПРИ ПРОГНОЗНО-ПОИСКОВЫХ РАБОТАХ НА НЕФТЬ И ГАЗ

Нефтегазоносные территории представляют собой осадочные бассейны с равнинным ландшафтом и слабодислоцированным чехлом большой мощности (рис. 10.24). Распределение нефти и газа в осадочных бассейнах с промышленной нефтегазоносностью неравномерно, нефтегазоносные горизонты находятся на большой глубине, а залежи нефти и газа контролируются разного типа ловушками. Традиционные методы поиска залежей углеводородного сырья, включающие комплексные геологические, геофизические, научно-исследовательские работы, завершающиеся бурением скважин, очень дороги (их среднемировая стоимость на поисковом этапе составляет 3000-5000 долл./км²). Они оказываются выгодными только в условиях разведки крупных и средних нефтегазоносных структур, залегающих на небольших глубинах. Поэтому в поисковых и разведочных работах применяют многие другие подходы, в том числе анализ МДЗ. По космическим данным выполнены теоретические и методические исследования, определившие стратегию поисковых работ на нефть и газ, созданы «Тектоническая карта нефтегазоносных областей юго-запада СССР с использованием материалов космических съемок» в масштабе 1 : 500 000, «Карта нефтегеологического районирования юго-запада СССР» в масштабе



Рис. 10.24. Прикаспийский нефтегазоносный бассейн. КС

1 : 2 500 000, «Карта линеаментов территории юго-запада СССР» масштаба 1 : 1 000 000 и др.

Эффективность применения МДЗ при нефтегазопоисковых работах во многом зависит от ландшафтно-геоморфологических и структурно-тектонических условий, от степени изученности ландшафтных индикаторов геологического строения и может быть высокой, умеренной, а в некоторых регионах возможности дистанционных методов могут быть существенно ограниченными. К первой категории относятся такие бассейны, как Тимано-Печорский, Мангышлакский, Каракумский, Предверхооянский и др.; ко второй категории — Днепрово-Донецкий, Волго-Уральский, Западно-Сибирский, Южно-Тургайский, Прикаспийский бассейны и др.; к третьей — Московский, Предкопетдагский, Тунгусский, Западно-Камчатский и др.

ОБЪЕКТЫ ДЕШИФРИРОВАНИЯ

Основными объектами дешифрирования, которые могут контролировать нефтегазонасность, являются структурные элементы различных рангов и типов: блоковые и разрывные структуры фундамента и осадочного чехла. Особая роль принадлежит кольцевым структурам. Выявлено, что многие месторождения нефти и газа Западной Сибири, месторождения газа Лено-Вилуйской газонасной провинции и других нефтегазонасных бассейнов приурочены к тектоногенным структурам — сводам, валам, синеклизам. Тектонические неоднородности глубоких горизонтов чехла и фундамента проявляются благодаря влиянию неотектонических движений, уплотнению, проседанию и трещинообразованию в отложениях, перекрывающих нефтегазовые резервуары.

Прямое отражение структуры глубоких горизонтов в современном тектоническом строении наиболее характерно для участков плит с относительно неглубоко погруженным фундаментом и в складчатых регионах. Но эти соотношения могут быть сложными: неотектоническому поднятию могут соответствовать выступ фундамента и прогиб в осадочном чехле или новейшей впадине соответствует поднятие в осадочном чехле и пр. На подвижки блоков фундамента и чехла реагирует ландшафт (рис. 10.25). Поэтому ведущую роль при дешифрировании нефтегазонасных структур играет геоиндикационный анализ. В развитии ландшафт-

но-индикационного метода дешифрирования МДЗ применительно к поискам нефтегазоносных структур большая роль принадлежит В. И. Астахову, В. И. Башилову, Ю. Н. Гололобову, А. А. Кирсанову, Б. Н. Можаяеву, В. Г. Можаяевой, И. О. Смирновой и др.

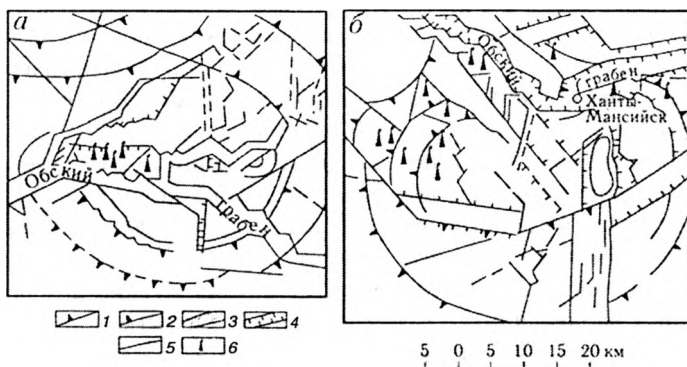


Рис. 10.25. Схема тектонического строения Вартовской (а) и Ханты-Мансийской (б) кольцевых структур (по Г. С. Бурлаковой):

- 1 — контуры и дуговые валы кольцевой структуры с обращенным рельефом;
 2 — контуры и дуговые валы кольцевой структуры, прямо выраженной в рельефе;
 3 — дуговые, радиальные и диаметральные грабены; 4 — структурные ступени;
 5 — линеаменты; 6 — месторождения нефти

Индикаторы *локальных структур*, перспективных для промышленных скоплений нефти и газа, в зависимости от ландшафтно-климатических зон, в которых расположены крупные седиментационные бассейны, разные. Месторождения нефти и газа приурочены к ловушкам структурного типа (складки осадочного чехла), экранированным (приразломным) и ловушкам смешанного типа (структурно-литологическим, структурно-тектоническим и т. д.).

Многочисленные исследования показали, что отдешифрированные объекты могут полностью соответствовать нефтегазоносной структуре или быть значительно больше по размеру, а месторождения оказываются приуроченными к локальным структурам на их периферии. Образование последних Д. М. Трофимов объясняет наличием крупных плутонов или сводов, в бортах которых формируются системы локальных поднятий, являющихся ловушками углеводородов. Природа аномалий выявляется на основе комплексного

анализа имеющихся на данную территорию геологических, геофизических, геохимических, гидрогеологических и других материалов.

Наиболее уверенно дешифрируются структуры осадочного чехла (складки, соляные купола), которые развиваются унаследованно и активны на новейшем и современном этапах развития земной коры. Одними из основных индикаторов таких структур являются рисунок эрозионного расчленения и мелкие формы рельефа (озера, болота, камы, песчаные гряды, таковы, солончаки и пр.), создающие ландшафтные аномалии (рис. 10.26).

Применение дистанционных исследований эффективно даже для начальных стадий зарождения локальных поднятий в рельефе аккумулятивных равнин, при ничтожно малых уклонах, не находящих отражения в горизонталях детальных топографических карт и остающихся, как правило, незамеченными во время непосредственных наблюдений. В таких условиях надежным индикатором локальных поднятий являются местные изменения характера экзогенных процессов на участке зарождающейся возвышенности. Эти изменения обусловлены многими факторами, но главным образом типом денудационных процессов и климатическими условиями. Неотектонический анализ МДЗ занимает важное место при поиске перспективных локальных структур (рис. 10.27).

Известны примеры крупных нефтегазоносных структур — нефтегазоносных областей или бассейнов, проявленных кольцевыми объектами на космических снимках. Такие мегаструктуры обычно характеризуются концентрическим планом расположения нефтегазовых месторождений. Это прежде всего Прикаспийский нефтегазоносный бассейн, окруженный по периферии «бортовым уступом», к погружаемому крылу которого приурочена цепь газовых, газоконденсатных и нефтяных месторождений в обширных поднятиях подсолевого палеозоя. В центральной же части бассейна располагаются нефтяные месторождения в надсолевом мезозойском комплексе, связанные с солянокупольными структурами.

Разрывы — это каналы миграции флюидов. Они способствуют образованию трещинных резервуаров и органогенных ловушек, часто экранируют залежи и в то же время иногда разрушают их. Поэтому изучение разрывов чрезвычайно важно при поисковых работах на нефть и газ. Обычно локальные поднятия и месторождения углеводородов располагаются либо над разломами, в непосредствен-

ной близости от них, либо в местах их пересечений. Надвиговые и принадвиговые антиклинали как правило выражены узкими валлообразными положительными формами рельефа, ограниченными зонами трещиноватости.

