

ЯГКАЦ А.В. ТЕВЕЛЕВ  
А.И. ПОЛЕТАЕВ

# ОСНОВЫ КОСМИЧЕСКОЙ ГЕОЛОГИИ



ВЫСШЕЕ  
ОБРАЗОВАНИЕ

Я.Г.КАЦ А.В.ТЕВЕЛЕВ  
А.И.ПОЛЕТАЕВ

# ОСНОВЫ КОСМИЧЕСКОЙ ГЕОЛОГИИ

Допущено Министерством  
высшего и среднего специального образования СССР  
в качестве учебного пособия для студентов  
геологических специальностей вузов

575



МОСКВА "НЕДРА" 1988



ББК 26.3  
К12  
УДК 550.814 : [629.783 : 525]

Рецензенты: кафедра геологии Университета дружбы народов имени П. Лумумбы,  
д-р геол.-минер. наук *В. В. Козлов*

К  $\frac{1904030000-400}{043(01)-88}$  59-88

ISBN 5-247-00319-5

© Издательство «Недра», 1988

В изданном в 1976 г. первом в нашей стране учебном пособии Я. Г. Каца, А. Г. Рябухина, Д. М. Трофимова «Космические методы в геологии» был приведен материал, полученный в 60—70-х годах с помощью пилотируемых космических кораблей. Этот период характеризовался особым отношением к материалам дистанционного зондирования из космоса. Несмотря на то что преимущество космических фотографий по отношению к аэрофотоснимкам была большинству исследователей очевидна, все же некоторые, преимущественно мелкомасштабные космические изображения не поддавались привычным приемам дешифрирования — на них отображались объекты совсем другого ранга. В связи с этим сложилась особая методология анализа космических изображений, направленная прежде всего на распознавание объектов, дешифрируемых на снимках, корреляцию их со структурами земной поверхности (или земной коры) и выявление их геологической природы. Для этого широко привлекались геоморфологические и ландшафтные данные, материалы геофизических и прочих исследований.

Таким образом, упомянутое учебное пособие касалось прежде всего методов дешифрирования и теоретических основ космических съемок, в значительно меньшей степени рассматривались сами объекты дешифрирования.

За прошедшие годы ситуация существенно изменилась. Ускорение научно-технического прогресса в геологии уже не возможно без интенсивного и широкого использования космической информации. Неизмеримо выросли объем и качество материалов дистанционного зондирования, а само зондирование из космоса превратилось в систему сбора и обработки данных, необходимых для решения определенных научных, производственных, экономических и других задач. Анализ космических изображений стал применяться практически во всех отраслях геологии. Увеличилось число исследователей, занимающихся дешифрированием космических снимков, существуют соответствующие научные подразделения в Академии наук СССР и Государственном комитете СССР по народному образованию, в Министерстве геологии и многих отраслевых министерствах. Применение космических снимков обязательно при проведении государственной геологической съемки.

Смещение акцента в космогеологических исследованиях на решение практических задач постепенно привело к осознанию того, что важнейшее достоинство космических изображений состоит не столько в возможности выделения уникальных по размерам или конфигурации объектов, сколько в новом взгляде, в новом подходе к изучению традиционных геологических структур и геологических процессов и в возможности постановки новых задач в этой области. Увеличение масштабов космических снимков привело к смыканию аэро- и космо-

методов в единое направление геологических исследований — дистанционное геологическое зондирование.

В предлагаемом учебном пособии основное внимание уделено применению космической информации при решении конкретных геологических задач: методологии дешифрирования КС, линейным и кольцевым структурам земной коры, возможностям метода дистанционного зондирования МДЗ при структурно-геологическом и структурно-геоморфологическом картировании, при анализе тектонических и минерагенических особенностей Земли, а также при контроле за развитием современных геологических процессов (аэрокосмический мониторинг). При этом значительно сокращено описание теоретических основ и аппаратуры космического зондирования, которое можно найти в опубликованных работах.

Авторы благодарны сотрудникам географического факультета МГУ Ю. Ф. Книжникову и В. И. Кравцовой за помощь в подборе иллюстраций.

### Принятые сокращения

АМС — автоматическая межпланетная станция  
ДЗ — дистанционное зондирование  
ДОС — долговременная орбитальная станция  
ИК — инфракрасная съемка  
ИСЗ — искусственный спутник Земли  
КС — космический снимок

ЛП — линеаментное поле  
МДЗ — материалы дистанционного зондирования  
ПКК — пилотируемый космический корабль  
РЛ — радиолокационная съемка;  
ТВ — телевизионная съемка;  
ТКК — транспортный космический корабль

## Часть I

# ТЕХНИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ ИЗ КОСМОСА

---

Техническое обеспечение космического зондирования представляет собой взаимосвязанную систему измерительных комплексов, орбитальных носителей и транспортных средств доставки последних на орбиту, технических средств передачи информации с рабочих орбит на Землю и преобразования ее в форму, удобную для пользователей, а также способов автоматического и визуального дешифрирования.

В настоящей главе кратко будут описаны лишь те характеристики технических средств дистанционного зондирования, без которых понимание последующих разделов книги может быть затруднено.

## Глава I

### ТРАНСПОРТНЫЕ СРЕДСТВА ДОСТАВКИ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ КОМПЛЕКСОВ НА ОРБИТЫ

Транспортные средства — ракеты различного класса и ТКК, используемые для доставки на орбиты космических носителей, персонала, научного оборудования и других грузов.

До появления ракет для дистанционного изучения поверхности Земли широко использовалась аэрофотосъемка. Однако даже высотные аэрофотоснимки, полученные с расстояния свыше 20 км, были не информативными. Назрела насущная необходимость в том, чтобы поднять регистрирующую аппаратуру на космические высоты. В конце 40-х начале 50-х годов были сконструированы баллистические ракеты, способные достигать больших высот. Первые космические фотографии Земли были получены в 1945 г. при помощи баллистической ракеты «ФАУ-2», запущенной в США на высоту 120 км. В течение последующих лет, вплоть до 1957 г., в космос были отправлены десятки баллистических ракет различного назначения, среди которых особое место занимают двухступенчатые ракеты-носители. Появление двухступенчатых баллистических ракет привело к созданию и разработке первой в мировой практике программы планомерного изучения космического пространства.

Первая советская двухступенчатая ракета-носитель была создана на базе межконтинентальной ракеты. С ее помощью был выведен на орбиту первый в мире искусственный спутник Земли.

Создание последующей серии трехступенчатых ракет-носителей «Восток» обеспечило полет первого космического корабля с человеком на борту и дальнейшие пилотируемые полеты. С помощью этой ракеты-носителя стартовали первые лунные станции, спутники серии «Космос» и другие космические аппараты.

С появлением трехступенчатой ракеты-носителя среднего класса «Союз» грузоподъемностью около 7 т осуществлен запуск пилотируемых и автоматических космических кораблей и спутников. На этой базе разработана четырехступенчатая ракета-носитель «Молния», которая применяется для выведения на орбиты спутников типа «Молния» и «Прогноз».

С 1965 г. ведется эксплуатация многоступенчатой ракеты-носителя тяжелого класса «Протон», способной выводить на орбиту более 20 т полезных грузов. Оригинальная компоновочная схема ракеты-носителя, конструкция двигательных установок, а также бортовые системы выполнены с учетом передовых достижений техники.

Ракеты типа «Протон» используются для исследований космического пространства, Луны, Венеры, Марса и других небесных тел с помощью тяжелых автоматических аппаратов. С использованием этой ракеты-носителя была осуществлена программа «Вега». Орбитальные станции «Салют» и «Мир», геостационарные спутники связи «Горизонт», «Радуга», «Экран» выводятся на космические орбиты также «Протоном».

В мае 1987 г. проведены первые летные испытания новой универсальной ракеты-носителя «Энергия», предназначенной для выведения на опорную орбиту как многоразовых орбитальных кораблей, так и крупногабаритных космических аппаратов, в том числе модулей для долговременных станций. По данным Главкосмоса СССР, «Энергия» имеет стартовую массу свыше 2000 т и обеспечивает выведение на околоземную орбиту более 100 т полезного груза. Она выполнена по двухступенчатой схеме с параллельной компоновкой ракетных ступеней и боковым размещением выводимого полезного груза. Длина носителя — 60 м, максимальный поперечный размер — около 20 м, диаметр второй ступени — 8 м.

Высокая степень автоматизации — главная особенность стартового комплекса ракеты-носителя «Энергия». Автоматика управления состоит из трех звеньев. Во-первых, это автоматизированная система управления подготовкой и пуском. Второе звено обеспечивает первое необходимой информацией о состоянии ракеты — измеряется температура всех элементов конструкции носителя, жидкостей и газов в емкостях, давления в них, температуры в приборах и отсеках, давления в двигателях, уровни жидкостей и т. д. Автоматика третьего звена управляет подачей компонентов и газов из хранилища к ракете, обеспечивает безопасность работ в наземных сооружениях стартового комплекса.

Вся аппаратура автоматизированных систем управления построена на отечественных вычислительных машинах. Созданные в нашей стране новые мощные транспортные средства доставки носи-

телей на космические орбиты создают предпосылки для постановки более сложных научных и практических задач по освоению космического пространства.

### *Вопросы для самопроверки*

1. Перечислите основные советские транспортные ракеты. Какова тенденция развития транспортных средств космических исследований?

## Глава 2

### **ОСНОВНЫЕ ТИПЫ КОСМИЧЕСКИХ НОСИТЕЛЕЙ И РАБОЧИХ ОРБИТ**

Космические носители — технические средства, выведенные на орбиты специальными транспортными ракетами для изучения околоземного космического пространства и планет Солнечной системы в автоматическом режиме, а также для специальных исследований. В зависимости от решаемых задач и конструктивных особенностей космические носители подразделяются на следующие типы: искусственные спутники Земли (ИСЗ), автоматические межпланетные станции (АМС), пилотируемые космические корабли (ПКК), долговременные орбитальные станции (ДОС).

#### **2.1. Искусственные спутники Земли**

ИСЗ — автономные космические летательные аппараты, предназначенные для решения многих научных и практических задач. Первый ИСЗ был выведен на орбиту 4 октября 1957 г. Он имел форму шара диаметром 580 мм и весом 83,6 кг. Высота апогея достигала 947 км, перигея — 228 км. Первый в мире советский спутник просуществовал в космическом пространстве около трех месяцев. Дату запуска первого космического спутника следует рассматривать как начало планомерного изучения космического пространства. ИСЗ нашли очень широкое применение во многих отраслях науки и техники. Они позволяют вести бесперебойные радио и телевизионные передачи на огромные расстояния, прогнозировать погоду, изучать состав и свойства атмосферы, обеспечивать непрерывные наблюдения за природной средой (мониторинг), выявлять закономерности распределения минеральных ресурсов, уточнять основные параметры Земли. Первоначально практическое использование ИСЗ было осуществлено в метеорологии. В феврале 1959 г. был произведен запуск первого метеорологического спутника, а с 1960 г. метеорологические спутники стали регулярно поставлять ученым оперативную информацию о состоянии земной атмосферы и ее подстилающей поверхности. Непрерывность обзора земного шара с помощью специальной аппаратуры, установленной на борту ИСЗ, пре-

доставила исследователям возможность получить ценный материал для изучения природных ресурсов.

При запуске ИСЗ необходимо решить множество вопросов, например выбор параметров орбиты, точность ориентации ИСЗ в пространстве, величина разрешающей способности бортовых систем и др. (табл. 1).

Таблица 1

Технические характеристики некоторых советских ИСЗ и ДОС

Космические летательные аппараты	Высота орбит, км	Разрешение изображения в видимой зоне спектра, м	Ширина полосы захвата, км
«Восток-1, 3—6»	150—500		
«Восход-1, 2»	150—500	20—300	100
«Союз-3, 6, 8»	150—500	20—300	100
«Союз-7, 9»	150—500	20—300	100
«Салют-1»	150—500	20—300	100
«Союз-12»	150—500	20—300	100
«Союз-13»	150—500	20—300	100
«Космос-122, 144, 156, 184, 206, 226»	500—1000	300—3000	1000
«Космос-243»	500—1000	300—3000	1000
«Метеор-1—15»	500—1000	300—3000	1000
«Зонд»		Диск Земли	

С увеличением высоты полета снижается точность географической привязки результатов космической съемки, ухудшается разрешающая способность. С снижением орбиты уменьшается обзор. В этой связи выбор оптимальной высоты орбиты в зависимости от решаемых задач требует строгого научного расчета. Теория и практика космических исследований показывает, что при полете ИСЗ на высоте около 300 км угол обзора бортовыми приборами должен быть равен  $150^\circ$ , а при высоте 500 км —  $130^\circ$ , иначе часть земной поверхности, расположенная между витками орбиты, не попадет в поле зрения бортовой аппаратуры. Но при таких больших углах обзора масштаб снимка будет заметно меняться от центра кадра к его краям. Искажение масштаба снимков может зависеть и от характера орбиты. Наиболее равномерные изображения земной поверхности достигаются с круговых орбит.

Таким образом, постоянство масштаба снимков или их одномасштабность зависит от высоты и характера орбиты съемки, а также от типа установленной на борту ИСЗ аппаратуры, от угла наклона оптической оси съемки и прочих факторов.

В СССР на орбиту выводятся ИСЗ различных конструкций: «Космос», «Электрон», «Протон», «Молния», «Метеор», «Радуга» и др. ИСЗ разного назначения выводят многие государства: США, Великобритания, Канада, Франция, Индия, Италия, Япония, КНР, Бразилия. Одновременно в космическом пространстве находится свыше 2 тыс. ИСЗ.

Материалы космического зондирования, полученные с помощью технологических ИСЗ класса «Метеор» (СССР) и «Лэндсат» (США),

широко используются во многих геологических отраслях. ИСЗ этого класса несут на своем борту аппаратуру, позволяющую получать качественное изображение больших площадей земной поверхности. В настоящее время весь земной шар покрыт съемкой при помощи специальной аппаратуры, установленной на ИСЗ. Изучение этих изображений позволило по-новому подойти к решению многих геологических проблем, и в этой связи материалы космических съемок, полученные с ресурсных и отчасти метеорологических ИСЗ, следует рассматривать как один из важнейших источников геологической информации.