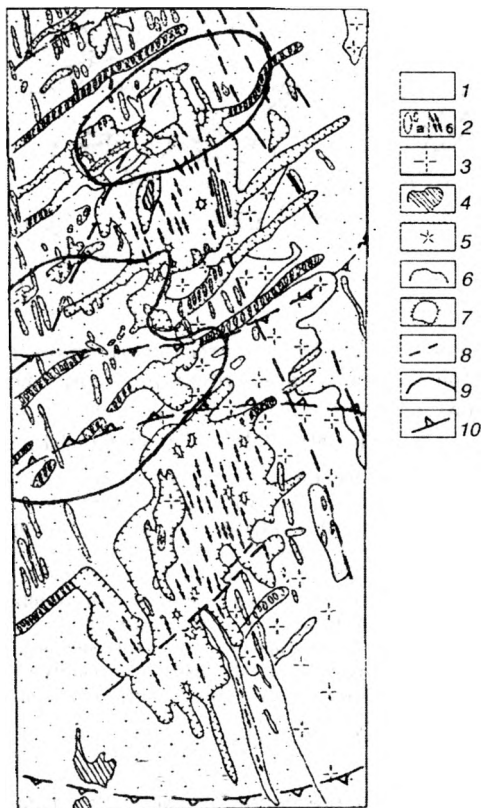


Рис. 10.26. Схема геоморфологического дешифрирования района структуры Кемачи. Амударьинская синеклиза (по И. О. Смирновой и др.):

1 — песчаная равнина; 2 — песчаные гряды (а — крупные, б — мелкие); 3 — наклонные такыры с редкой растительностью; 4 — наклонные такыры с густой растительностью; 5 — горизонтальные такыры; 6 — контуры бессточных впадин; 7 — денудационные останцы коренных пород; 8 — линии предполагаемых разрывных нарушений; 9-10 — контуры структур по: 9 — кровле известняков палеоцена, 10 — кровле известняков келловей-оксфорда верхней юры. Локальная нефтегазоперспективная структура проявлена по наличию угловатых котловин на равнинной поверхности

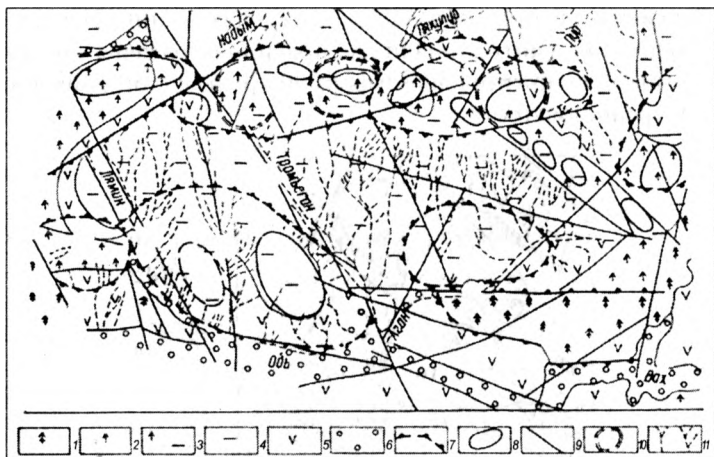


Рис. 10.27. Схема новейшей тектонической структуры правобережья Широтного Приобья (по данным структурно-геоморфологического анализа КС среднего разрешения) (по Л. И. Соловьевой, Г. С. Бурлаковой, Н. С. Посошковой)

Ландшафтно-геоморфологические элементы: 1-3 — полигенетические поверхности выравнивания верхнего (древнего) геоморфологического уровня рельефа: 1 — расчлененные, хорошо дренированные возвышенности центрально-таежной зоны, 2 — всхолмленные, слабо залесенные возвышенности таежной зоны, 3 — заболоченные, слабо дренированные возвышенности междуречий северо-таежной зоны; 4-5 — полигенетические поверхности выравнивания нижнего (молодого) геоморфологического уровня рельефа: 4 — низинные озерно-болотные равнины бассейнов основных рек, 5 — то же с эрозионным расчленением; 6 — современные (голоценовые) долины рек. Структурно-геоморфологические (морфоструктурные) элементы: 7 — обобщенные контуры субрегиональных поднятий и сопряженных понижений; 8 — своды новейших поднятий; 9 — линейменты, разломы и флексурные зоны; 10 — кольцевые элементы; 11 — гидросеть

Скрытые разломы, не выведенные на современный денудационный срез, проявляются зонами трещиноватости пород осадочного чехла, которые резко улучшают коллекторские свойства пород, таких как известняки, с которыми связаны многие месторождения. Нередко к таким зонам могут быть приурочены источники пресных и минерализованных вод, цепочки грязевых вулканов и пр., которые служат индикаторами погребенных разломов. Региональные разломы часто группируются в системы, одна из которых проявляется наиболее ярко, например, в Тимано-Печорском бассейне — диа-

гональная (особенно северо-восточная), а в Западно-Сибирском — ортогональная система разломов (рис. 10.28). Замечено, что положение разломов, выявленных по МДЗ, не всегда точно совпадает с теми, что устанавливаются при бурении и по геофизическим данным. Нередко они параллельны, что может быть обусловлено наклонным положением поверхности сместителя разлома.

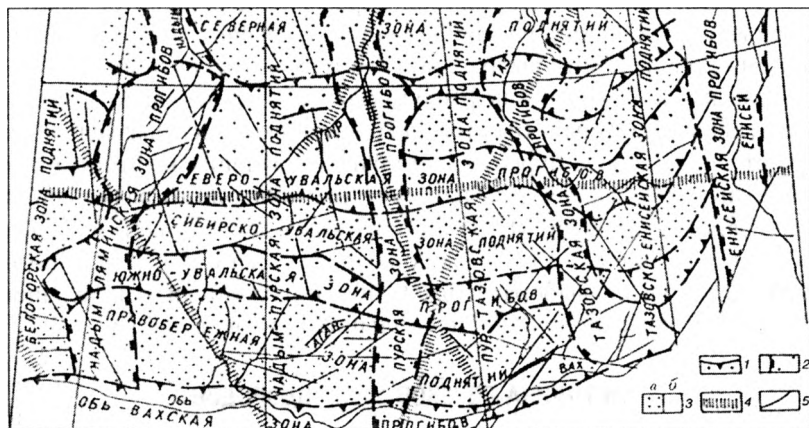


Рис. 10.28. Схема новейшей тектонической структуры Широкого Приобья (по Л. И. Соловьевой и др.):

1 — границы субширотных зон поднятий и сопряженных прогибов; 2 — границы субмеридиональных зон поднятий и сопряженных прогибов; 3 — участки интерференции ортогональных зон поднятий (а) и прогибов (б); 4 — важнейшие линеаменты, выделенные по КС малого разрешения; 5 — прочие линеаменты

На юге Северо-Каспийской нефтегазоносной провинции с помощью геолого-геофизических работ установлены главнейшие субширотные разломы, по которым поверхность кристаллического фундамента ступенчато погружается от южного борта к центральной, наиболее погруженной, части Прикаспийской синеклизы. Диагональные и субмеридиональные линеаменты делят ступени на блоки, усложняющие структуру фундаментов. К местам сгущения сетки линеаментов тяготеют локальные структуры, в том числе нефтегазоносные.

Исследования, проводившиеся в Туранской провинции, позволили выявить связь месторождений нефти и газа с региональными

зонами, отличающимися повышенной неотектонической активностью, выделить крупные поперечные зоны относительных поднятий, ранее неизвестные. Установлено также, что сетка линейamentов, отдешифрированных на космических снимках, контролирует распределение структур и зоны трещиноватости, которые определяют коллекторские свойства пород.

В зависимости от стадии геологоразведочных работ решаются разные задачи: тектонического и нефтегазоперспективного районирования территории с выделением нефтегазоперспективных участков; выявления ловушек нефти и газа различных типов с определением первоочередных объектов для постановки сейсморазведочных работ и поискового бурения; детального изучения нефтегазоперспективных площадей для наиболее рационального размещения разведочных скважин. МДЗ позволяют определять участки и зоны развития трещиноватости в карбонатных коллекторах. Эти данные используются для выбора оптимального положения и направления скважин с целью получения наибольших притоков нефти.

МЕТОДИКА ПОИСКОВ УГЛЕВОДОРОДОВ

Над месторождениями углеводородов поток тепла, обусловленный жизнедеятельностью бактерий, выходит на поверхность, образуя термогеохимические аномалии с повышенным тепловым фоном. Эти «теплые» структуры с помощью высокочувствительных датчиков можно обнаружить в инфракрасном и радиотепловом диапазонах с летательных аппаратов. Положительные результаты, например, дала съемка по снежному покрову в Западной Сибири, основанная на определении газов, диффундирующих из продуктивных пластов к земной поверхности.

Для оценки перспектив нефтегазоносности локальных структур строят *геотемпературные карты*. При использовании инфракрасной съемки в диапазоне 10-14 мкм регистрируется энергетический поток, характеризующий собственное тепловое излучение объектов на земной поверхности. Аномальный тепловой режим осадочного чехла может быть обусловлен улавливанием тепла ловушками антиклинального типа и экзотермическими реакциями в нефтегазовых залежах. На глубинах залегания продуктивных горизонтов эти температурные аномалии могут достигать 20 °С. Результатом

тематической обработки изображений, полученных в дальней ИК-области спектра, является построение градиентных температурных полей и выделение тепловых аномалий на фоне экзогенных и ландшафтных факторов.

Формирующиеся над залежами углеводородов термогеохимические аномалии находят то или иное отражение на снимках. Такие фотоаномалии, отличающиеся цветом, структурой, тональностью и пр., выявляются на МДЗ, полученных в определенный сезон съемки и в определенном узком диапазоне электромагнитного спектра, а также при специализированной обработке КС. Слабые ландшафтные аномалии, возникающие над нефтегазоносными структурами за счет миграции углеводородных флюидов и образующие в почвенно-растительном слое аномальные содержания микроэлементов, могут быть выделены при компьютерной обработке МДЗ с высоким спектральным разрешением, полученным в ИК-диапазоне.