В настоящее время исследователи имеют многие тысячи космических изображений в черно-белом, цветном и многозональном исполнении. Помимо этого с ИСЗ производятся радиолокационная и спектрометрическая съемки, а также различные геофизические измерения. За последние годы достигнуты огромные успехи в развитии космических технических средств. Сейчас одной ракетой на орбиту могут быть выведены несколько ИСЗ, решающие различные научно-технические задачи. Так, например, 16 июня 1987 г. в СССР произведен запуск восьми ИСЗ («Космос 1852-1859»), выведенных на орбиту одной баллистической ракетой.

## 2.2. Автоматические межпланетные станции

АМС — автоматические аппараты, выведенные к планетам или иным телам Солнечной системы с целью их изучения.

12 сентября 1959 г. советская АМС «Луна-2» доставила на поверхность Луны выпел с гербом СССР. Начиная с этого времени советские АМС были направлены для изучения Луны, Марса, Меркурия, Венеры, кометы Галлея.

Фотографии поверхности Луны, полученные с помощью специальной аппаратуры, установленной на АМС, позволили изучить обратную, невидимую сторону Луны. Были составлены первые карты поверхности Луны, положенные в основу позже составленных тектонических карт этого небесного тела. Поверхность Луны была снята с разных высот, а позже были получены детальные снимки непосредственно на самой поверхности. 3 февраля 1966 г. АМС «Луна-9» впервые совершила мягкую посадку на окраине Океана Бурь и передала круговую панораму лунной поверхности.

Детальный анализ снимков Луны позволил выбрать наиболее интересные места для посадки автоматических («Луноход-1,2») и обитаемых («Аполлон») лунных модулей с целью развертывания научных исследований непосредственно на поверхности Луны.

Изучение Марса с помощью АМС относится к началу ноября 1962 г., когда АМС «Марс-1» стартовала в сторону этой планеты. Первые снимки планеты были переданы на Землю в 1965 г. АМС «Маринер-4». В последующие годы поверхность планеты была многократно сфотографирована АМС серий «Марс», «Маринер», «Викинг». В 1976 г. были получены панорамные снимки планеты. Были получены снимки спутников Марса — Фобоса и Деймоса.

Космическая станция «Маринер», в течение 1974 и 1975 гг. трижды облетев планету Меркурий, передала на Землю телевизионное изображение около 30% ее поверхности. Были получены сведения о рельефе и структуре поверхности планеты.

Особый интерес представляет изучение планеты Венеры, окутанной мощным слоем облачности. Начиная с 1970 г. ее поверхности достигли более 10 советских и американских спускаемых аппаратов. С их помощью, а также по данным радиолокационной (РЛ) съемки, удалось определить многие характеристики Венеры: температуру поверхности, состав облачного покрова, скорость вращения, рельеф поверхности и т. д.

РЛ-снимки, полученные советскими АМС серии «Венера», позволили составить карту значительной части поверхности планеты. При помощи АМС в 1979 г. американскими специалистами были получены снимки спутников Юпитера — Ганимеда, Каллисто, Европы и др. На одном из его спутников — Ио была зафиксирована современная вулканическая деятельность. Изучены также спутники Сатурна — Титан, Рея, Диона, Таория. Советские и европейские АМС позволили детально изучить комету Галлея в момент ее приближения к Земле.

Отметим, что все новейшие данные о строении планет Солнечной системы получены благодаря АМС.

### 2.3. Пилотируемые космические корабли

Они существуют с 1961 г. со времени первого исторического полета гражданина СССР, летчика-космонавта Ю. А. Гагарина на космическом корабле «Восток». В последующие годы с ПКК «Восток», «Восход», «Союз», «Союз-Т» (СССР), «Меркурий», «Джемини», «Аполлон» (США) были получены многочисленные цветные и черно-белые снимки Земли, осуществлены визуальные наблюдения. Проводились разнообразные медицинские, биологические и технологические эксперименты.

Многократные облеты Земли дали геологической науке огромный материал высокого качества, позволивший в глобальном масштабе изучить ее строение, решать многие вопросы теоретической геологии и выявлять основные закономерности размещения полезных ископаемых. 15 июня 1975 г. на околоземной орбите осуществлена стыковка ПКК — советского «Союз» и американского «Аполлон». Монтаж космического комплекса «Союз» — «Аполлон» можно рассматривать как прообраз ДОС. Помимо облета Земли, ПКК могут быть использованы для полетов к другим небесным телам. Так, например, американские астронавты в 1969 г. совершили по программе «Аполлон» первую высадку на Луне.

При всех положительных качествах космических материалов, полученных с ПКК, их роль значительно возрастает при условии участия в эксперименте специалиста-геолога.

## 2.4. Долговременные орбитальные станции

Приоритет в создании ДОС принадлежит советским ученым. В январе 1969 г. космические корабли «Союз-4» и «Союз-5», состыковавшись в совместном полете, создали первую в мире орбитальную станцию. Для увеличения возможностей научно-исследовательской деятельности и энергообеспечения аппаратуры с 1971 г. используются специальные орбитальные станции типа «Салют». Эта станция массой в 19 т и длиной в 16 м состоит из следующих отсеков: переходного, рабочего, промежуточного, агрегатного, научного. Для наблюдения на станции имеется 20 иллюминаторов, через которые могут вестись визуальные наблюдения и фотографирование земной поверхности. Число рабочих мест на станции «Салют» достигает 10. Это дало возможность достаточно большой группе исследователей вести поочередно научные наблюдения в различных областях знаний. ДОС «Салют-6» проделала огромную работу. Было совершено свыше 30 стыковок пилотируемых, беспилотных грузовых кораблей, совершено несколько длительных экспедиций общей продолжительностью свыше 2 лет. В ходе полета ДОС «Салют-6» было выполнено более 1600 экспериментов по разным направлениям науки, в том числе и геологии. Она оснащена самым современным научным оборудованием, имеет два стыковочных узла. Станция может принимать грузовые корабли сближения типа «Прогресс». Космический комплекс «Салют» — «Союз» — «Прогресс» явился орбитальной системой нового поколения, содержащей все основные компоненты, обеспечивающие длительное существование периодически сменяемого персонала исследователей. На ДОС «Салют-6» совершили полеты около 10 международных экипажей с участием космонавтов из тех стран, которые проводят совместные исследования в рамках «Интеркосмоса».

Весной 1987 г. в космическом пространстве начал работу научный комплекс, представляющий собой систему из ПКК «Союз ТМ-2», станции нового поколения «Мир», научного модуля «Квант» и грузового корабля «Прогресс». Базовым блоком орбитального комплекса является станция «Мир», к которому пристыкованы ПКК, грузовой корабль и научный модуль. Экипажем проведена большая работа по съемке поверхности Земли, осуществлено несколько выходов в открытое космическое пространство для монтажа дополнительных солнечных батарей. Вероятно, ДОС явятся наиболее перспективными космическими носителями в будущем.

## 2.5. Типы космических орбит

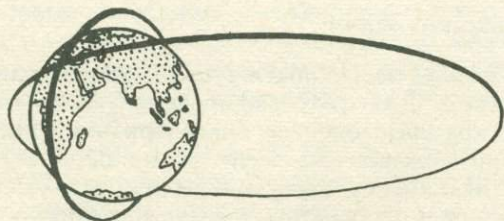
При съемке земной поверхности существенную роль играет выбор орбиты полета ИСЗ. Для фотографирования Земли предпочтительными являются круговые орбиты, благодаря чему достигается одинаковый масштаб снимков по всей трассе полета ИСЗ. Большое значение имеет наклонение орбиты — величина угла, образованного плоскостью экватора и плоскостью орбиты. В зависимости от накло-

ния орбиты бывают экваториальными (наклонение  $0^\circ$ ), полярными (наклонение  $90^\circ$ ) и наклонными. При запуске ИСЗ на полярные (или квазиполярные) орбиты бортовая аппаратура используется для исследования всей земной поверхности. При углах наклона орбит до  $50\text{—}60^\circ$  приполярные области не попадают в поле зрения бортовой аппаратуры.

Наклонение орбиты ИСЗ является важным параметром, так как определяет широтный пояс поверхности Земли, который подлежит фотографированию. Трасса полета ИСЗ не может выйти за пределы этого широтного пояса, поэтому от наклона и высоты орбиты зависит ширина фотографической полосы. Здесь устанавливается прямая зависимость: чем больше угол наклона орбиты и чем больше ее высота, тем шире снимаемая полоса земной поверхности (рис. 1). Помимо круговых орбит, по которым обычно летают метеорологические спутники, ПКК и орбитальные станции, для постоянного наблюдения за глобальными процессами на Земле используются эллиптические орбиты с большой разницей высот в апогее и перигее. По отношению к Солнцу или Земле выделяют два вида орбит: геосинхронную и гелиосинхронную.

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 постоянное наблюдение за ним.

Гелиосинхронные орбиты предназначены для повторных съемок одних и тех же участков земной поверхности при одинаковых условиях освещения через равные промежутки времени. Примером может служить американский спутник «Лэндсат», летающий по гелиосинхронной орбите и возвращающийся в исходную точку съемки через 18 суток. Съемка с гелиосинхронных орбит может широко использоваться для изучения динамики современных геологических процессов. Трассы полетов ИСЗ по высоте могут быть подразделены на три группы: низкоорбитальные (200—400 км) используются при полете ПКК и орбитальных станций, среднеорбитальные (500—1500 км) — метеорологических и ресурсных ИСЗ; высокоорбитальные (30 000—90 000 км) — телекоммуникационных ИСЗ и спутников, предназначенных для исследования космического пространства. В геологических целях используются материалы, получаемые с низко- и среднеорбитальных ИСЗ.



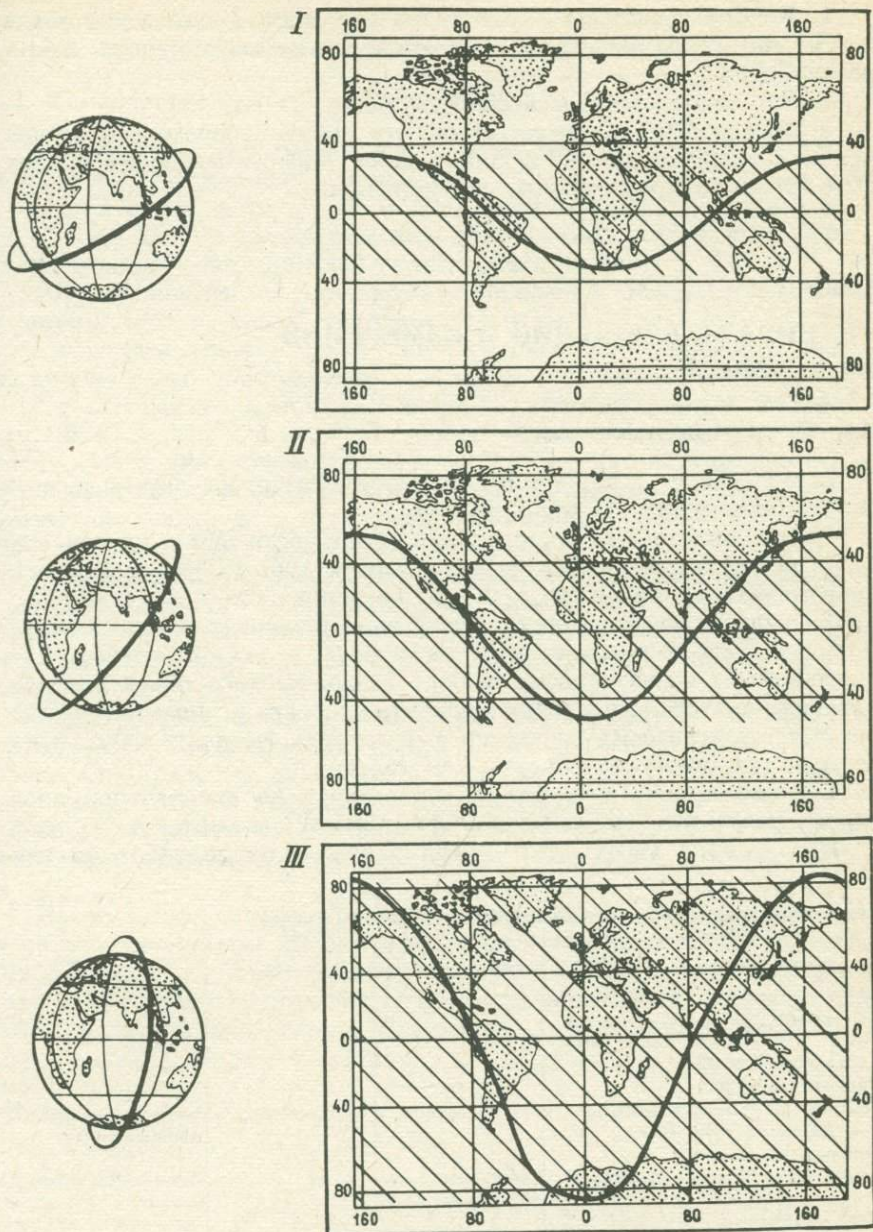


Рис. 1. Виды орбит ИСЗ. Круговая и эллиптическая орбиты. Показана зависимость между величиной площади охвата космической съемки и углом наклона орбиты.

## Вопросы для самопроверки

1. Почему необходимо разнообразие типов космических носителей? Могут ли автоматические ИСЗ полностью заменить наблюдателей ДОС?

2. Что такое технологический спутник?

3. Запуск ИСЗ на экваториальную орбиту значительно проще, чем на полярную (за счет использования скорости вращения Земли). Почему же полярные орбиты так популярны?

## Глава 3

### ТЕХНИКА НАБЛЮДЕНИЙ И ИЗМЕРЕНИЙ ИЗ КОСМОСА

#### 3.1. Визуальные наблюдения

В геологии в настоящее время используются результаты разных видов космических съемок (табл. 2).