При прогнозно-поисковых работах на нефть и газ, как и при поисках оруденения, необходим системный подход. На МДЗ разных уровней генерализации проявляется информация о границах и главных особенностях тектонического плана седиментационных бассейнов (КС континентального уровня), деталях внутреннего строения бассейнов, структурах второго порядка: сводах, валах, авлакогенах, впадинах, разрывных нарушениях (КС регионального уровня), деталях складчатых и разрывных деформаций, расположении локальных структур и пр. (КС локального и детального уровней).

На КС континентального уровня генерализации анализируются общие черты ландшафтно-геоморфологического строения, отражающие основные закономерности региональной тектонической структуры. Дешифрирование морфологических элементов ландшафта, анализ направленности их развития по региональным и локальным снимкам позволяют выявлять и картировать детальные структурные элементы. Результаты дешифрирования КС фиксируются в виде ландшафтно-индикационных карт и схем. Их геологическая интерпретация основана на исследовании причинно-следственных связей аномалий с геологическими объектами. Выявленные по КС структурно-геоморфологические элементы отражают сложную картину новейшей тектонической структуры, закономерности расположения в пространстве разрывных

и складчатых разнопорядковых деформаций осадочного чехла, возникших под активным воздействием деформаций фундамента, играющих роль штампов, различных по масштабу и конфигурации. Совпадение глубинных и приповерхностных структурных элементов, характерное для большинства равнинных районов молодых платформ, позволяет выявлять по КС основные черты глубинной региональной структуры осадочного чехла. Результаты реконструкции поверхностной тектонической структуры сопоставляются со структурными картами глубинных горизонтов чехла и фундамента (рис. 10.29). Исходя из представлений об отраженном характере деформаций осадочного чехла, необходимо обращать внимание на несоответствие между собой структурных планов различных горизонтов плиты, отражающих изменение геодинамической обстановки во времени.

Одним из эффективных методов изучения глубинного строения территории является *линеаментный анализ*. Многие разрывные нарушения, выявленные на КС, унаследованно развиваются в ходе геологической истории и подновлены на новейшем этапе. Это определяет нередко прямую зависимость между линеаментами на КС и известными разломами, а также положительными структурными формами чехла и/или фундамента. Так, например, для Бузулукской впадины, расположенной в пределах Волго-Уральской провинции, установлен структурный контроль линеаментами двух разнопорядковых типов структур: крупных, обрамляющих впадину, и мелких, ее осложняющих (рис. 10.30). Эта связь линеаментов с унаследованно развивающимися структурами фундамента, плитного и доплитного комплексов платформенного чехла позволяет использовать их для контроля локальных структур и месторождений нефти и газа.

Нередко крупные месторождения нефти и газа контролируются флексурно-разрывными зонами и участками пересечения разломов. Выделение линеаментов, так же как и геоиндикаторов нефтеперспективных структур, может проводиться визуально и в автоматическом режиме. Статистический анализ линеаментов включает построение роз-диаграмм, схем суммарной плотности линеаментов доминирующих простираний и их сочетаний (субширотного и северо-западного и т. п.). Так, например, проведенный Цай Юнь Фэй анализ пространственной связи месторождений нефти и газа Тимано-Печорского бассейна со значениями плотности линеамен-

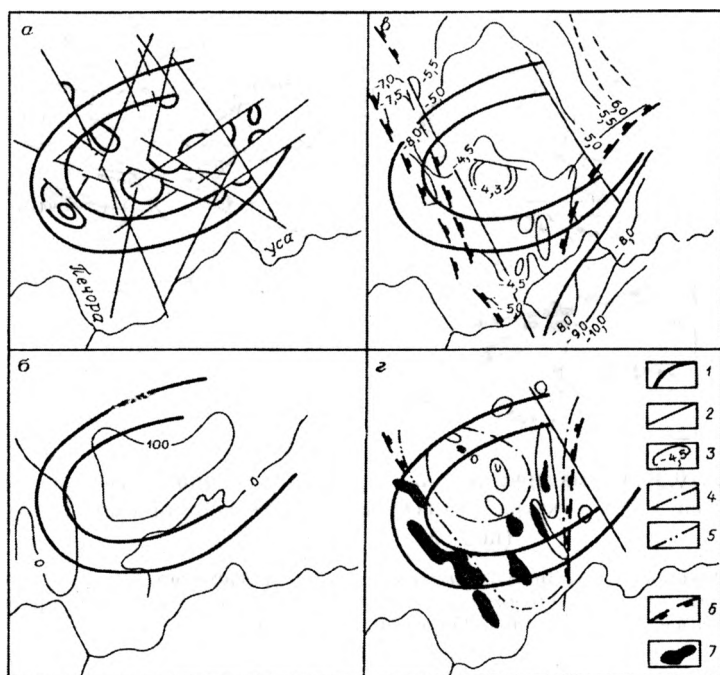


Рис. 10.29 Схемы проявления Воезейской (Большеземельской) изометричной структуры (по Д. М. Трофимову):

а — дешифрирование космического снимка; *б* — рельеф поверхности фундамента; *в* — суммарные деформации за неотектонический период; *г* — тектонические изометричные объекты; 1 — контуры изометричной структуры; 2 — линеаменты; 3 — изогипсы поверхности фундамента, км; 4 — границы Большеземельского свода; 5 — границы Сандивейской группы поднятий; 6 — границы структуры; 7 — месторождения нефти

тов выбранных простираний (исходя из принятой геодинамической модели) не выявил какой-либо четкой закономерности, тогда как при объединении линеаментов в две группы — субширотные и северо-западные и северо-восточные и меридиональные — обнаружено, что месторождения нефти и газа приурочены к областям повышенных значений линеаментов первой группы, а газовых и газоконденсатных — второй. Используются расчеты частоты и вероятности встречаемости нефтяных и газовых месторождений

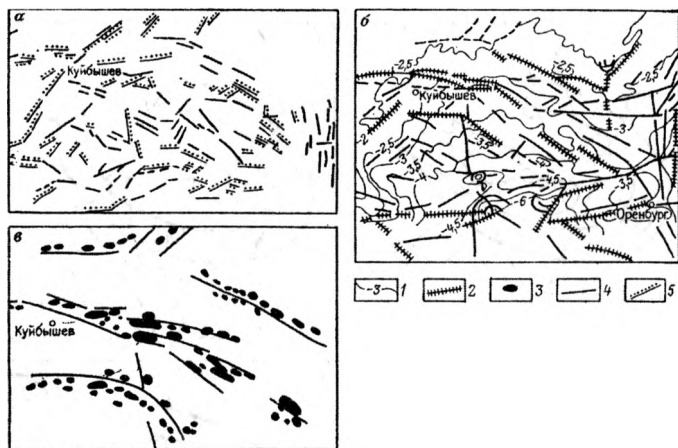


Рис. 10.30. Схема линеаментов Бузулукской впадины — их активизации (а), связи со структурой чехла (б) и месторождениями нефти и газа (в) (по Д. М. Трофимову и др.):

1 — изолинии мощности платформенного чехла; 2 — разломы чехла, соответствующие линеаментам; 3 — месторождения нефти и газа; 4 — разломы сквозного развития в палеозое; 5 — разломы пульсационной активизации

с линеаментами (рис. 10.31). Методы тематической обработки МДЗ разнообразны и выбираются исходя из принятой модели прогнозируемых объектов.

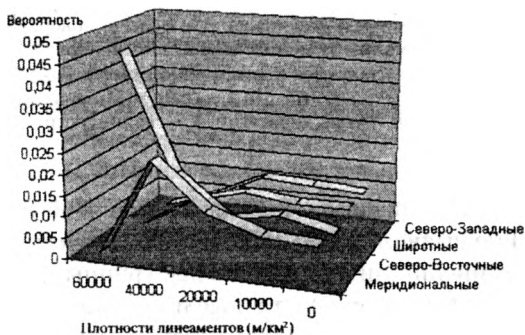


Рис. 10.31. График вероятности встречаемости месторождений нефти и газа от плотности линеаментов. Тимано-Печорский бассейн (по Цай Юнь Фэй)

ТЕХНОЛОГИЯ РАБОТ ПРИ ПОИСКАХ УГЛЕВОДОРОДОВ

Сотрудниками НИИКАМ разработана *технология работ при поисках углеводородов*, включающая следующие этапы.

Первый этап — формирование базы знаний и базы данных. Тематическую базу данных формируют МДЗ, прошедшие предварительную обработку и приведенные к выбранной системе координат, а также геологические, геофизические, топографические и другие данные. База знаний включает информацию об установленных основных закономерностях геологического строения (в том числе критериев размещения месторождений) и геоиндикационных связях рельефа, ландшафта и геологического строения, о закономерностях отражения геологических структур на МДЗ. На основе базы знаний и баз данных создается концептуальная модель прогноза, которая определяет методы тематической обработки материалов и выбор программного обеспечения.

Второй этап — обработка и анализ данных на базе ГИС. На этом этапе работ проводятся визуальный анализ и автоматизированная обработка МДЗ, сканирование и векторизация геолого-геофизических и топографических материалов. На основании визуального дешифрирования снимков всех спектральных диапазонов определяются наиболее информативные диапазоны и составляются схемы основных тектонических элементов и геоморфологического районирования. На основе выявления отдельных индикаторов (ими могут быть озера разных гипсометрических уровней, камы, гряды, эрозионная сеть, линеаменты и пр.) и их количественных характеристик (плотности, определенных простираций и пр.) создают геоиндикационные модели.