Начало визуальных исследований поверхности Земли из космического пространства относится к 12 апреля 1961 г.— ко дню полета первого космонавта на Земле Ю. А. Гагарина.

Визуальные наблюдения отличаются большой оперативностью и могут быть использованы в различных целях. Во-первых, они способствуют сознательному выбору геологического объекта исследований; во-вторых, позволяют оценить скорость и динамику наблюдаемых геологических процессов и, в-третьих, выявлять ранее неизвестные геологические объекты или явления.

Все наблюдения космонавтов проводятся по специальной программе, результаты исследований фиксируются в бортовом журнале и наносятся на карту. Этот метод в общем цикле работ по изу-

Таблица 2

Важнейшие параметры некоторых видов космических съемок

Вид космической съемки	Характер съемки	Влияние атмосферы	Время съемки	Форма получения информации
Фотографическая (КС)	Пассивный	Слабое	День	Снимок
Телевизионная	»	»	»	Изображение
Радиолокационная (РЛ)	Активный	Очень слабое	День, ночь	Снимок, график, изображение
Инфракрасная тепловая (ИК)	Пассивный	Отдельные атмосферные окна	То же	Тепловой снимок, график
Спектрометрическая	»	Слабое	День	График
Лазерная	Активный	Отдельные атмосферные окна	День, ночь	»
Магнитная	Пассивный	Нет	То же	Сигнал, график

чению поверхности Земли пока следует рассматривать как вспомогательный, но необходимый. С возможностью посылки в космос специалистов разного профиля, в том числе геологов, значение визуальных наблюдений может в значительной степени возрастать.

### 3.2. Космическая фотографическая съемка

Фотографическую съемку поверхности Земли с высот более 150—200 км принято называть *космической*.

Космическая фотосъемка может быть осуществлена при помощи ПКК, ДОС и автоматических ИСЗ ручными камерами, фотографирующими автоматами и полуавтоматами.

ПКК используются для фотографирования поверхности Земли с августа 1961 г., когда советским летчиком-космонавтом Г. С. Титовым впервые был получен снимок поверхности нашей планеты из космического пространства.

Отличительной чертой КС является высокая степень обзорности, охват одним снимком больших площадей поверхности. В зависимости от типа применяемой аппаратуры и фотопленок, фотографирование может производиться во всем видимом диапазоне электромагнитного спектра, в отдельных его зонах, а также в ближнем ИК (инфракрасном) диапазоне.

Масштабы съемки зависят от двух важнейших параметров: высоты съемки и фокусного расстояния объектива.

Космические фотоаппараты в зависимости от наклона оптической оси позволяют получать плановые и перспективные снимки земной поверхности.

В настоящее время используется фотоаппаратура с высоким разрешением, позволяющая получать КС с перекрытием 60% и более. Спектральный диапазон фотографирования охватывает видимую часть ближней инфракрасной зоны (до 0,86 мкм).

Для съемки земной поверхности с ПКК используются фотографирующие системы следующих марок: КАТЭ-140, МКФ-6, ФМС и др.

Наиболее широко используется камера МКФ-6М, разработанная в рамках программы «Интеркосмос» специалистами СССР и ГДР. Многозональная космическая фотокамера МКФ-6М состоит из корпуса с объективами, шести кассет по числу объективов, электронного блока и пульта управления. Параметры этой системы следующие:

высота съемки	200—400 км
количество каналов	6
затвор	центрального типа с вращающимися дисками
ширина пленки	до 70 мм
перекрытие	20—80%
объектив «Пинатар»	4/125

Фотографическая камера МКФ-6М имеет шесть спектральных каналов, работающих в следующих зонах спектра (мкм): 0,45—0,50; 0,52—0,56; 0,58—0,62; 0,64—0,68; 0,70—0,74; 0,78—0,86.

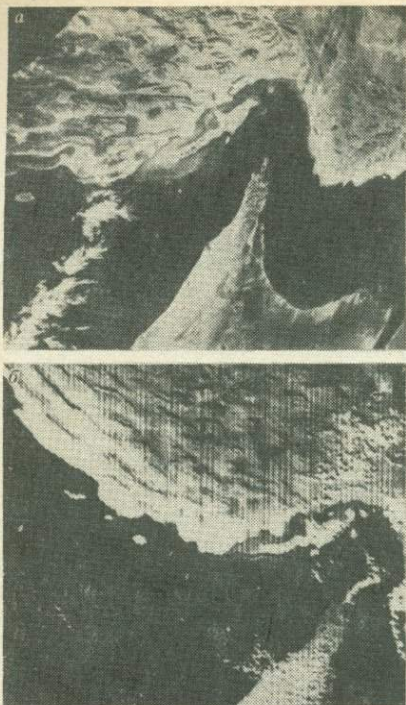


Рис. 2. Космические — фото (а) и телевизионный (б) — снимки гор Загрос в юго-западном Иране.

ей человеческого зрения, позволяя видеть все изображение одновременно.

Для удобства пользования из отдельных КС, имеющих перекрытия, монтируются фотосхемы (фотомозаики) или фотокарты с топографической привязкой опорных точек с точностью 0,1 мм и точнее. Для монтажа фотосхем используются только плановые КС.

Для приведения разномасштабного, обычно перспективного КС к плановому используется специальный процесс, называемый трансформированием. Трансформированные КС с успехом используются для составления космофотосхем и космофотокарт и обычно легко привязываются к географической сетке координат.

Для трансформирования КС используются стационарные приборы. Трансформирование КС и изготовление космофотокарт осуществляется специалистами-геодезистами на специальных приборах — трансформаторах.

### 3.3. Телевизионная космическая съемка

Телевизионная (ТВ) космическая съемка отличается от фотографической тем, что дает изображения с меньшим разрешением

Размер получаемого изображения  $55 \times 81$  мм. Изображение отличается высоким разрешением и может быть увеличено в несколько раз без потери информативности. Разрешение составляет 200 линий на 1 мм. Вне поля основного изображения на краях снимка располагаются сенситометрический клин, изображение часов, фиксирующих время съемки, код выдержки, номер кадра. Масштаб снимков, снятых с высоты 265 км, немногим мельче 1:2 000 000. Зональные снимки 1—4 каналов выдерживают увеличение до 60 раз и в таком увеличенном виде вполне пригодны для целей геологического дешифрирования. Снимки, полученные по пятому и шестому каналам, выдерживают увеличение только  $10 \times$ .

Отметим, что фотографическая съемка — в настоящее время самый информативный вид съемки из космического пространства.

Оптимальный размер отпечатка  $18 \times 18$  см, который, как показывает опыт, согласуется с физиологически

(рис. 2). Широко используется метеорологической службой. Находит применение в геологии.

Изображение при телевизионной съемке проецируется на приемное устройство — видикон, при помощи которого электромагнитные сигналы в фототелеграфном режиме по радиоканалу передаются на приемные станции Земли либо записываются на магнитную ленту. Поступающие на приемные станции Земли телесигналы усиливаются и преобразуются в видимые телевизионные изображения, фотографируемые с телеэкрана специальным устройством. Естественно, что такая многоступенчатая и сложная передача телеизображения производится с потерей его информативности. Своеобразной компенсацией этой потери является установка на ряде ИСЗ нескольких телекамер, работающих при помощи специальных светофильтров в разных режимах, с целью получения многозональных цветных изображений.

Важнейшей частью телекамеры является видикон — передающая трубка. Цикл работы трубки при космической ТВ-съемке составляет десятки секунд и включает следующие операции: экспозицию, считывание электронного изображения, подготовку к следующей экспозиции. Кадровые ТВ-изображения отличаются высокой геометрической точностью и возможностью получения стереоскопических пар за счет большого перекрытия.

ТВ-системами снабжены многие ИСЗ, в том числе «Метеор» (СССР) и «Нимбус» (США), материалы съемок которых широко применяются в геологических исследованиях. Сравнительные характеристики обеих ТВ-установок:

ИСЗ	«Метеор»	«Нимбус»
Высота полета, км	620—890	1070—1180
Полоса захвата, км	1000—1400	2700—3300
Размер кадра, см	11×11	25,4×25,4
Разрешение на местности, км	1,25—1,70	3,2—3,3
Область спектра, мкм	0,4—0,7	0,4—0,7

Преимущества космической ТВ-съемки — большая быстрота и оперативность. Однако ТВ-изображения обладают недостаточно высоким фотографическим качеством и слабым (в несколько раз меньшим по сравнению с фотоснимками) разрешением. Мешает процессу дешифрирования и наличие растровых полос, свойственных ТВ-изображению.

### 3.4. Фототелевизионная съемка

Телевизионный метод раньше иногда сочетали с фотографическим для суммирования достоинств обоих видов съемки. Сущность этого процесса заключалась в фотографировании объекта, автоматической обработке снимка на борту ИСЗ и передаче готового изображения телевизионным способом по каналам связи. Фотографирующая система при этой съемке улучшает качество изображения, увеличивает его разрешение, однако телевизионная передача изображения

на Землю с больших расстояний искажает его за счет атмосферных помех. В настоящее время не используется.

### 3.5. Сканерная космическая съемка

В настоящее время для съемок из космоса наиболее часто используются многоспектральные оптико-механические системы — сканеры, установленные на ИСЗ различного назначения. При помощи сканеров формируются изображения, состоящие из множества отдельных, последовательно получаемых элементов.

Термин «сканирование» обозначает развертку изображения при помощи сканирующего элемента (качающегося или вращающегося зеркала), поэлементно просматривающего местность поперек движения носителя и посылающего лучистый поток в объектив и далее на точечный датчик, преобразующий световой сигнал в электрический. Этот электрический сигнал поступает на приемные станции по каналам связи (рис. 3). Изображение местности получают непрерывно на ленте, составленной из полос — сканов, сложенных отдельными элементами — пикселями. Сканерные изображения можно получить во всех спектральных диапазонах, но особенно эффективным является видимый и ИК-диапазоны. При съемке земной поверхности с помощью сканирующих систем формируется изображение, каждому элементу которого соответствует яркость излучения участка, находящегося в пределах мгновенного поля зрения. Сканерное изображение — упорядоченный пакет яркостных данных, переданных по радиоканалам на Землю, которые фиксируются на магнитную ленту (в цифровом виде) и затем могут быть преобразованы в кадровую форму. В геологии используются материалы сканерных съемок с 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 (табл. 3).

Таблица 3

Технические параметры сканирующих устройств

Параметры	МСУ-М	МСУ-С	МСУ-СК	МСУ-Э
Полоса обзора, км	1930	1380	600	28
Угол сканирования, град	106	90	66,5	2,5
Число элементов в активной части строки	1880	5700	3614	1000
Число спектральных каналов	4	2	4	3
Разрешение на местности по строке, км	1	0,24	0,175	0,028
Масса, кг	4,5	5,5	47	17

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 увели-

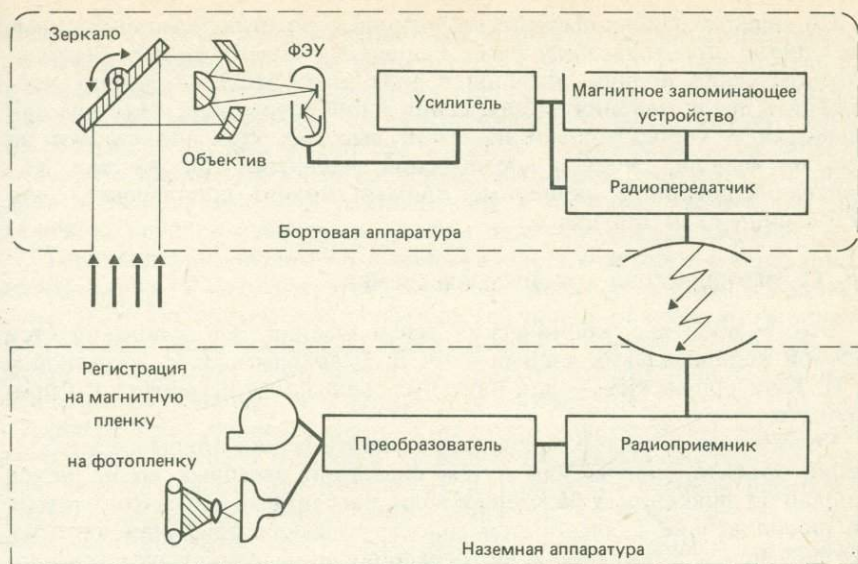


Рис. 3. Принципиальная схема сканирующего устройства.

чивают до  $\pm 50^\circ$ . Величина разрешения при этом обратно пропорциональна ширине снимаемой полосы.

За 5 лет (1976—1980) эксплуатации сканирующих систем, установленных на ИСЗ «Метеор/Природа», территория СССР снималась более 400 раз, т. е. в среднем чаще чем 1 раз в неделю.

На ИСЗ «Метеор», выведенном на орбиту 18 июня 1980 г., была смонтирована экспериментальная многозональная многоспектральная сканирующая система «Фрагмент», работающая по восьми каналам; параметры ее следующие:

Ширина полосы обзора, км	85
Темп съемки, км <sup>2</sup> /с	590
Полная информативность, бит/с	$5,6 \cdot 10^6$
Общее число каналов, шт	35
Площадь входного зрачка, см <sup>2</sup>	358
Масса, кг	280

Хорошо зарекомендовал себя сканер нового поколения, названный «тематическим картографом», которым были оснащены американские ИСЗ «Лэндсат-4 и -5». Сканер типа «тематический картограф» работает в семи диапазонах с разрешением 30 м в видимом диапазоне спектра и 120 м в ИК-диапазоне. Этот сканер дает большой поток информации, обработка которой требует большего времени, в связи с чем замедляется скорость передачи изображения. Число пикселей на снимках достигает более 36 млн. на каждом из каналов. Сканирующие устройства могут быть использованы не только для получения изображений Земли, но и для измерения радиации — сканирующие радиометры — и излучения — сканирующие спектрометры.

По качеству сканерный снимок уступает фотографическому снимку. Однако простота получения сканерных изображений, быстрая автоматическая подача сигналов с различных ИСЗ на Землю, возможность представления изображения в цифровом виде, удобном для обработки и корректировки на ЭВМ, выводят этот вид съемки на одно из ведущих мест в космической геологии. Так же как КС, трансформированные сканерные снимки можно использовать для составления схем (мозаик).