Проводится тематическая обработка (преобразования) МДЗ (цветовые композиции, межканальные арифметические операции и др.). Наиболее эффективным методом для поиска нефтегазоперспективных структур считается метод отношений между каналами, позволяющий усилить различия в отражательной способности почвенно-растительных аномалий, образованный за счет подтока углеводородных флюидов (рис. 10.32).

Третий этап — комплексный анализ информации на базе ГИС. На этом этапе проводится послойное сопоставление различных

данных. Комплексный анализ может проводиться путем послойного сопоставления различных данных на экране компьютера или методом анализа многомерных данных (методом классификации, главных компонент, корреляционным, регрессивным и др.).



Рис. 10.32. Анализ отношения каналов космического снимка JERS-1 (деление 3-го канала на 1-й канал). Тимано-Печорская нефтегазоносная провинция (по И. О Смирновой и др.)

Кольцевая структура, которая была выделена при специальной обработке изображения, совпадает в плане с контурами структуры Оленья по силурийскому и девонскому горизонтам, содержащей залежь нефти в девонских отложениях (месторождение им. Титова)

Цель корреляционного анализа (вычисление парных корреляций между различными данными) — определение наиболее информативных комбинаций геоиндикаторов и геолого-геофизических характеристик для формирования моделей прогноза. Комплексный анализ информации дает возможность установить связь между моделями, полученными на базе обработки данных, и глубинными геологическими структурами, а также определить наиболее информативные геоиндикаторы.

Итогом работ являются схемы районирования и прогнозные модели (рис. 10.33).

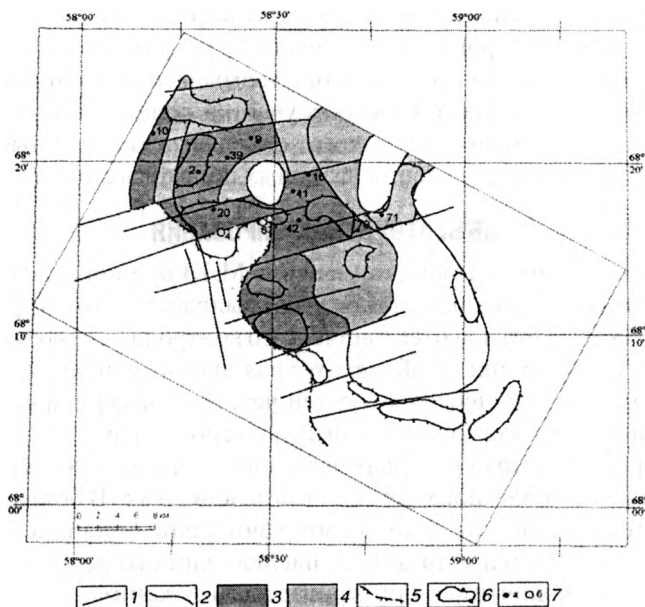


Рис. 10.33. Прогноз нефтеносности месторождения им. Титова, выполненный на основании комплексного анализа МДЗ и геолого-геофизических данных. Тимано-Печорская провинция (по И. О. Смирновой и др.):

1 — основные линеаменты-разломы; 2 — дуговые структурные линии; 3-4 — участки с перспективами нефтеносности в нижнедевонских отложениях: 3 — максимальными, 4 — средними; 5 — зона выклинивания нижнедевонских отложений по результатам анализа МДЗ; 6 — предполагаемые рифовые массивы в верхнедевонских отложениях; 7 — скважины: а — нефтяные, б — пустые

10.4. ИСПОЛЬЗОВАНИЕ АЭРОКОСМИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ ПРИ ПОИСКАХ РОССЫПЕЙ

Россыпные месторождения являются важнейшим источником добычи в различных регионах мира золота, алмазов и других полезных ископаемых, в связи с этим их поиски всегда актуальны, а совершенствование поисковых методов необходимо. Одним из перспективных направлений является опережающий специализированный анализ аэрокосмических снимков и топографи-

ческих карт. МДЗ позволяют изучать рельеф и новейший структурный план любой территории, устанавливать характер перестройки речной сети, изменения областей размыва и транспортировки обломочного материала, выявлять участки долин, где более всего вероятна концентрация полезного компонента, и тем самым определять стратегию проведения наземных поисковых работ.

ОБЪЕКТЫ ДЕШИФРИРОВАНИЯ

Наиболее эффективно применение МДЗ при поисках *аллювиальных россыпей*, и, прежде всего, для выявления структурно-геоморфологического и неотектонического контроля мест возможного россыпеобразования. В областях с различной направленностью и темпом неотектонических (неоген-четвертичных) движений создаются условия для консервации древних россыпей и/или размыва их и коренных источников, переотложения, нередко многократного, и накопления полезного компонента в ловушках. В большинстве россыпных провинций самые многочисленные аллювиальные россыпи находятся в долинах унаследованного развития. При устойчивом поднятии территории россыпи занимают современные днища долин; при чередовании эпох врезания и аккумуляции россыпи оказываются погребенными под современным днищем, в стабильных морфоструктурах при преобладании боковой эрозии образуются близповерхностные залежи, обычно небольшие по запасам, с небольшой мощностью пласта.

Россыпи нередко приурочены к зонам сочленения длительно развивающихся крупных поднятий и прогибаний, особенно разломного или флексурно-разрывного типа, что служит региональной тектонической предпосылкой поисков как погребенных, так и современных россыпей. Большой интерес в поисковых целях представляют долины-грабены и приразломные участки долин, в том числе типа pull-apart. Особого внимания заслуживают разломы и зоны трещиноватости, которые разрабатываются реками, долины-впадины, локальные структуры, где могут возникнуть ловушки на пути транспортировки аллювия — подпруживания (перед поднятием) и разгрузки, в которых прежде всего происходит накопление полезного компонента, и пр. Типы структурно-геоморфологических ловушек многообразны; задача дешифрирования — выделить наиболее перспективные для образования россыпей.

Рисунок эрозионной сети в плане позволяет судить о доминирующих направлениях разломов и зон трещиноватости, которые маркируются водотоками или пересекаются ими; наличии кольцевых морфоструктур, которые могут быть связаны с интрузивными массивами с коренными источниками, и пр. (рис. 10.34).

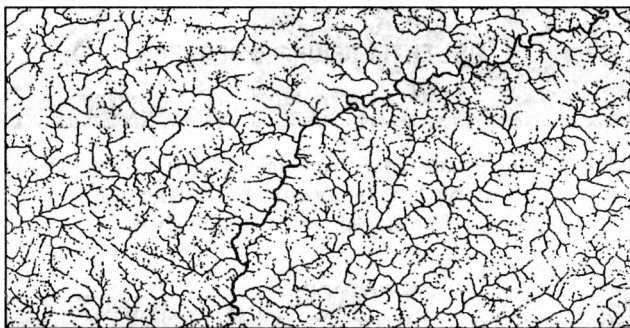


Рис. 10.34. Рисунок эрозионной сети, проявляющий доминирующие северо-восточные направления разрывов и зон трещиноватости и концентрических структур разных размеров. Гвинея

Смещение и преломление русел водотоков, изменение морфологии речных долин (в том числе ширины), направления, характера меандрирования и пр. являются косвенными признаками наличия тектонических деформаций (рис. 10.35). Блоковые дифференцированные движения земной коры могут привести к обезглавлению реки, появлению подпрудных озер, ущелистых участков прорыва рекой поднятий.

На МДЗ можно видеть, как меняется морфология долин при пересечении рекой локальных поднятий и впадин (рис. 10.36). На участке растущих поднятий, которые могут быть неявно проявленными в рельефе, обычно увеличиваются относительные превышения террас над руслом и ниже расположенной террасой; возможны их расщепление, появление цокольных террас. Долина реки сужается; уменьшается извилистость русла; иногда появляются врезанные меандры или исчезают вовсе; отмечаются локальное увеличение глубины вреза и бифуркация русла, сужение и осушение поймы с отмиранием ложбин, стариц, появление в пойме эрозионных останцов, которые огибаются протоками.

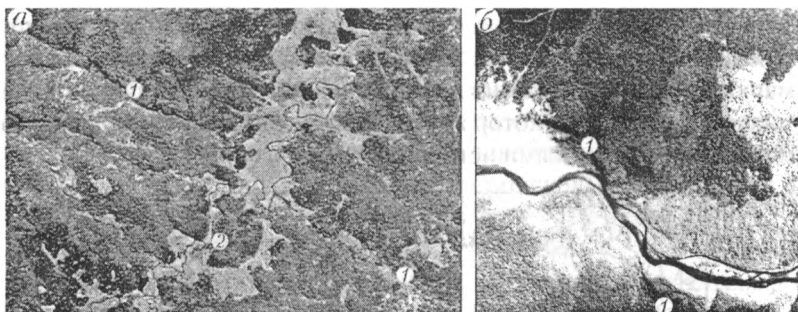


Рис. 10.35. Влияние разрывных нарушений (1) и локальных купольных структур (2) на строение речных долин:

а — Ангола, КС; *б* — Сибирь, АФС

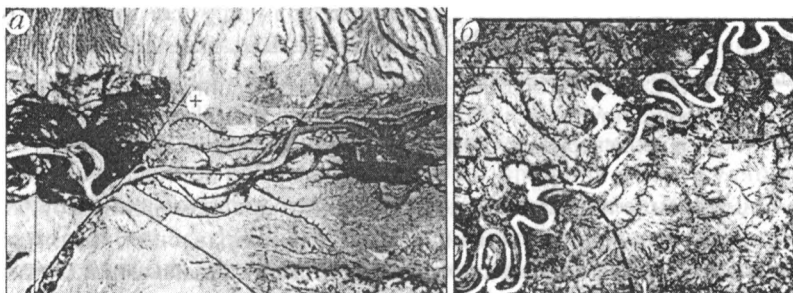


Рис. 10.36. Изменение морфологии долин и русла рек при пересечении тектонических структур. АФС (по Н. В. Макаровой и Т. В. Сухановой):

а — осушение поймы (серый тон) на поднимающемся участке (+) при пересечении рекой развивающегося поднятия. Русло спрямлено, появились уступы террас врезания. Перед поднятием пойма подпружена, заболочена (темный тон в левой части снимка). Р. Чу. Северный Тянь-Шань; *б* — спрямление русла реки и более глубокие врезы на участке пересечения поднятия (светлый тон, оконтурено пунктиром). Восточная Сибирь

На участках локальных впадин, которые пересекает река, ширина долин обычно увеличивается; меандры становятся свободными, растянутыми; уменьшаются количество террас и их относительные превышения (нередко присутствует лишь пойма); террасы широкие, аккумулятивные; отмечаются фурация русел водотоков, заболачивание (рис. 10.37).

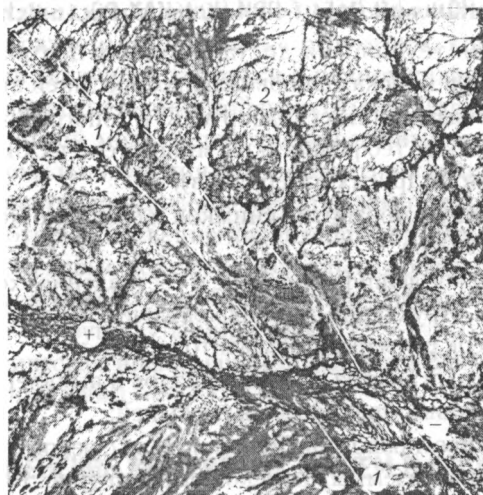


Рис. 10.37. Изменение ширины речной долины на участках поднятия (+) и опускания (-). АФС. Казахстан. Зона разлома (1), срезающая гранитоидный шток (2), прослеживается на юго-восток, где на пересечении с ней речная долина (темный тон) резко расширяется

Молодые впадины и поднятия, зоны контрастного их сочленения, локальные структуры во впадинах и др., которые могут создавать условия местной разгрузки аллювия, хорошо проявляются на компьютерных моделях цифрового рельефа (рис. 10.38). Последние также помогают при палеогеоморфологических реконструкциях древних путей транспортировки аллювиального материала.

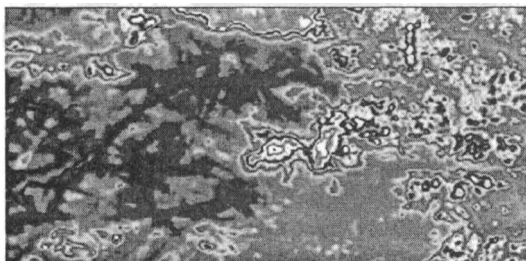


Рис. 10.38. Модель цифрового рельефа. Гвинея. Темные тона — относительные впадины, светлые — поднятия

ТЕХНОЛОГИЯ РАБОТ ПРИ ПОИСКАХ РОССЫПЕЙ

Обобщенная технология дистанционных неотектонических исследований при поисках аллювиальных россыпей включает:

- создание базы данных (подбор МДЗ и топографических карт, геологических, геофизических, минерагенических, геоморфологических и других материалов);
- тематическую обработку снимков и создание моделей цифрового рельефа;
- тематическое дешифрирование и составление схем неотектонических, структурно-геоморфологических, одновозрастных комплексов рельефа, линеаментов и пр.;
- комплексный анализ всех материалов и выявление устойчивых поисковых предпосылок россыпей;
- создание прогнозно-поисковой модели с рекомендациями по проведению наземных поисковых работ (рис. 10.39).

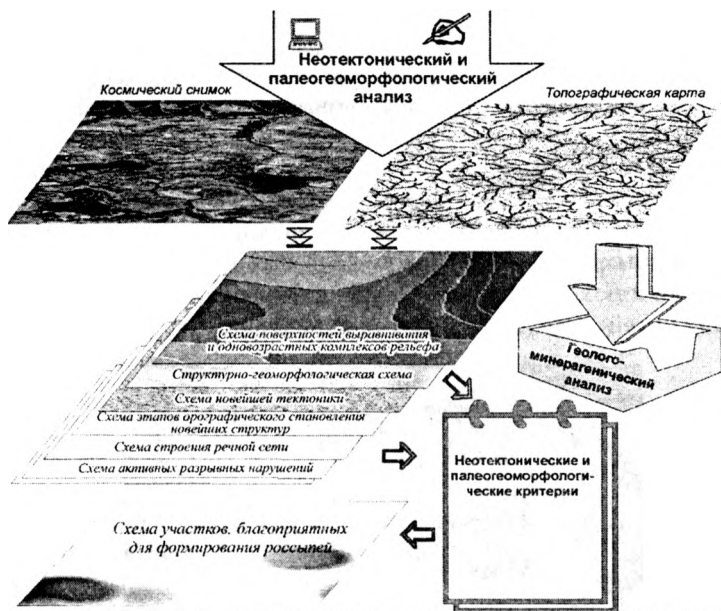


Рис. 10.39. Технологическая схема дистанционной подготовки площадей для поисков россыпей

Компонентами такой прогнозно-поисковой модели являются прежде всего разломы и локальные структуры, которые пересекаются реками (ловушки разгрузки и подпруживания), и участки наследования современной рекой палеодолин. Для оценки эффективности принятой модели поисков россыпных месторождений, с одной стороны, и получения более объективного прогноза, с другой, желательно использование методик компьютерного расчета критериев, которые косвенно характеризуют наличие россыпи. Прогнозно-поисковые модели аллювиальных россыпей позволяют определить стратегию дальнейших работ и, в первую очередь, места отбора средне- и крупнообъемных проб.

Аэрокосмическая информация повышает эффективность геологоразведочных работ.

10.5. ПРИМЕНЕНИЕ ЭКСПЕРТНЫХ СИСТЕМ В ГЕОЛОГИЧЕСКОМ ПРОГНОЗИРОВАНИИ

Прогнозирование рудных месторождений полезных ископаемых требует комплексного анализа разнообразной информации, которая собирается на четырех уровнях: космос, воздух, земля — скважина, выявления системы критериев и признаков (геотектонических, литолого-фациальных, минералого-геохимических, геофизических и генетических), на основе которых можно обнаружить области локализации оруденения и его размеры. Понятно, что традиционным способом обработать всю эту информацию невозможно.

С 60-х гг. в нашей стране ведется разработка компьютерных прогнозирующих систем. Для прогнозирования рудных полезных ископаемых были разработаны автоматизированные системы «Регион-ОС» (создана коллективом Международного института проблем управления и Всесоюзного научно-исследовательского института геологии зарубежных стран) и АСПО-8 (разработана в ПГО «Аэрогеология»). Эти системы учитывают до многих десятков признаков и обеспечивают единообразную, многовариантную и достоверную оценку перспектив территории. При этом необходимым условием для отбора обрабатываемых признаков должна быть одинаковая степень их изученности по всей площади, а высокая эффективность обеспечивается при условии исследований

в геологически однородных районах, в пределах которых поисковые критерии и признаки сходны. Интерактивное использование этих систем требует активного участия геолога при оценке значимости каждого признака и критерия, определении площади их влияния, выбора порогов классификации и т. д. Применение математических методов при компьютерном прогнозе, помимо несомненных преимуществ, имеет и недостатки, так как они не могут учитывать научные и модельные взгляды геологов. В последние десятилетия получили развитие экспертные системы, в которых не используется фиксированная логика, а включена база знаний, содержащая все правила, необходимые для решения задач прогноза.

Системы компьютерного прогнозирования по степени участия геолога в решении прогнозных задач разделяют на формализованные, человекомашинные и экспертные. Формализованные технологии основаны на построении формально-логических моделей с целью получения в определенных, оговоренных условиях некоторого «оптимального решения». Человекомашинные технологии базируются на методах математической статистики и теории распознавания образов, а эксперт-геолог может участвовать в процессе на всех стадиях, проверять статистические гипотезы. Экспертные технологии основаны на использовании моделей формирования месторождений в том виде, как их представляет геолог-эксперт, и дают ему возможность общения с компьютерной системой без участия математика или программиста.

При компьютерном прогнозировании используются разные *типы прогнозных моделей*: статистические, эвристические, включающие модели, построенные на принципах распознавания образов в многомерных признаковых пространствах и модели искусственного интеллекта, и экспертные. Экспертные системы позволяют представить в виде компьютерных программ и использовать те знания, которыми обладает опытный геолог, занимающийся прогнозом.