### 3.6. Голографическая космическая съемка

Это редкий вид космических исследований. Он рекомендуется группой ленинградских ученых — В. В. Шарковым, З. И. Гурьевой и Е. И. Кильдюшевским — для изучения шельфа из космического пространства.

Голограмма — интерференционная картина или объемное изображение объекта, получаемая путем фиксации световых волн. Метод основан на фиксации отраженных волн, рассеянных объектом съемки. На фотопластине формируется голографическая объемная картина, которая впоследствии путем фотографирования преобразуется в плановый или перспективный снимок.

Голографическая съемка может быть использована для изучения поверхности Земли с ИСЗ и в сочетании с другими методами съемки и в значительной мере повысить достоверность дешифрирования.

### 3.7. Радиолокационная (радарная) съемка

Радиолокационная (РЛ) съемка — важнейший вид дистанционных исследований. Используется в условиях, когда непосредственное наблюдение поверхности планет затруднено различными природными условиями: плотной облачностью, туманом и т. п. Она может проводиться в темное время суток. При РЛ-съемке обычно используются радиолокаторы бокового обзора, установленные на самолетах и ИСЗ.

С помощью бокового обзора РЛ-съемка осуществляется в радиодиапазоне электромагнитного спектра. Сущность съемки заключается в посылке радиосигнала, отражающегося по нормали от изучаемого объекта и фиксируемого на приемнике, установленном на борту носителя. Радиосигнал вырабатывается специальным генератором. Время возвращения его в приемник зависит от расстояния до изучаемого объекта. Этот принцип работы радиолокатора, фиксирующего различное время прохождения зондирующего импульса до объекта и обратно, используется для получения РЛ-снимков. Изображение формируется бегущим по строке световым пятном. Чем дальше объект, тем больше времени надо на прохождение отражаемого сигнала до его фиксации электронно-лучевой трубкой, совмещенной со специальной кинокамерой.

В СССР широко используется самолетная радиолокационная станция «Торос», с помощью которой в любое время суток получают две полосы бокового обзора в масштабах 1:90 000 и 1:180 000.

Станция «Торос», установленная на самолете, эксплуатируется для изучения ледового покрова в арктических морях и для геологических исследований. РЛ-съемка является оперативным и производительным методом ДЗ, с разрешающей способностью от 10 до 200 м. Обычно на самолетах устанавливают два локатора — справа и слева. Участок местности, расположенный непосредственно под самолетом, не попадает в область действия радиосигнала и образует «мертвую» зону, величина которой зависит от высоты полета и угла локации.

При дешифрировании РЛ-снимков следует учитывать тон радарного изображения и его текстуру. Тоновые неоднородности РЛ-снимка зависят от литологических особенностей пород, размера их зернистости, устойчивости процессам выветривания. Тоновые неоднородности могут варьировать от черного до светлого цвета. Опыт работы с РЛ-снимками показал, что черный тон соответствует гладким поверхностям, где, как правило, происходит почти полное отражение посланного радиосигнала. 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, например, характерна для горных районов, сложенных часто чередующимися слоями осадочных или метаморфических пород, массивная — для районов развития интрузивных образований. Особенно хорошо получается на РЛ-снимках гидросеть. Она дешифрируется лучше, чем на фотоснимках. Высокое разрешение РЛ-съемки в районах, покрытых густой растительностью, открывает широкие перспективы ее использования во многих частях Земли, в частности в затаженных районах Сибири, в долине Амазонки и т. п. (рис. 4).

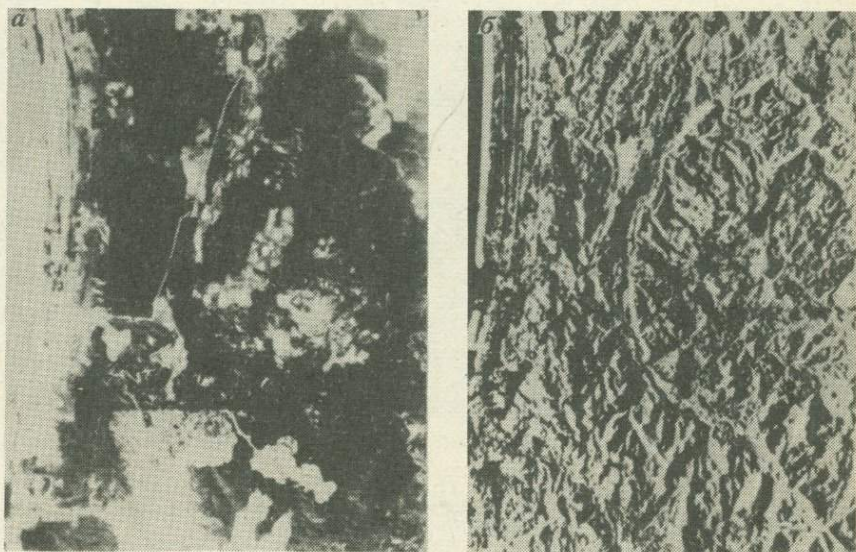


Рис. 4. Сравнительная информативность изображения аэрофото- (а) и РЛ-снимка (б) района Сивайд, шт. Орегон. По Г. Смитю.



Рис. 5. РЛ-снимок поверхности Венеры. Видны линейные складчатые деформации.

РЛ-системы с конца 70-х годов стали устанавливать на ИСЗ. Так, например, первый радиолокатор был установлен на американском спутнике «Сисат», предназначенном для изучения динамики океанических процессов. Позднее был сконструирован радар, испытанный во время полетов космического корабля «Шатл». Информация, полу-

ченная с помощью этого радара, представляется в виде черно-белых и ложноцветных синтезированных фото-, телеизображений или записей на магнитную ленту. Разрешающая способность 40 м. Информация поддается числовой и аналоговой обработке, такой же, что и сканерные снимки системы «Лэндсат». Это в значительной мере способствует получению высоких результатов дешифрирования. Во многих случаях РЛ-снимки оказываются геологически более информативными, чем снимки «Лэндсат». Наилучший результат достигается при комплексном дешифрировании материалов того и другого видов. РЛ-снимки успешно используются для изучения трудно- или недоступных территорий Земли — пустынь и областей, расположенных в высоких широтах. Так, например, советскими специалистами проанализированы РЛ-снимки полярных областей планеты — Арктики и Антарктики,— полученные с ИСЗ.

Успешно использована РЛ-съемка при изучении Венеры — планеты, покрытой мощным облачным слоем (рис. 5). Благодаря РЛ-съемке, поверхность этой планеты стала доступна для исследования. Совершенствование РЛ-аппаратуры должно повлечь за собой дальнейшее повышение роли радиолокации в дистанционных исследованиях Земли, особенно при изучении ее геологического строения.

### 3.8. Инфракрасная съемка

Инфракрасная (ИК), или тепловая, съемка основана на выявлении тепловых аномалий путем фиксации теплового излучения объектов Земли, обусловленного эндогенным теплом или солнечным излучением. Она широко применяется в геологии.

Температурные неоднородности поверхности Земли возникают в результате неодинакового нагрева различных ее участков.

Методика тепловой аэросъемки при изучении природных ресурсов Земли в СССР разработана В. Б. Шилиным и другими исследователями.

Инфракрасный диапазон спектра электромагнитных колебаний условно делится на три части (в мкм): ближний (0,74—1,35), средний (1,35—3,50) и дальний (3,50—1000).

Солнечное (внешнее) и эндогенное (внутреннее) тепло нагревает геологические объекты по-разному в зависимости от литологических свойств пород, тепловой инерции, влажности, альбедо и многих других причин. ИК-излучение, проходя через атмосферу, избирательно поглощается, в связи с чем тепловую съемку можно вести только в зоне расположения так называемых «окон прозрачности» — местах пропускания ИК-лучей. Опытным путем выделено четыре основных окна прозрачности (в мкм): 0,74—2,40; 3,40—4,20; 8,0—13,0; 30,0—80,0. Некоторые исследователи выделяют большее число окон прозрачности. В первом окне (до 0,84 мкм) 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 невидимое ИК-излучение в видимое с помощью электроннолучевых трубок, фиксируя тепловые аномалии. На ИК-изображениях светлыми тонами фиксируются участки с низкими температурами, темными — с относительно более высокими (рис. 6). Яркость тона прямо пропорциональна интенсивности тепловой аномалии. ИК-съемку можно проводить в ночное время. На ИК-снимках, полученных с ИСЗ, четко вырисовывается береговая линия, гидрографическая сеть, ледовая обстановка, тепловые неоднородности водной среды, вулканическая деятельность и т. п. ИК-снимки используются для составления тепловых карт Земли. Линейно-полосовые тепловые аномалии, выявляемые при ИК-съемке, интерпретируются как зоны разломов, а площадные и концентрические — как тектонические или орографические структуры. Например, наложенные впадины Средней Азии, выполненные рыхлыми кайнозойскими отложениями, на ИК-снимках дешифрируются как площадные аномалии повышенной интенсивности. Особенно ценна информация, полученная в районах активной вулканической деятельности.

В настоящее время накоплен опыт использования ИК-съемки для изучения дна шельфа. Этим методом по разнице температурных аномалий поверхности воды получены данные о строении релье-

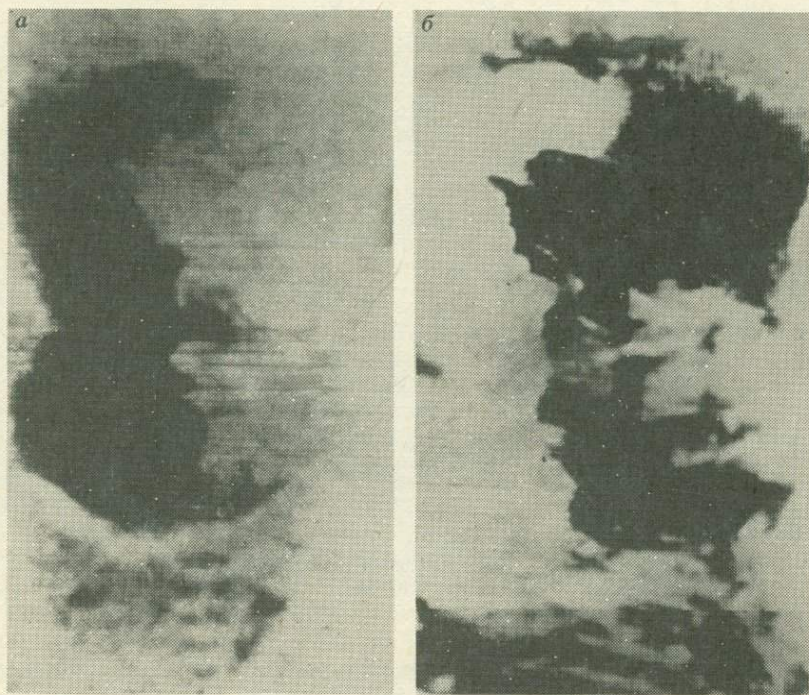


Рис. 6. ИК-изображение района Каспийского моря («Метеор»):  
а — дневной снимок, б — ночной снимок.

фа дна. При этом использован принцип, согласно которому при одинаковом облучении поверхности воды на более глубоких участках водных масс энергии на нагревание расходуется больше, чем на более мелких. В результате температура поверхности воды над более глубокими участками будет ниже, чем над мелкими. Этот принцип позволяет на ИК-изображениях выделять положительные и отрицательные формы рельефа, подводные долины, банки, гряды и т. п.

ИК-съемка в настоящее время применяется для решения специальных задач, особенно при поисках подземных вод и в инженерной геологии.

### 3.9. Спектрометрическая съемка

Спектрометрическая (СМ) съемка проводится с целью измерения отражательной способности горных пород. Знание значений коэффициента спектральной яркости горных пород расширяет возможности геологического дешифрирования, придает ему большую достоверность. Горные породы имеют различную отражательную способность и поэтому отличаются величиной коэффициента спектральной яркости. СМ-съемка делится на три вида:

1) микроволновая (0,3 см—1,0 м), являющаяся универсальной, так как исключает влияние атмосферы;

2) ИК или тепловая (0,30—1000 мкм), выявляющая температурные неоднородности по энергетической яркости изучаемых объектов;

3) спектрометрия видимого и ближнего ИК-спектра излучения (0,30—1,40 мкм), фиксирующая спектральное распределение отраженного радиационного излучения. Геологические объекты отражаются на КС с разной степенью контраста, зависящего от их спектральных особенностей.

Работа по составлению банка данных о спектральных характеристиках горных пород чрезвычайно трудоемка. Для того чтобы ее выполнить, необходимо произвести спектрометрические измерения горных пород на разных расстояниях, в различные времена года, на участках с различной степенью обнаженности. В настоящее время увеличение пограничных контрастов достигается использованием многозональных снимков, полученных в относительно узких зонах спектра.

### 3.10. Магнитная съемка

Магнитная съемка из космоса ведется с 1958 г. Данные магнитных измерений автоматически передаются на Землю для обработки на ЭВМ. Результаты обработки — кругосветные профили или карты главного магнитного поля Земли. Источники магнитных аномалий, фиксируемые ИСЗ, расположены на больших глубинах, возможно, на границе ядро — мантия.

Магнитометры, установленные на АМС, дают возможность изучать магнитное поле планет Солнечной системы.

Результаты магнитометрической съемки из космоса представляют большой интерес для сравнительной геологии планет.

### 3.11. Лазерная съемка

Лазерная съемка основана на использовании монохроматического излучения с фиксированной длиной волны. Постоянство длины волны лазера дает возможность уточнить параметры орбиты Земли и других планет, фиксировать перемещения отдельных блоков в земной коре. Для геологических целей используется *лидарная* спектрометрия, входящая в группу активных съемок, использующая импульсный источник излучения — лазер. Лидарная спектрометрия — геохимическая съемка приповерхностных слоев атмосферы проводится для обнаружения в них микроэлементов или их соединений, концентрирующихся над современно активными геологическими объектами. Сущность метода заключается в активном зондировании приповерхностных слоев атмосферы и регистрации результатов дистанционного спектрального анализа.