Для целенаправленного геологического прогнозирования разработана экспертная система «Генезис», позволяющая пользователю создавать базу знаний по различным типам полезных ископаемых, от которой зависит в конечном результате точность работы системы. Работа ведется в интерактивном режиме. На основе этой экспертной системы в разных геологических организациях были разработаны экспертные модели для прогнозирования медно-порфировых мес-

торождений, алмазов кимберлитового типа, медно-колчеданных месторождений уральского типа в вулканогенных формациях, прогнозирование стратиформного полиметаллического оруденения на Енисейском кряже и др. В настоящее время в НИИКАМ эта система переработана в экспертную систему «Генезис-2», в которой экспертное заключение можно получить в виде пространственно привязанного слоя на основе набора признаков, представленных также в виде пространственно привязанных слоев, и соответствующей базы знаний.

Техника разработки экспертных систем еще далека от совершенства, и применяются они пока в ограниченных областях.

Заключение

Геологи одними из первых стали применять в своей работе сначала аэро-, а позднее и космические снимки. На основе аэрометодов были разработаны и внедрены в производственную практику такие виды региональных исследований, как групповая геологическая съемка и аэрофотогеологическое картирование, а на основе космических методов — космофотогеологическое и геолого-минералогическое картирование, которые в короткие сроки позволили дать оценку перспектив поисков месторождений полезных ископаемых на больших площадях. В настоящее время дистанционное зондирование Земли бурно развивается, предоставляя исследователям изображения высокого разрешения во многих спектральных диапазонах. Также интенсивно развиваются и компьютерные технологии обработки ДДЗ. Все это открывает новые возможности изучения геологического строения и поисков месторождений полезных ископаемых.

Литература

Аэрокосмические методы геологических исследований. СПб.: ВСЕГЕИ, 2000.

Буш В. А. Проблема кольцевых структур Земли/ Итоги науки и техники, серия «Общая геология». Т. 22, 1986.

Использование материалов космических съемок при изучении нефтегазоносных территорий (методические рекомендации). М.: Мингео СССР, Аэрогеология, 1989.

Использование материалов космических съемок при прогнозировании и поисках рудных полезных ископаемых (методическое руководство). М.: Мингео СССР, Аэрогеология, 1989.

Использование материалов космических съемок при региональных геологических исследованиях (методические рекомендации). М.: Мингео СССР, Аэрогеология, 1985.

Кац Я. Г., Тевелев А. В., Полетаев А. И. Основы космической геологии. М.: Недра, 1988.

Кольцевые структуры континентов Земли. М.: Недра, 1987.

Корчуганова Я. И. Аэрокосмические методы в геологии (методические рекомендации). М.: Геокарт-ГЕОС, 2006.

Кронберг П. Дистанционное изучение Земли: основы и методы дистанционных исследований в геологии/ Пер. с нем. М.: Мир, 1988.

Космическая информация в геологии. М.: Наука, 1983.

Космогеология СССР. М.: Недра, 1987.

Методы дистанционного зондирования Земли при решении природоресурсных задач. СПб.: ВСЕГЕИ, 2004.

Михайлов А. Е., Корчуганова Н. И., Баранов Ю. Б. Дистанционные методы в геологии. М.: Недра, 1993.

Рябухин А. Г., Макаров В. Я., Макарова Н. В. Космические методы в геологии. М.: Изд-во МГУ, 1988.

Учебное издание

Нелля Иосифовна Корчуганова
Анатолий Константинович Корсаков

ДИСТАНЦИОННЫЕ МЕТОДЫ ГЕОЛОГИЧЕСКОГО КАРТИРОВАНИЯ

Учебник

Зав. редакцией *Игнатова Е. С.*
Ведущий редактор *Климкин М. С.*
Редактор *Добровольская Е. Г.*
Корректоры *Матвеева В. К., Макарова Л. Н.*
Художник серии *Новикова В. М.*
Компьютерная верстка *Краснощекова Н. М.*

Директор издательства *Чепыжов В. В.*

Подп. в печать 22.02.08
Формат 60х84/16. Бумага офсетная
Гарнитура «PetersburgС». Печать цифровая
Усл. печ. л. 4,67. Тираж 1000 экз. Заказ № 99

ООО «Издательство «КДУ», 119234, г. Москва, а/я 587
Тел./факс: (495) 939-57-32, 939-40-51
E-mail: kdu@kdu.ru. [Http://www.kdu.ru](http://www.kdu.ru)

Отпечатано с готовых диапозитивов в ООО «Арт-диал»
143980, Московская обл, г. Железнодорожный, ул. Керамическая, д. 3



Рис. 1. Космический снимок Landsat. Северная часть Байкальской рифтовой зоны. Цифрами обозначены рифтогенные впадины: 1 — Нижнеангарская, 2 — Верхнеангарская, 3 — Баргузинская

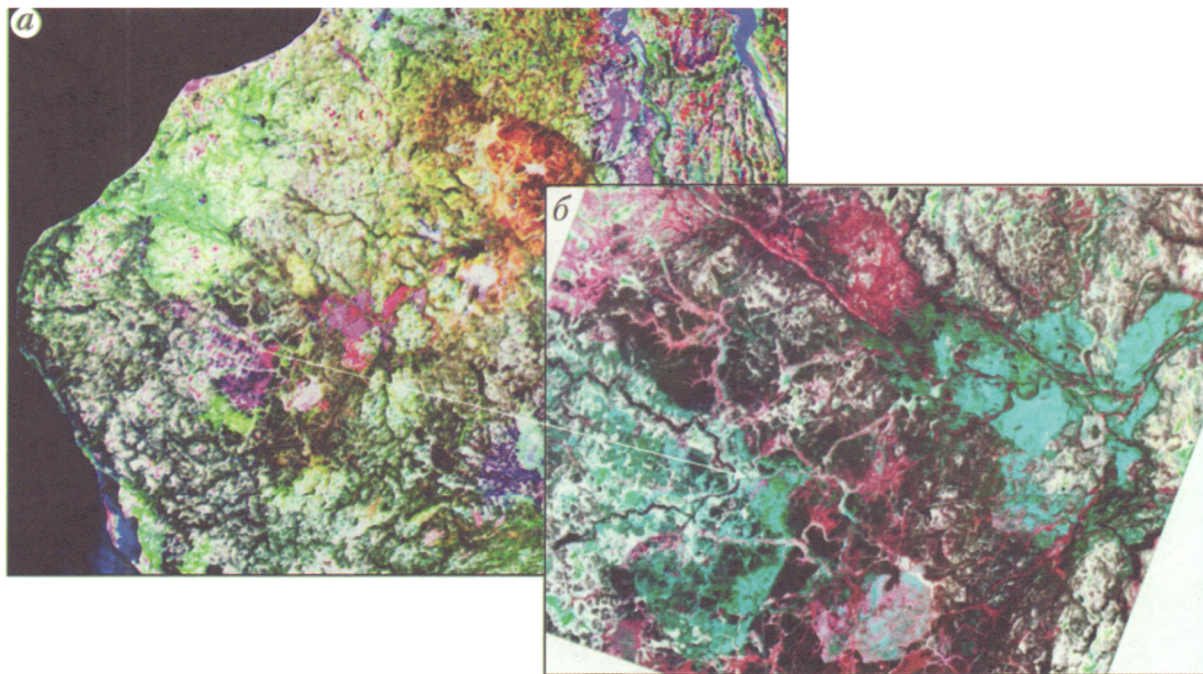


Рис. II. Космические снимки: *a* — Landsat, *б* — SPOT. Зимнебережный район. СЗ России. Стрелкой показано одно и то же место на обоих снимках



Рис. 111. Венеция. Космический снимок Ikonos. Space Imaging

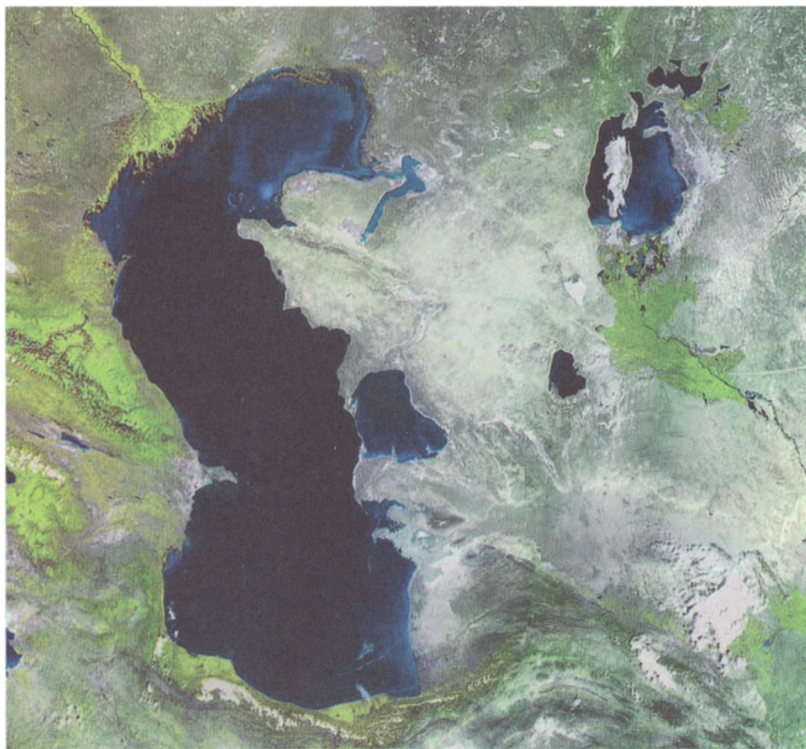


Рис. IV. Мозаика космических снимков. Спутник «Ресурс-01», сканер МСУ-СК, разрешение 150 м. Каспийское и Аральское моря.
НП «Прозрачный мир», «СканЭкс»

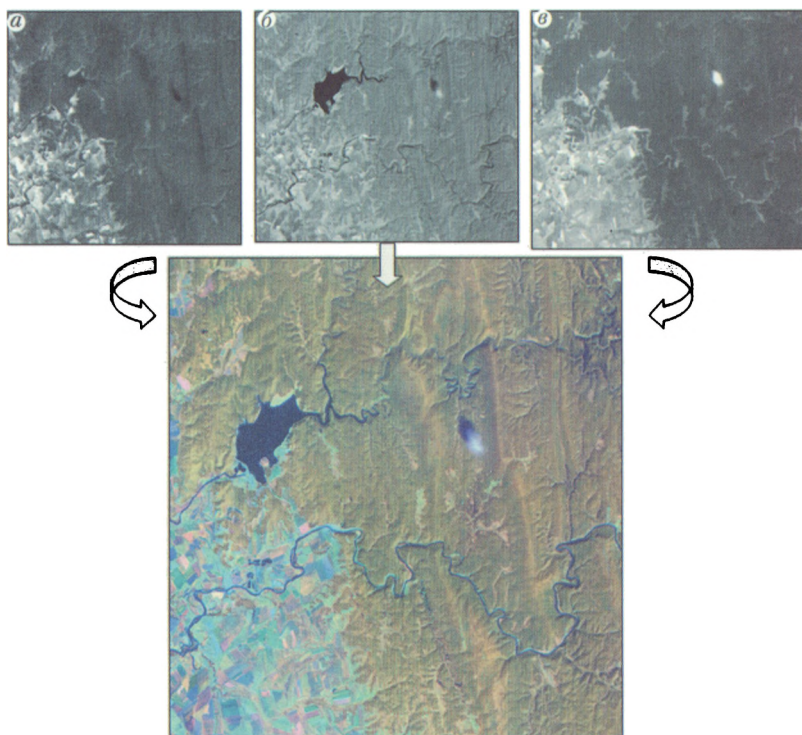


Рис. V. Цветная композиция RGB: *а* — 6-го (10,4-12,5 мкм),
б — 5-го (1,55-1,75 мкм), *в* — 3-го (0,63-0,69 мкм) каналов КС Landsat.
 Урал и Предуралье (по И. И. Градовскому и Е. А. Успенской)

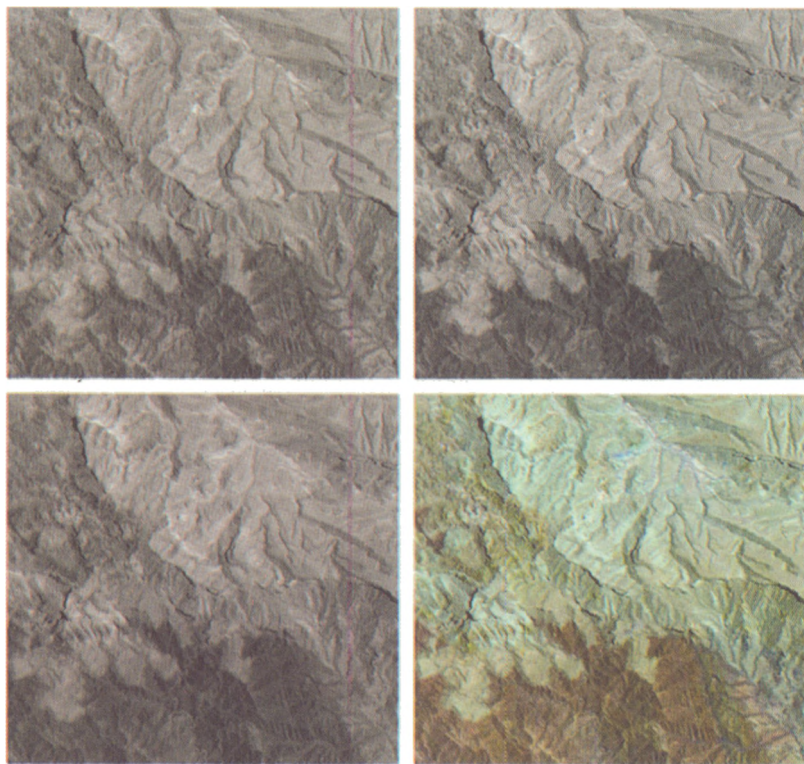


Рис. VI. Изображения отдельных спектральных каналов и синтезированный космический снимок Landsat. Южная Аравия. Йемен

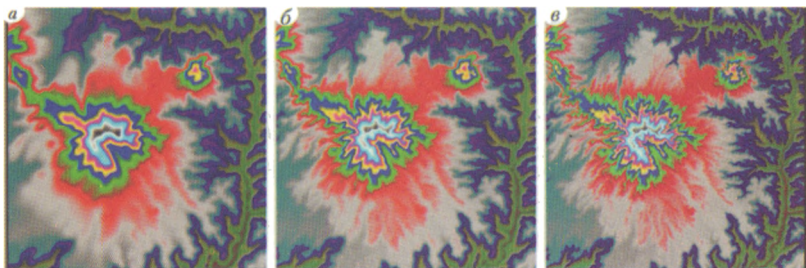


Рис. VII. Визуализированный фрагмент рельефа Эфиопии, полученный по данным баз высот: *а* — GTOPO30, *б* — DTM, *в* — STRM



Рис. VIII. Горизонтальное залегание осадочных пород на космическом снимке Landsat. Аравийский п-ов. Восточный Йемен

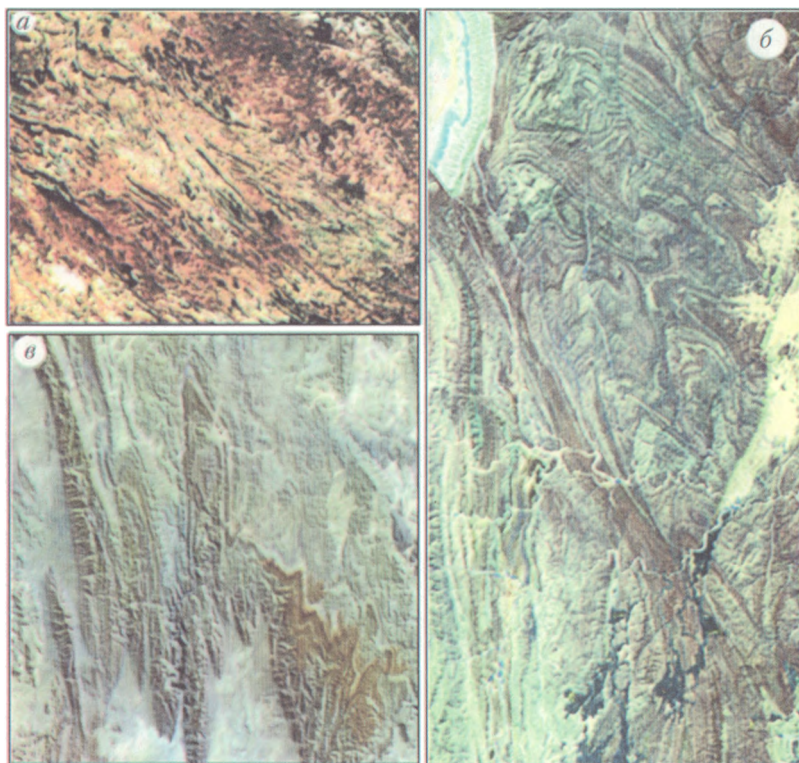


Рис. IX. Складки в метаморфических толщах. КС Landsat:
а — Канадский щит; *б* — Аравийско-Нубийский щит; *в* — ЮЗ Африка



Рис. X. Сход селей. Кавказ. Командорское ущелье. КС. С сайта Университетского центра инженерной геодинамики и мониторинга



Рис. XI. Кольцевая структура Ришат. Предположительно эродированное тектоническое поднятие. Пустыня Сахара. Мавритания. КС Aster. NASA