Дальнейшее усовершенствование лазерной техники открывает новые возможности для ее использования в геологических целях.

#### *Вопросы для самопроверки*

1. В чем различие активных и пассивных методов измерений с орбитальных комплексов? Как вы считаете, космовизуальные наблюдения являются активными или пассивными?

2. У сканирующего устройства МСУ-СК угол сканирования равен  $66,5^\circ$ . Является этот сканер точным или обзорным?

3. Почему два ИК-изображения Каспийского моря на рис. 6 так резко отличаются друг от друга?

4. Можно ли с помощью лидарной съемки определять концентрацию компонентов в водах озер?

## Глава 4

### **ВИДЫ МАТЕРИАЛОВ КОСМИЧЕСКИХ СЪЕМОК ПО УРОВНЯМ ГЕНЕРАЛИЗАЦИИ**

Материалы космических съемок по уровням генерализации, степени обзорности и величине разрешающей способности принято подразделять на пять видов: глобальные, континентальные, региональные, локальные и детальные (табл. 4).

**Глобальные КС** получают с больших высот во время следования АМС к другим планетам. На глобальных КС фиксируются отдельные полушарии Земли или значительные по площади участки земной поверхности (рис. 7). Глобальные КС получают с негативов масштаба мельче 1:50 000 000. Разрешающая способность таких снимков многие километры. Глобальные снимки отличаются значительной деформацией изображения и перспективностью за счет сферичности поверхности Земли, а также искажениями за счет влияния атмосферной дымки и облачного покрова.

Уровень генерализации	Космические носители	Высота съемки, км	Обзорность (площадь), км <sup>2</sup>	Разрешающая способность	Вид съемки	Возможности использования в геологии
Глобальный	«Зонд», «Метеор», «Нимбус»	Десятки тысяч	Полушария Земли, свыше 10 млн.	Километры	Фото, ИК, сканерная	Съемка планет Солнечной системы, изучение континентов и крупнейших тектонических структур; составление сводных карт земного шара
Континентальный	«Метеор», «Салют»	Первые тысячи	Отдельные континенты, территория СССР, 5—10 млн.	Километры	Фото, РЛ, ТВ, сканерная	Изучение геологической структуры континентов, складчатых областей, составление и уточнение сводных карт континентов
Региональный	«Метеор», «Салют», «Космос», «Лэндсат»	До 1 тысячи	Сотни тысяч	Сотни метров	ТВ, сканерная, фото	Изучение систем линейных, крупных кольцевых структур, тектонических швов, составление мелкомасштабных карт
Локальный	То же	150—300	До 100 тыс.	Десятки метров	Фото, ТВ, РЛ, сканерная	Изучение отдельных линейных, кольцевых структур, складок, разрывов, слоистости и т. п., составление среднemasштабных карт
Детальный	»	150—300	Менее 10 тыс.	Метры	Фото, сканерная, РЛ, ИК	Изучение складчатых и разрывных структур, как на высотных аэрофотоснимках, составление детальных карт

В геологии глобальные КС могут быть использованы для изучения взаимосвязей крупнейших геотектонических структур — складчатых поясов, щитов и плит древних и молодых платформ, очертаний отдельных континентов, для составления и корректировки сводных геологических карт земного шара. По этим снимкам достаточно уверенно выявляются линейные структуры протяженностью в несколько тысяч километров и кольцевые образования континентального значения диаметром во многие сотни километров.

**Континентальные КС** получают при ТВ, фотографической и РЛ-съемках с высот в несколько тысяч километров. Съемка ведется с ИСЗ и ПКК. Снимки континентального уровня генерализации, как правило, с большими искажениями, имеют разрешающую способность, в несколько километров. Они пригодны для изучения больших территорий (рис. 8). Могут использоваться при составлении или для уточнения геологических карт отдельных континентов.

**Региональные КС** охватывают площадь в сотни тысяч квадратных километров, отличаются достаточно высокой разрешающей способностью, позволяющей дешифрировать системы крупных линейных элементов, кольцевые структуры различных диаметров и разного генезиса, оконтуривать складчатые области и крупные платфор-

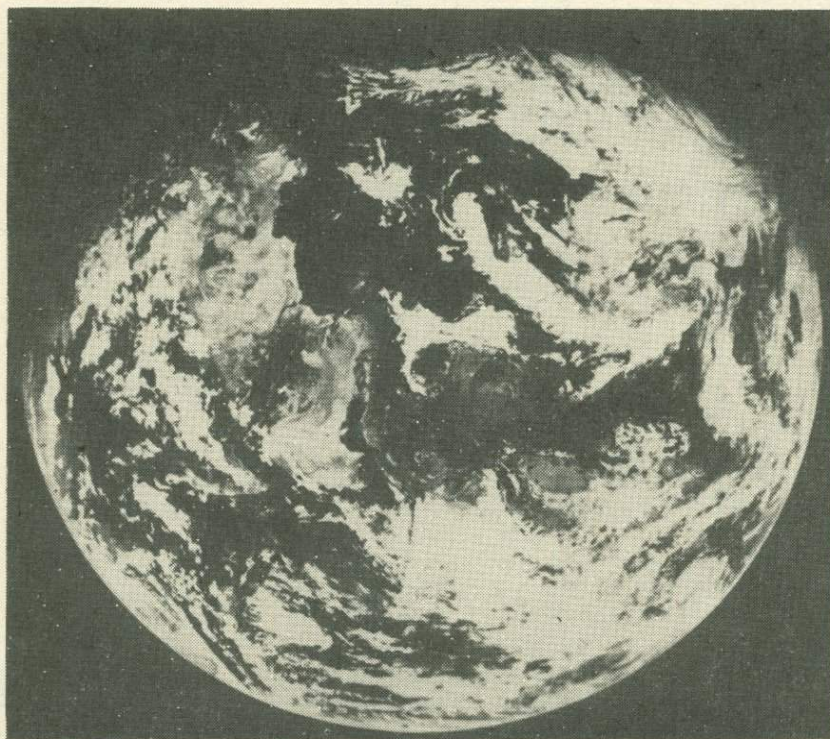


Рис. 7. КС Земли глобального уровня генерализации, полученный с расстояния около 70 тыс. км АМС «Зонд-7».

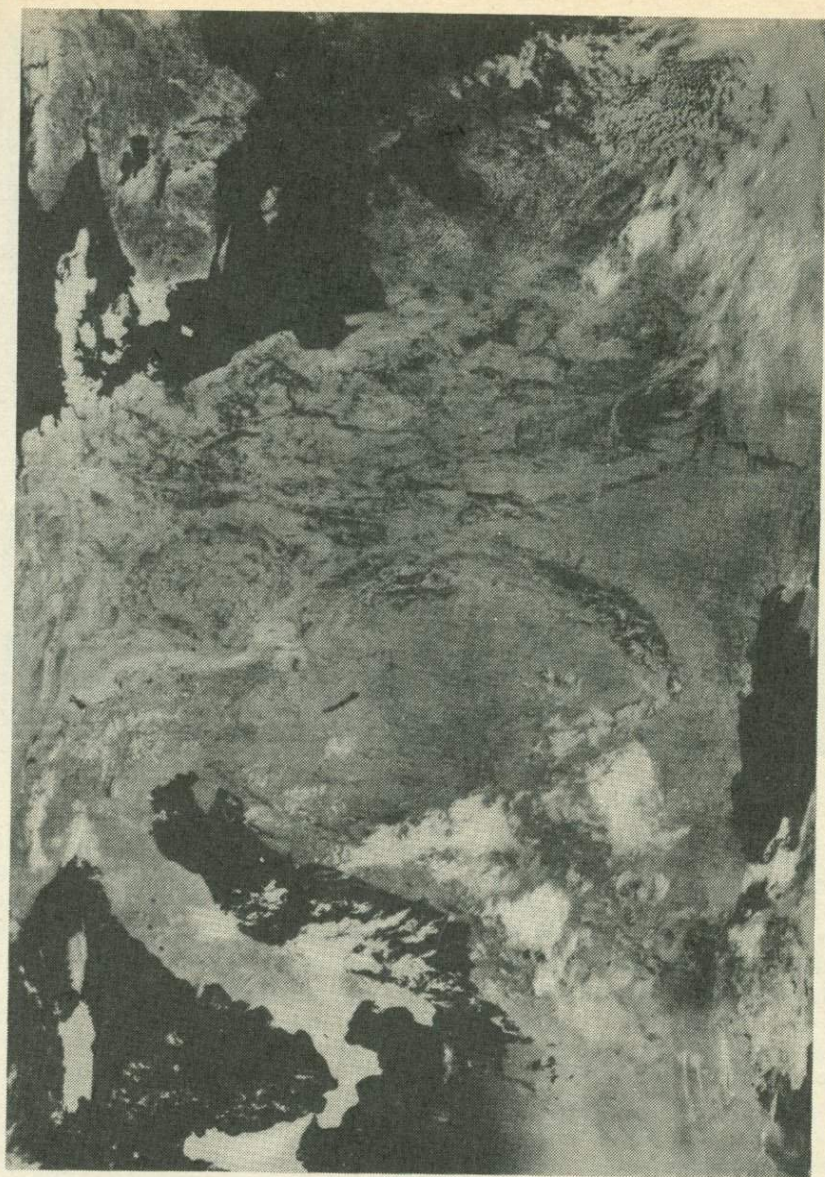


Рис. 8. КС континентального уровня генерализации, охватывающий территорию Центральной Европы. «Метеор-30».

менные сооружения. Региональные КС успешно используются при тектоническом и геоморфологическом районировании при составлении среднemasштабных карт геологического содержания. На них выявляется «эффект просвечивания», позволяющий изучать глубинную структуру. По региональным КС можно дешифровать

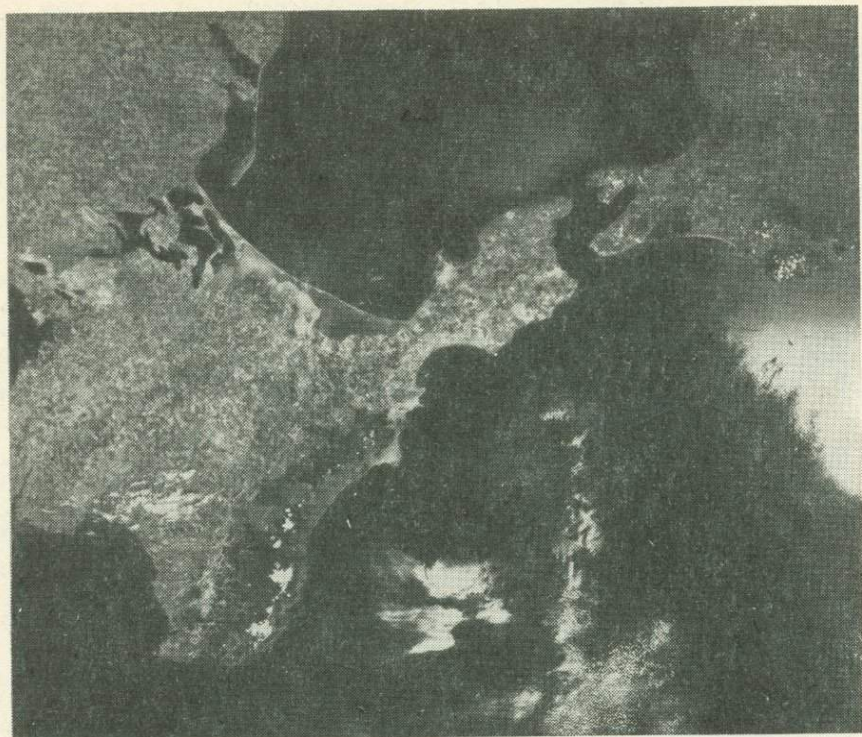


Рис. 9. КС регионального уровня генерализации. Крымский п-ов. «Салют-4».

различные структурно-формационные комплексы и определять кинематические характеристики некоторых разрывных нарушений. К этой категории КС относится значительная часть материалов космических съемок, используемая в народном хозяйстве. Они выполняются с ПКК и ДОС «Салют» (рис. 9) и метеорологическими спутниками Земли серии «Метеор» и др.

К недостаткам относятся искажения изображения за счет сферичности земной поверхности и связанная с этим явлением разномасштабность снимков. К достоинствам относятся высокая информативность, обобщенность мелких деталей, широта обзора.

**Локальные КС**, так же как и региональные КС, — наиболее распространенный вид материалов, составляющих вместе свыше 90% от объема всех снимков, используемых в народном хозяйстве, в том числе в геологии. Высота съемки 150—300 км, площадь охвата до 100 тыс. км<sup>2</sup>. Разрешающая способность десятки метров. Съемка ведется с ПКК ручными или автоматическими фотокамерами, а также с ИСЗ телекамерами и сканерами. Локальные КС позволяют: выделять и оконтуривать структурно-формационные и вещественные комплексы; расшифровывать внутреннюю структуру геологических формаций; изучать современные геологические про-

цессы, кинематику разрывных нарушений, связь между складчатыми и разрывными структурами, вулканическую и интрузивную деятельность. Они находят широкое применение при составлении или уточнении крупномасштабных карт геологического содержания.

Особенно большая информация извлекается при одновременной работе со снимками регионального и локального уровня генерализации. Первые дают широкий обзор, вторые — высокую информативность.

Детальные КС получают путем использования длиннофокусных объективов, они близки по информативности к высотным аэрофотоснимкам. Обычно используются для детализации геологических структур, выявленных на локальных КС. По ним уточняются геологические границы, контуры интрузивных массивов и т. п. В некоторых случаях — для выяснения глубинной структуры.

## Глава 5

### ПРЕДВАРИТЕЛЬНАЯ ОБРАБОТКА ИСХОДНЫХ ДАННЫХ И ПРЕОБРАЗОВАНИЕ ИЗОБРАЖЕНИЙ В ГЕОЛОГИЧЕСКИХ ЦЕЛЯХ

#### 5.1. Задачи предварительной обработки

Большая часть информации, получаемой при помощи дистанционной аппаратуры, непригодна для немедленной обработки методами визуального или автоматического дешифрирования. Датчики, установленные на высотных носителях, регистрируют исходную информацию в виде: а) аналоговых сигналов, записанных на магнитную ленту; б) аналоговых сигналов, преобразованных в цифровую форму и также записанных на магнитную ленту; в) негативов. Для дальнейшего использования информация преобразуется в одну из следующих форм: а) позитивные отпечатки или фотодиапозитивы; б) цифровые данные на магнитной ленте в форме, пригодной для обработки на ЭВМ; в) распечатки, графики и диаграммы, построенные ЭВМ; г) аналоговые записи на магнитной ленте.

Таким образом, можно указать три основные операции в начале обработки данных. Это фотографическая обработка; преобразование записанных на магнитной ленте сигналов из аналоговой в цифровую форму и получение записи, пригодной для обработки на ЭВМ; цифровое представление изображений и, наоборот, формирование изображений из записанных в цифровой форме данных.

Продолжением первичной обработки данных является их коррекция, призванная устранить масштабные искажения формирующихся изображений, а также случайные помехи при регистрации и передаче данных, выровнять изображения по плотности, уси-

лить или уменьшить контрастность и т. д. Практически все эти операции производятся в автоматическом режиме, для чего требуется достаточно сложная аппаратура, включающая вычислительные комплексы.

## 5.2. Преобразование изображений в целях геологического дешифрирования

Преобразование первично обработанных и скорректированных видеоизображений земной поверхности, а также других графических материалов, применяемых при геологическом дешифрировании, имеет целью усилить или сделать более наглядными определенные их характеристики, необходимые для решения поставленных перед дистанционным зондированием геологических проблем.

При этом решаются разные задачи. В качестве наиболее распространенных можно выделить следующие: 1) выделение элементов изображения по их цвето-тональным характеристикам; 2) выделение объектов по их геометрическим характеристикам; 3) получение совместных («синтезированных») изображений и выделение объектов по их яркостным характеристикам в разных частях спектра; 4) выделение объектов по статистическим характеристикам элементов изображения (при анализе одного или нескольких изображений); 5) преобразование изображений в форму, удобную для сравнения с другими данными; 6) преобразование изображения с целью подавления шума и увеличения доли полезного сигнала.

1. Выделение элементов изображения по их цвето-тональным характеристикам. Среди этой группы преобразований наиболее распространены квантование и сегментация. *Квантование* — расслоение изображения по плотности фототона. По фотографическим или электронным изображениям с помощью цифровой фильтрации можно выделить любую градацию или несколько градаций фототона и эти данные вывести на графопостроитель, дисплей или на фоторегистрирующее устройство. Для этого обрабатываемые изображения представляются в дискретной форме, а оптическая плотность квантуется на заданное число уровней. Диапазон градаций варьирует от 0 до 256, из которых реально используется 40—80. Задача состоит в сокращении числа градаций до заданного числа уровней квантования. Известны различные способы сокращения. Простейший из них — равномерное квантование, при котором весь диапазон градаций фотоплотности делится на одинаковые интервалы. Более сложно равновероятностное квантование, при котором уровни квантования связываются с амплитудой сигнала (т. е. фактически ширина уровня квантования зависит от площади изображения, занятой той или иной градацией фотоплотности), и пропорциональное квантование, учитывающее статистические характеристики сигнала. Квантованные изображения могут раскрашиваться в черно-белой гамме, близкой к исходным черно-белым снимкам, либо в условных контрастных цветах.

*Сегментация* — выделение площадных элементов изображений, однородных по фотоплотности. Эта операция может быть выполнена с применением различных методов группировки точек, обладающих близкими свойствами. Такое преобразование позволяет усилить особенности, связанные с изменениями оптической плотности, и подавить несущественные флуктуации. Одна из процедур сегментации заключается в вычислении для каждого пиксела (элемента изображения) функции, называемой градиентом, определенным образом связанной с различиями в фотоплотности анализируемого пиксела и граничащих с ним; затем значение этой функции сравнивается с пороговой, причем для пикселов с градиентом ниже порогового плотность преобразуется в нулевую, а в случае, если градиент выше порогового, она остается прежней. Таким образом, участки с малоконтрастными деталями представляются нулевыми значениями плотности, а плотности, соответствующие большим контрастам изображения, сохраняются. В результате полученными контурами изображение сегментируется, отдельные сегменты для наглядности могут быть раскрашены.

В более сложном варианте сегментации учитываются не только градиент плотности, но и уровни самой плотности, используются и другие процедуры.

2. Выделение объектов по их геометрическим характеристикам. Эта группа преобразований изображений направлена на обособление и визуализацию объектов определенной конфигурации, чаще всего линейных. Поскольку геометрические характеристики элементов изображения передаются фототональными контрастами, то разделение рассмотренной и этой групп преобразований достаточно условно; единственно, что анализ геометрических характеристик изображений может достаточно качественно производиться и относительно простыми оптико-механическими методами, без применения ЭВМ. Рассмотрим для примера растровый и один из компьютерных методов выделения линейных особенностей фотоизображения.

*Принцип растровой фильтрации* — состоит в проекционном оптическом сопряжении исходного изображения (негатива) и линейного регулярного раstra. При вращении раstra относительно неподвижного исходного изображения происходит структурное преобразование пучка лучей, проходящих через изображение и растр. В результате этого на выходе рассматриваемой системы удастся получить различия в яркости светового потока для разнонаправленных элементов исходного изображения (рис. 10). Это можно зафиксировать на светочувствительной пленке в виде преобразованного изображения с выделенными элементами исходного изображения, перпендикулярного линейатуре раstra. Эти элементы имеют большую яркость по сравнению с элементами изображений другой ориентировки. Ориентируя соответствующим образом растр и повторяя процедуры, можно получить полную схему линейных особенностей изображения.

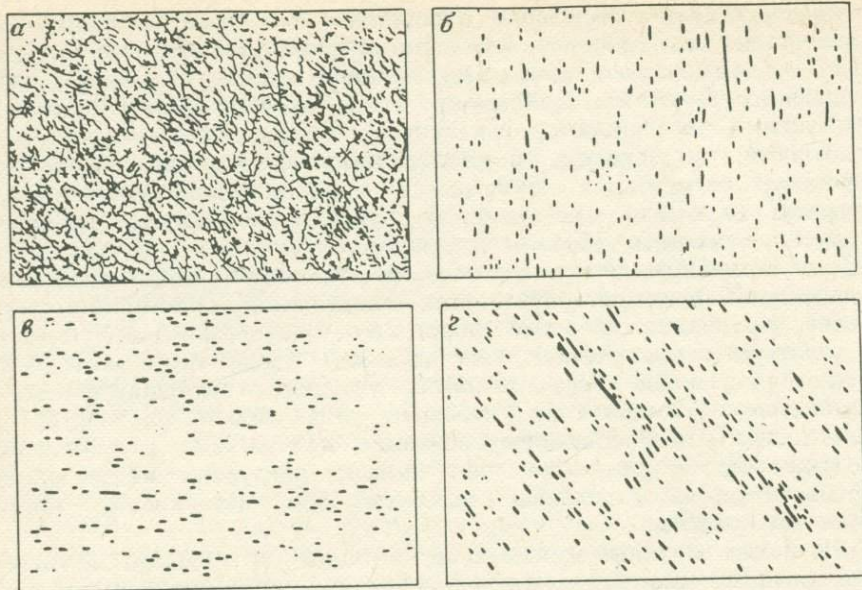


Рис. 10. Выделение линеаментов заданного простирания методом оптической фильтрации. По В. Б. Комарову.

Схема линеаментов (а) и фильтрованные ее изображения с простиранием линеаментов в диапазонах северо-северо-запад  $355^\circ$  (б), востоко-северо-восток  $85^\circ$  (в) и северо-запад  $300^\circ$  (г).

Компьютерные процедуры выделения линейности изображения разнообразны. В их основе лежит перевод изображения в дискретную форму, квантование изображения на небольшое число уровней и (или) фильтрация изображения с целью подавления случайных отклонений, а затем объединение равноплотностных или равноградиентных точек, граничащих друг с другом, в прямолинейные цепочки. С помощью несложных преобразований выделенные сети «линеаментов» фильтруются для выделения линейности различных простираний. Следует заметить, что в некоторых случаях указанные процедуры называют автоматическим дешифрированием линейных структур земной коры. Это не совсем так; в силу различных причин линейные особенности изображения могут не соответствовать геологическому строению изучаемой территории. Подлинное дешифрирование предусматривает создание геологических моделей изображения и идентификацию модели и реальности.

3. Получение совместных («синтезированных») изображений. Синтезированные изображения изготавливают обычно в тех случаях, когда необходимо либо совместить в одном кадре информацию, полученную разными методами, либо выявить или подчеркнуть разные свойства анализируемых объектов при различных условиях съемки. Наиболее популярно совмещение изображений, полученных в разных спектральных диапазонах, обладающих различной информативностью по отношению к конкретным свойствам геологической среды. Совмещение

может производиться как фотографическими, так и компьютерными методами. Так, например, можно выбрать три наиболее отличающихся спектральных снимка (одного района), приготовить диапозитивы (негативы и позитивы) каждого из них и, совместив негативы и позитивы из разных участков спектра, получить промежуточные изображения. Затем все промежуточные изображения печатают так, чтобы каждое из них получилось только в одном из цветовых слоев цветной пленки, и получают цветной производный диапозитив. Промежуточные изображения передают различия в отражательной способности объектов по участкам спектра. Там, где таких различий нет, негативы и позитивы нейтрализуют друг друга и полученный диапозитив окажется в этих местах бесцветным. Здесь совмещенное изображение оказывается как бы суммой разностей исходных. В некоторых случаях оказывается полезней складывать исходные изображения без вычитания.

С помощью ЭВМ процедуры сложения и вычитания изображений можно производить намного быстрее и дешевле. Изображения переводятся в дискретную цифровую форму, и затем компьютер выполняет с ними все необходимые операции — от сложения и вычитания значений яркости до совмещения, учитывающего различные, достаточно сложные характеристики пространственного распределения значений измеряемых параметров, а также данные наземных наблюдений. Синтезированные изображения обычно раскрашиваются в условные цвета, усиливающие зрительный контраст наиболее существенных объектов или свойств объектов.

Интересные результаты дает совмещение фото или сканерных снимков, имеющих высокую разрешающую способность, с радарными снимками, удачно отражающими морфологию рельефа, а также радарных снимков, полученных при разных углах локации.

4. Выделение объектов по статистическим характеристикам элементов изображения. Преобразования этой группы сопрягаются с задачами сегментации изображения и применяются для анализа как дистанционных данных, так и различных картографических материалов, в том числе результатов дешифрирования или обработки КС. Общим для них является то, что в результате преобразований выделяются объекты, различающиеся статистическими параметрами слагающих их элементов. Так, например, может быть выделена пространственная структура изображения в случае, когда задано или может быть оценено распределение значений оптической плотности фонового изображения. Сущность метода состоит в следующем. Рассмотрим два участка изображения — соответствующий однородному ландшафту и произвольный. Примем первый участок в качестве фонового, а соответствующее ему распределение вероятностей оптической плотности — в качестве эталонного. Построим распределение вероятностей оптических плотностей на произвольном участке и оценим, принадлежит ли оно к эталонному. Если критерий не удовлетворяется, отыскиваются оптические плотности («аномалии»), принадлежащие неоднородностям. Таким образом могут быть сформированы поля — аномальное и фоновое.

Широко применяют преобразования изображения для морфометрических построений, когда на картах исходных данных выделяются участки с различными статистическими характеристиками элементов рельефа, а также для сравнения между собой карт различных параметров, получая, например, схемы в изолиниях коэффициентов корреляции магнитного и гравитационного полей или геофизических полей и плотности линеаментов и т. д.

5. Преобразование изображений в форму, удобную для сравнения с материалами других исследований. Кроме задач масштабных преобразований, широко применяются преобразования линейных объектов в площадные и, наоборот, площадных в линейные. Например, для сравнения схем линеаментов со структурой геофизических полей, сети линейных структур переводятся в схемы пространственной плотности линеаментов, причем возможны компьютерные процедуры, учитывающие общее количество линеаментов, их длину и пространственную ориентировку. Аналогично могут быть преобразованы схемы эрозионной сети, в том числе с учетом долин разных порядков. В то же время могут решаться и обратные задачи. Так, для сопоставления фоновой сейсмичности с линейными деформациями земной коры, которые выражаются в ландшафте и на космических изображениях в виде линеаментов, разработаны процедуры линеаризации карт плотности эпицентров, по содержанию своему похожие на указанные способы компьютерного выделения линейных особенностей космических изображений.

6. Преобразование изображения с целью подавления шума и увеличения доли полезного сигнала (фильтрация). В совокупности данных измерений поверхности Земли, формирующих космический снимок, закодирована информация о геологическом (геоморфологическом, ландшафтном и т. п.) строении изучаемого участка. На оптические и другие измеряемые характеристики земной поверхности влияет большое количество факторов. Поверхность Земли можно рассматривать как сложную систему, в которой свойства каждого из элементов определяются, с одной стороны, всей совокупностью системных отношений, а с другой — флуктуациями локального характера. Это означает, что полезный сигнал о том или ином элементе системы будет всегда сопровождаться «шумом», причем интенсивность шума во многих случаях может значительно превосходить интенсивность сигнала. Поэтому для решения многих задач необходимо преобразовать исходное изображение (или совокупность цифровых данных) таким образом, чтобы отношение сигнал — шум стало более высоким. Это увеличивает долю полезного сигнала, но не увеличивается информативность изображения.

Описанные методы преобразования изображений и являются фильтрацией по отношению к тому полезному признаку, который они призваны визуализировать. Приведем еще один оригинальный метод преобразований — фильтрацию на основе накопления случайного шума.

Данный вид фильтрации применяется в том случае, когда отсутствует информация о выделяемой структуре, но известен закон распре-

ления или дисперсия фонового шума, причем по интенсивности шум значительно превосходит выделяемую структуру.