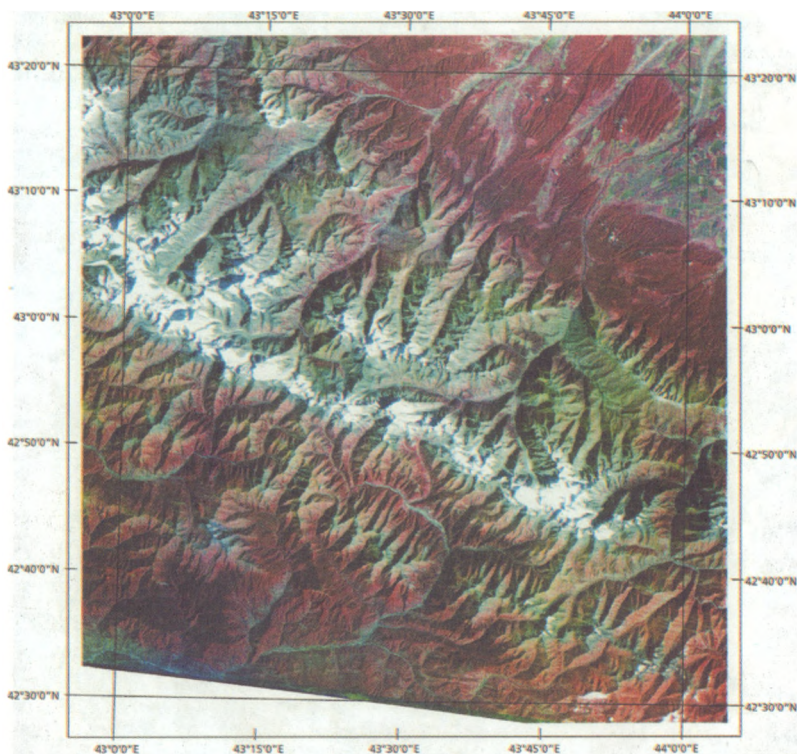


Рис. ХІІ. Композит дистанционной основы Госгеолкарты-200/3
(по Г. В. Гальперову, А. В. Перцову, В. С. Антипову и др.)



Рис. XIIIa. Макет карты четвертичных образований
(по В. И. Астахову и О. А. Никольской)

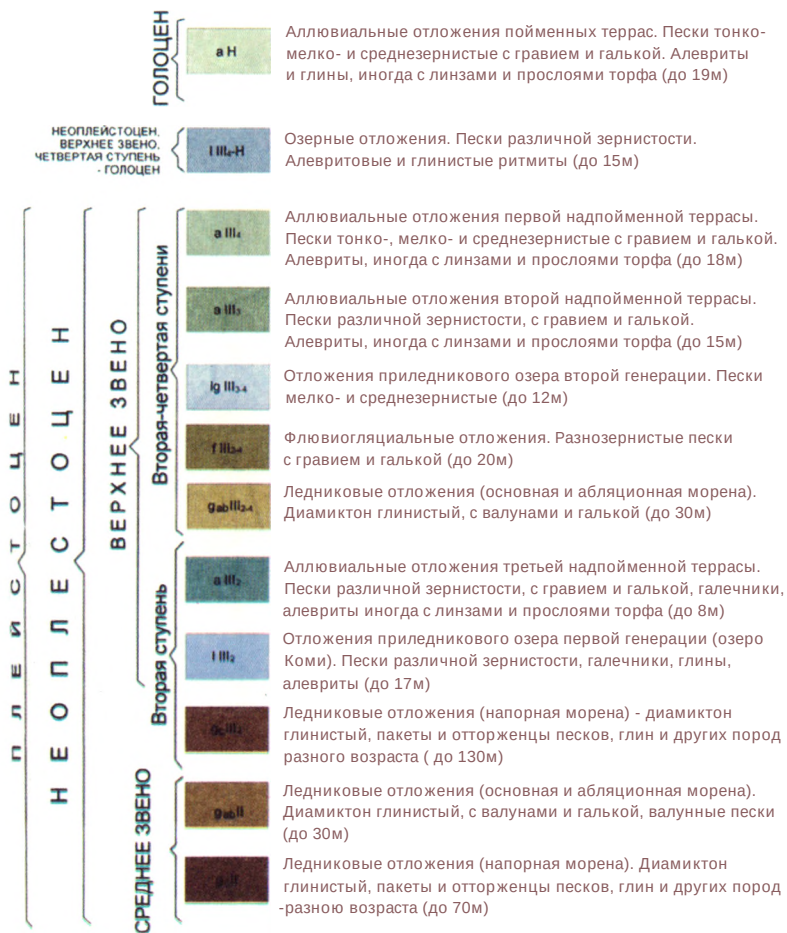


Рис. XIIIб. Условные обозначения к карте четвертичных образований

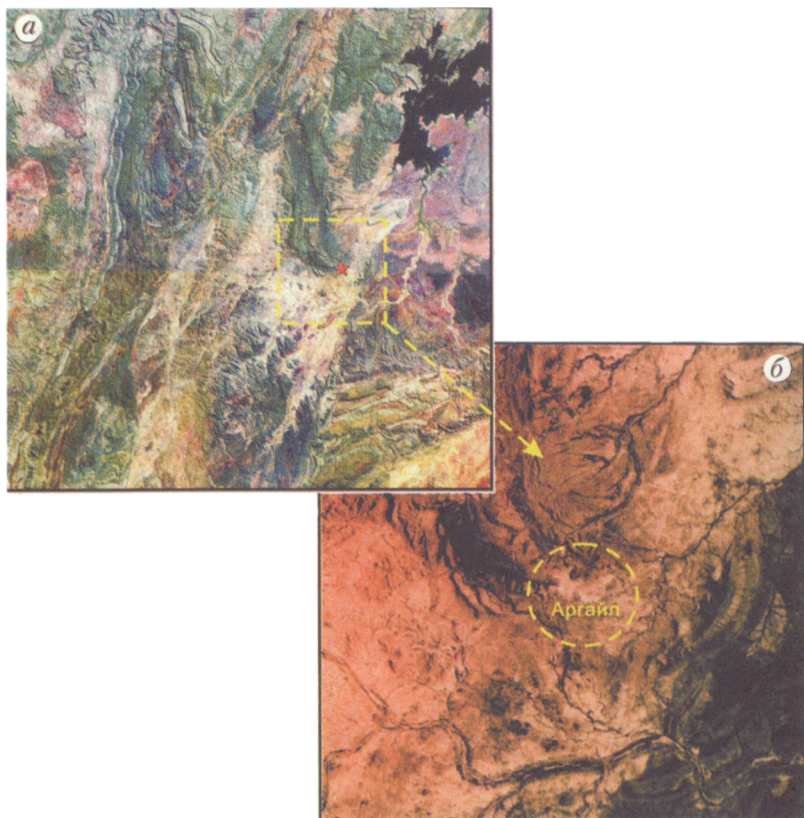


Рис. XIV. Космический портрет алмазоносного района Восточный Кимберли в Австралии на снимках среднего (а) и высокого (б) пространственного разрешения (по Ю. Н. Серокурову и др.)

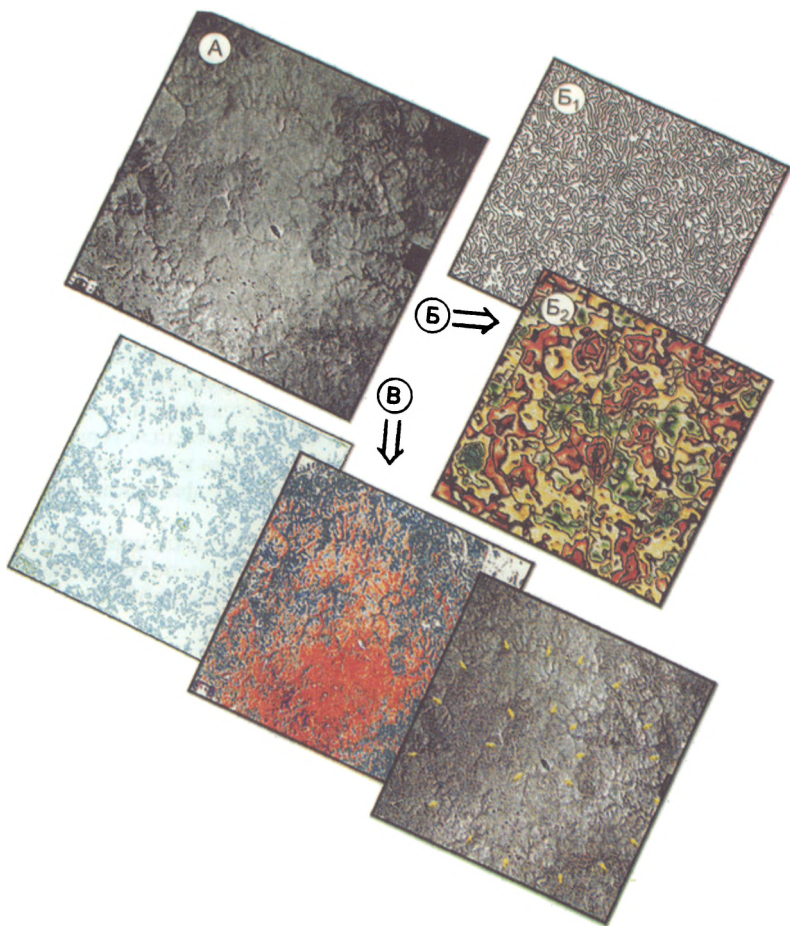


Рис. XV. Пример компьютерной визуализации глубинной очаговой структуры Далдыно-Алакитского кимберлитового района (по Ю. Н. Серокурову и др.). А — исходный снимок; Б — выделение границ перепада яркости и расчета их густоты (Б₂); В — варианты обработки изображения методами фильтрации и выделения спектральных аномалий