Сущность способа состоит в генерировании случайного фонового шума и многократном суммировании его с зашумленным сигналом, для усиления сигнала (закономерных изменений) и подавления шума (случайных изменений). Дело в том, что при  $n$ -кратном генерировании случайной величины, распределенной по тому же закону, что и распределение исходного шума, дисперсия фонового изображения уменьшается также в  $n$  раз и соответственно четкость проявления полезной доли изображения на выровненном фоне увеличивается.

В связи с усложнением дистанционных измерительных комплексов и с развитием методов автоматического и интерактивного дешифрирования (см. следующую главу), количество задач и методов преобразования изображений в геологических целях непрерывно увеличивается. При этом далеко не всегда затраты на эти цели адекватны полученным результатам. Особенно явно это проявляется тогда, когда компьютерная обработка изображения не ориентирована на решение четко поставленной геологической задачи и внешне очень эффективные изображения по информативности уступают своим более простым и скромным прообразам.

### 5.3. Важнейшие технические средства визуального геологического дешифрирования космических снимков

Космические снимки средних и детальных масштабов имеют большое (60—70%) перекрытие, позволяющее составить стереопару, необходимую для достижения стереоэффекта. Снимки глобальных масштабов стереоэффекта практически не дают.

Для дешифрирования КС применяют те же приборы, что и при работе с аэрофотоснимками. В качестве основных используются: стереоскопы, интерпретоскопы, стереометры. Однако при визуальном инструментальном дешифрировании КС всегда следует помнить о том, что они имеют значительную оптическую генерализацию объектов и большую обзорность.

**Стереоскопы.** Для геологического дешифрирования космических снимков могут быть использованы следующие типы стереоскопов: линзовые, зеркальные и зеркально-линзовые.

Линзовый стереоскоп — простейшая оптическая система из двух линз, выполненная в виде очков, лорнетов или установленная на специальную подставку. Расстояние между центрами линз составляет обычно 60—70 мм. Стереобизображение увеличивают до 7 крат.

Линзовые стереоскопы удобны для работы в полевых условиях. Однако стереочки и лорнеты дают малую площадь стереобизображения и вызывают заметную утомляемость зрительных органов наблюдателя.

Зеркальные стереоскопы — портативные оптические приборы, удобные в полевых условиях, особенно при работе с фотосхемами и монтажами снимков. Зеркальный стереоскоп «Циклоп» состоит из

двух зеркал, расположенных на вертикальной стойке под углом  $15^\circ$  по отношению друг к другу. Нижний конец вертикальной стойки крепится к подставке, состоящей из двух площадок. Правая площадка — неподвижный столик, куда крепится снимок, а левая — подвижная плоскость, расположенная под углом  $30^\circ$  по отношению к неподвижному столику, — для левого снимка стереопары. Левый снимок рассматривается через систему зеркал, а правый — невооруженным глазом.

Зеркально-линзовые стереоскопы для дешифрирования КС состоят из двух пар параллельно расположенных зеркал, наклоненных под углом  $45^\circ$  к горизонтальной плоскости и укрепленных на общей планке, снабженной четырьмя раздвижными ножками.

В настоящее время промышленностью выпускается усовершенствованная модель зеркально-линзового стереоскопа «ЗЛС-1».

Стереоскоп зеркально-линзовый «ЗЛС-1» предназначен для стереоскопического рассматривания резаных и неразрезанных аэрофильмов, отпечатков с них размером до 53 см, составляющих стереопару, в стационарных и походных фотолабораториях.

Стереоскоп «ЗЛС-1» устанавливается над просмотрным столом прибора или над любым плоским столом шириной не менее 510 мм, оборудован автономным освещением для дешифрирования фотоотпечатков в отраженном свете и может работать с бинокулярной насадкой и без насадки. Без насадки достигается большой обзор, но с малым увеличением; насадка дает увеличение до  $5\times$ , но уменьшает поле зрения.

**Интерпретоскоп** — первоклассный стационарный оптический прибор для просмотра отдельных стереопар снимков в отраженном свете, а негативов — в проходящем: увеличивает изображение до 15 раз, позволяет видеть стереомодель одновременно двум наблюдателям (совещательный вариант).

**Геологический стереометр** — используется для определения элементов залегания, мощности формаций горных пород и других количественных измерений.

Для переноса контуров с КС на топографическую основу можно рекомендовать рисовальный прибор «Лютц», позволяющий одновременно видеть топографическую карту с наложенным на нее космическим изображением и радиал-пантограф РП-3. Основной частью прибора является призма, на которой крепится КС. Совмещение карты, расположенной на столике, и КС производится путем наклона призмы до совмещения идентичных точек.

### *Вопросы для самопроверки*

1. В чем преимущество равновероятностного квантования по сравнению с равномерным?
2. Каков будет результат плотностной сегментации изображения шахматной доски?
3. Как изменяется информативность изображения после его фильтрации?

# ГЕОЛОГИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ КОСМИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ

---

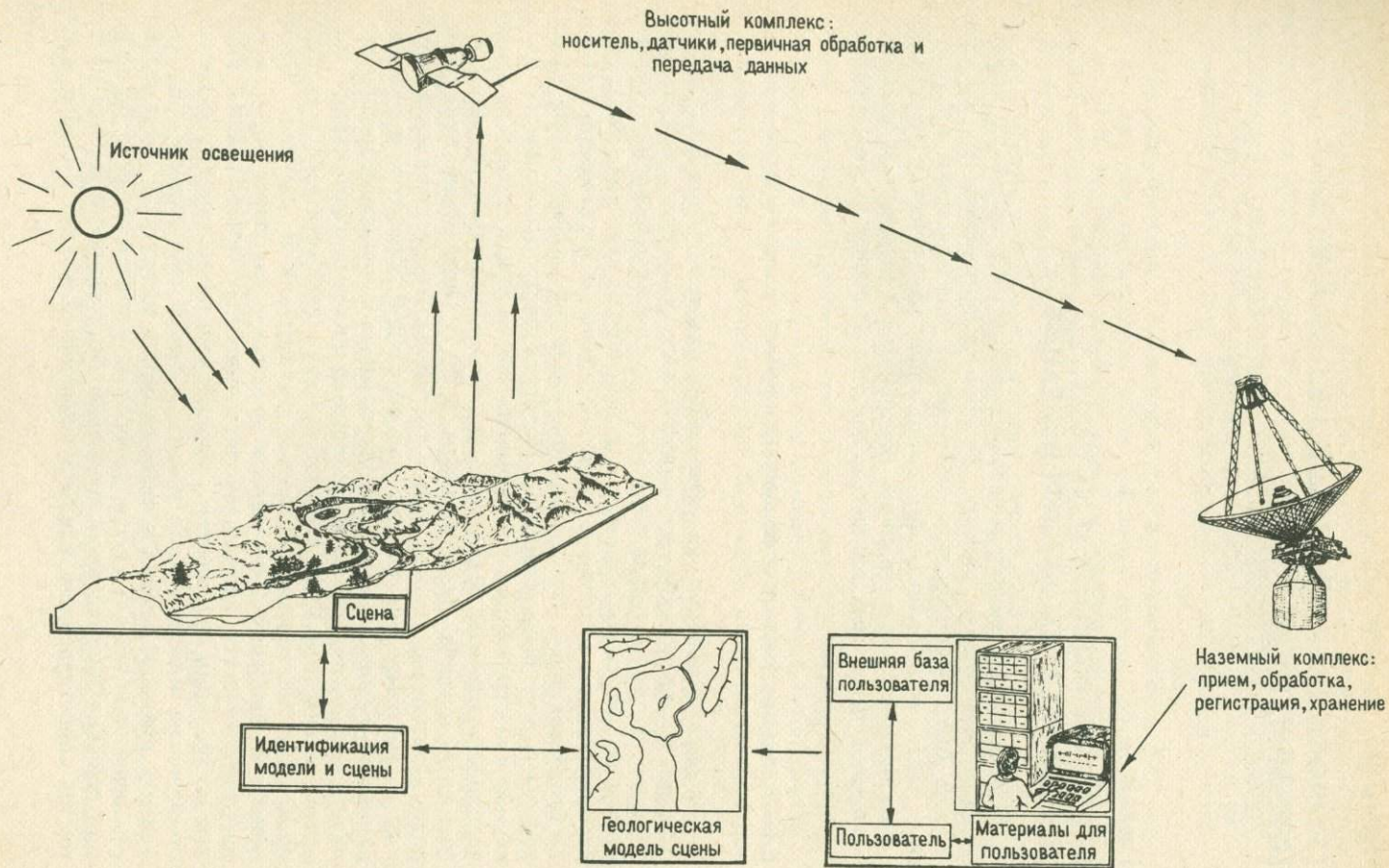
## Глава 6

### ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ И МЕТОДЫ ГЕОЛОГИЧЕСКОГО ДЕШИФРИРОВАНИЯ

Материалы ДЗ являются частью большой системы сбора, переработки и регистрации данных. Правильно организованная система должна быть ориентирована на решение определенных геологических задач, обуславливающих выбор орбит космических носителей, набор датчиков, характер сбора, переработки и передачи на наземные комплексы первичных данных и тип представляемых пользователю материалов.

#### 6.1. Принципиальная схема дистанционного геологического зондирования.

На рис. 11 изображена упрощенная схема системы ДЗ. Система состоит из нескольких взаимосвязанных элементов, или блоков. *Сцена* — это то, что находится перед датчиком; построение геологической модели сцены является в самом общем виде той целью, ради которой создается система. Изучение сцены на расстоянии возможно благодаря тому, что она обнаруживает себя в физических полях, которые могут быть измерены. Наиболее часто используются излученные или отраженные электромагнитные волны, в последнем случае необходим источник освещения, пассивный (например, Солнце) или активный (лазеры, радиолокаторы и др.). Физические поля измеряются датчиками, входящими в состав *высотного комплекса*, который кроме измерений служит для первичной обработки и передачи данных на Землю. Данные, закодированные в электромагнитном сигнале или записанные на твердотельные носители (фотопленки, магнитные ленты и пр.), доставляются в наземный комплекс, в котором происходит их прием, обработка, регистрация и хранение. После обработки данные обычно переписываются в кадровую форму и выдаются в качестве материалов дистанционного зондирования, которые по традиции называются космическими снимками. *Пользователь*, опираясь на внешнюю базу знаний, а также собственный опыт, интуицию, проводит анализ и интерпретацию материалов ДЗ и создает *геологическую модель сцены*, которая и является формой регистрации решения поставленной проблемы. Достоверность модели проверяется сопоставлением, или *идентификацией* модели и сцены; иден-



тификация замыкает систему и делает ее пригодной для прикладного использования.

Системы ДЗ разрабатываются в двух вариантах — ориентированные на изображение и ориентированные на число. Первый вариант рассчитан на визуальное дешифрирование материалов ДЗ, которые в связи с этим предоставляются пользователю в виде КС. Второй учитывает возможность автоматического (компьютерного) распознавания геологических и других образов.

Образные и числовые варианты дистанционного зондирования дополняют друг друга. Несмотря на то что технология автоматического распознавания образов появилась позже и связана с прогрессивным (и дорогим) техническим обеспечением, визуальный анализ и геологическая интерпретация КС сохраняют свое лидирующее положение. Чтобы понять причины этой ситуации, необходимо сопоставить принципы, лежащие в основе автоматического и визуального дешифрирования МДЗ.

## 6.2. Принципы автоматического геологического дешифрирования материалов дистанционного зондирования

Полезную информацию о сцене мы извлекаем благодаря тому, что физические поля, связанные с ней, определенным образом упорядочены. Для электромагнитного излучения (собственного или отраженного) эта упорядоченность относится к нескольким параметрам. Благодаря *пространственной упорядоченности* электромагнитного излучения, мы воспринимаем изображение структурированным, расчлененным на отдельные участки, которые сопоставимы с геологическими объектами, формирующими сцену. *Спектральная упорядоченность* проявляется в том, что сцена и ее отдельные участки в разных частях спектра могут иметь различную яркость, причем спектральные характеристики разнородных поверхностей, как правило, не совпадают. Следует учесть, что они закономерным образом меняются при перемещении точки измерения — измеряемые суммарная или спектральная яркости каждого участка зависят от пространственного положения датчика. Совокупность такого рода измерений называется *интегральной яркостью*. Основная идея автоматического дешифрирования заключается в следующем.

Дешифрирующая (распознающая) система производит серию измерений образа, подлежащего классификации, и сравнивает эти измерения с набором эталонных измерений в «словаре образов». Совпадение или близкое к совпадению измерений с элементом словаря дает желаемую классификацию.

Предположим, что необходимо различать (классифицировать) по данным ДЗ объекты двух типов (например, известняки и граниты или галечники и пески и т. д.). Различные объекты имеют различные спектральные характеристики. На рис. 12 показаны возможные спект-

Рис. 11. Схема дистанционного геологического зондирования. (См. пояснение в тексте)

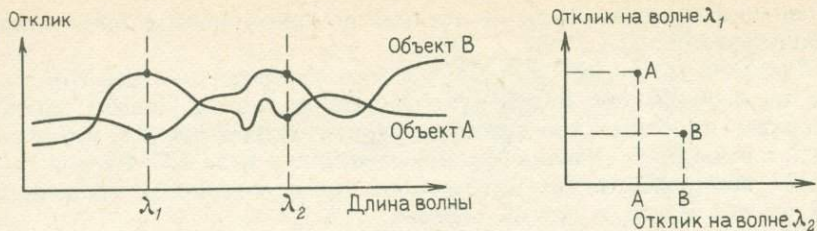


Рис. 12. Построение двухмерного пространства откликов по данным измерения спектральных характеристик объектов.

ральные кривые объектов А и В, подлежащих различению; подобные осредненные кривые получают экспериментальным путем при лабораторных или полевых исследованиях. Приведенные кривые заметно отличаются друг от друга в двух интервалах длин волн — в окрестностях  $\lambda_1$  и  $\lambda_2$ ; эти различия можно использовать при построении различающей (распознающей, классифицирующей) автоматической системы. Для этого измерительный комплекс должен замерять отклик (например, яркость) сцены на длинах волн  $\lambda_1$  и  $\lambda_2$ , а распознающая система — сопоставлять эти измерения, сводя их на координатную плоскость с координатами — отклик на волне  $\lambda_1$  — отклик на волне  $\lambda_2$ . Если сцену формируют объекты только двух указанных классов, то мы получим два различающихся гнезда (кластера) точек, группирующихся вокруг А и В, и обладающих определенным статистическим распределением. Классификацию какого-либо участка распознающая система производит отнесением его точки в пространстве откликов к тому или иному кластеру, что достигается достаточно простыми методами статистического анализа (например, оценивается расстояние до центра кластера).

Современная вычислительная техника позволяет использовать для распознавания не два, а много спектральных диапазонов и соответственно строить не двухмерное, а многомерное пространство откликов, что улучшает распознавание.

Таким образом, использование нескольких выборок, называемых обучающими, для определения границ решения в многомерном пространстве — основной метод, который стал базой количественного подхода к анализу данных ДЗ. При этом могут быть использованы не только спектральные, но и более сложные для анализа временные и пространственные измерения.

### 6.3. Принципиальная схема визуального дешифрирования

В работе геолога-интерпретатора можно усмотреть некоторую аналогию с работой автоматических распознающих систем. Исследователь анализирует (измеряет) изображение, выделяет совокупности точек, обладающих определенным внутренним единством, сравнивает выделенные образы с идеализированными образами (представлениями), хранящимися в его памяти, и на этой основе производит классификацию исходных образов. Даже при таком, несколько

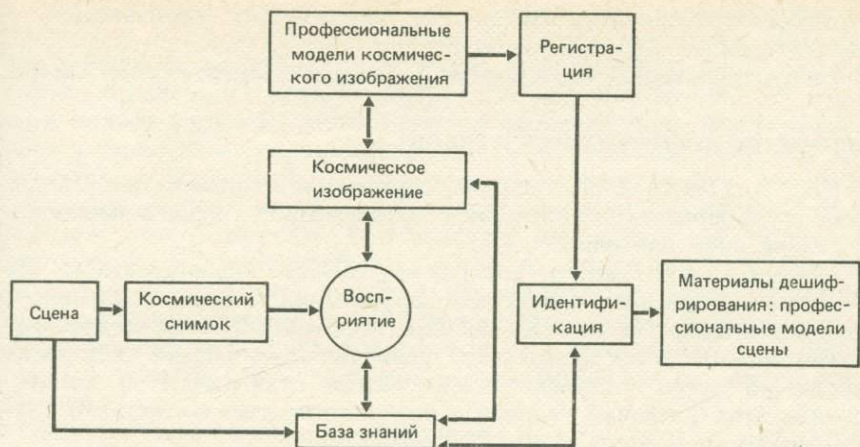


Рис. 13. Принципиальная схема визуального геологического дешифрирования.

формальном сравнении действий человека и компьютера в качестве элемента системы дистанционного геологического зондирования очевидны важные преимущества человека. Первое — его способность эффективно получать и сохранять множество сведений о результатах ДЗ и пользоваться справочными данными. Второе — врожденная способность делать выборку данных, используя опыт и знания для принятия решений, при высоком уровне интеллектуального поведения при управлении процессом анализа. Пока еще нельзя исключить человека из системы дистанционного зондирования даже для решения относительно простых геологических задач. Процессы восприятия и переработки зрительной информации изучены еще слабо, их нельзя рассматривать как «простое отражение», когда глаз исследователя представляется как подобие оптического объектива, а мозг — как экран, на который проецируется изображение.

Следует различать понятия «космический снимок» как форму представления данных дистанционных измерений и «космическое изображение» как результат видения исследователем космического снимка.

На рис. 13 показана принципиальная схема визуального геологического дешифрирования. На входе системы находится *космический снимок*, который является кадровой формой представления данных измерения *сцены*. Снимок воспринимается исследователем; *восприятие* предполагает непрерывное обращение к *базе знаний*. Результатом восприятия является *космическое изображение*, осмысление которого на основе базы знаний приводит к формированию специфических *моделей* сцены. Сформированная модель в большой степени влияет на восприятие сцены, корректируя изображение. Полученная модель регистрируется в той или иной форме (схемы, карты, описания и пр.), и далее проверяется соответствие модели и сцены как полевыми, так и иными методами; после идентификации и соот-

ветствующей корректировки модель оформляется окончательно в виде материалов дешифрирования.

Рассмотрим теперь особенности некоторых элементов этой схемы.

### ВОСПРИЯТИЕ КОСМИЧЕСКИХ СНИМКОВ

Под восприятием (в данном случае зрительным) понимается процесс переработки полученной информации, заканчивающийся формированием зрительного образа.

Важность зрительного восприятия нельзя недооценивать. На рис. 14 показаны результаты дешифрирования линейных элементов ландшафта одного и того же космического снимка четырьмя операторами. Несмотря на то что цель дешифрирования была поставлена достаточно четко, полученные результаты отличаются, и главная причина этих различий связана с неодинаковостью восприятия анализируемых снимков.

В настоящее время наиболее разработаны многоуровневые модели активного зрительного восприятия. На первом уровне, предшествующем вниманию, — уровне «первичного наброска» — падающий на рецепторы сетчаток поток света преобразуется в кодированное описание линий, пятен или контуров и их размещение, ориентацию и цвет. Сведение их в поверхности и объемы и, наконец, идентификация объектов происходят уже после такого первичного кодирования.

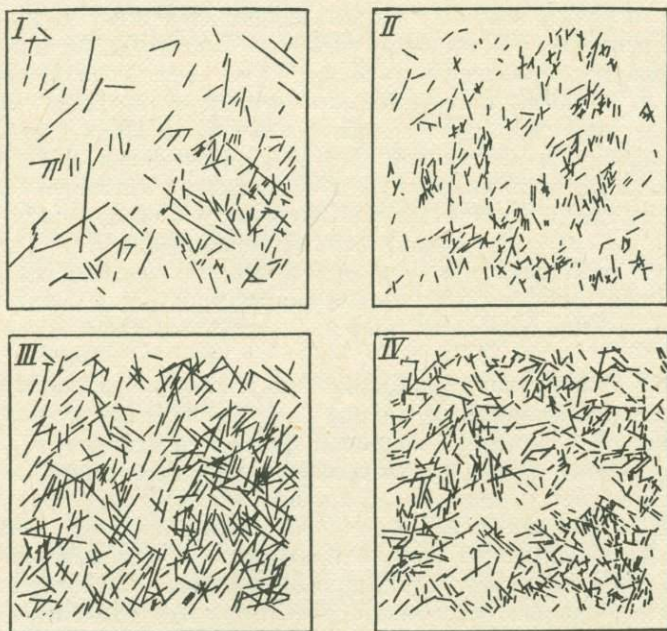


Рис. 14. Сравнение линеаментов, закартированных четырьмя операторами. По М. Х. Подвысоцкому и др.

Сведéние (репрезентация) информации об исходных простых признаках в законченную картину и предметная идентификация составляющих ее объектов требуют уже концентрации внимания (хотя и происходит бессознательно). Эта ступень восприятия связана с индивидуальными особенностями наблюдателей. Формирование образа находится под сильным давлением исходной гипотезы восприятия, т. е. гипотезы о том, что мы можем увидеть на сцене; исходные гипотезы у разных наблюдателей различны. Репрезентация объемов и поверхностей и тем более их предметная идентификация невозможны без обращения к внешней по отношению к восприятию базе знаний — к памяти, где хранятся накопленные как индивидуальным, так и общественным опытом элементы знания в виде образов, представлений, суждений, законов и пр., и к механизмам распознавания, соотносящим эти знания с информацией от нижнего уровня восприятия.

Изложенные сведения позволяют понять, почему результаты дешифрирования одного и того же материала разными исследователями (см. рис. 14) отличаются. Видимо, по мнению операторов I и III, линейные элементы ландшафта должны иметь довольно крупные размеры; оператор I считает их не особенно важными структурами, распределенными редко и более или менее случайно. Оператор III, напротив, придерживается мнения, что они должны образовывать густую упорядоченную сеть. Операторы II и IV понимают линейность в буквальном смысле и склонны выделять только действительно прямолинейные элементы, отчего они неизбежно будут иметь небольшие размеры. Однако оператор II считает, что такие элементы, скорее, исключение, нежели правило, а оператор IV придерживается противоположного мнения. Исходные теоретические установки формируют входную гипотезу восприятия, и операторы видят снимок так, как предполагают его увидеть. Отметим, что эти схемы дешифрирования нельзя считать оторванными от реальности. Нижний уровень восприятия всем операторам дает примерно одинаковую информацию, но ее переработка и оформление в образ зависят от личного опыта.

На рис. 15 представлена общая схема переработки зрительной информации, заимствованная (с некоторыми изменениями) из работы Э. Трейсман. Зрительная система начинает с того, что кодирует некоторые простые и полезные качества, складывая их в своего рода пачку карт. В «пачке» карты обычно сохраняют порядок пространственных отношений видимого мира; тем не менее некоторые сигналы о наличии того или иного признака могут и не нести информации о его местонахождении. На последующих ступенях включается внимание. Внимание, сосредоточенное на отдельных участках (локусах) сцены, отбирает все признаки, присутствующие в данном месте, на основе связей между отдельными картами признаков. Потом все это складывается во временную репрезентацию объекта, или *файл*. Наконец, согласно этой модели, объединенная информация о качествах и структурных отношениях сравнивается с описаниями в базе знаний, играющей роль «распознающей сети».

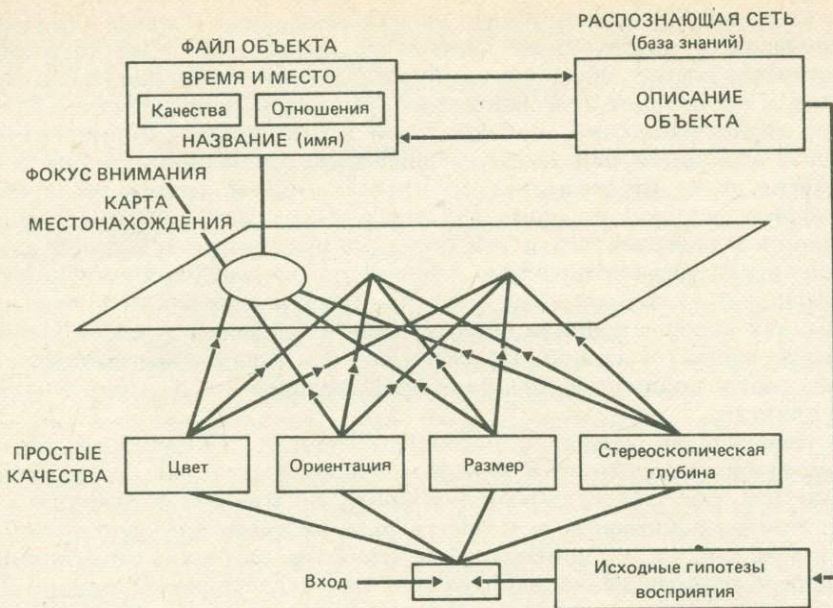


Рис. 15. Общая схема переработки зрительной информации. По Э. Трейман с изменениями.

## ПРОФЕССИОНАЛЬНЫЕ МОДЕЛИ КОСМИЧЕСКОГО ИЗОБРАЖЕНИЯ

Следующим за восприятием космического снимка этапом геологического дешифрирования является распознавание изображений с целью создания той или иной модели, определяемой задачей исследования.

Это распознавание космических изображений подобно обратным геофизическим задачам, в которых по данным измерения физических полей требуется восстановить параметры возмущающих тел. Распознавание происходит путем сравнения выделенных особенностей космического изображения со знакомыми образами известных геологических объектов. Это сравнение может быть логическим, рассудочным, но может происходить и бессознательно.

Представим себе, что мы разглядываем перспективную пейзажную фотографию неизвестной нам местности. Первое, что мы там увидим, — это хорошо знакомые предметы, организованные в осмысленные целостности: дома, люди, автомобили, деревья, реки и т. д.

При восприятии изображения с хорошо известными нам объектами осмысленное целое предшествует своим частям и качествам, т. е. восприятие в этом случае можно определить как процесс бессознательного умозаключения.

В аналогичном положении находится опытный геолог-интерпретатор, изучающий качественный космический снимок хорошо изве-

стного ему района — без промежуточных этапов он видит сразу геологическую модель местности и склонен рассматривать снимок как своего рода окно, через которое виден непосредственно ландшафт. Ситуация осложняется, когда по каким-либо причинам такого отчетливого геологического видения добиться не удастся. Это возникает при необычном облике или неудовлетворительном качестве снимка, при слабом знакомстве с геологическим строением изучаемого района, при небольшом опыте геолога-интерпретатора и пр. В этом случае могут возникнуть несколько разных вариантов.

Во-первых, при отсутствии геологического, исследователь может обладать четким ландшафтным видением, т. е. он непосредственно (бессознательно) хорошо выделяет даже мелкие геоморфологические детали, особенности распределения растительного покрова, водных поверхностей и пр. Такая ландшафтная модель сцены становится для интерпретатора опорной, и, используя ее и свои знания о связях ландшафта с геологическим строением, он приходит к определенной геологической модели. Сформированная геологическая модель обычно так сильно меняет восприятие, что на некоторых участках сцены видение становится геологическим.

Во-вторых, исследователь различает только крупные ландшафтные особенности. В этом случае, используя знания о характеристиках крупных ландшафтных элементов и данные наземных работ, исследователь может попытаться сконструировать детальную ландшафтную модель и уже через нее перейти к геологической; в случае неудачи он может ограничиться построением грубой геологической модели, отвечающей уровню его видения ландшафта, и на ее основе приблизиться к решению поставленных перед ним задач.

И, наконец, интерпретатор не обладает ни геологическим, ни ландшафтным видением и воспринимает КС как несвязную мозаику цветowych или тональных контуров. Однако и из такой картины можно извлечь полезную информацию. Одно из решений — некоторая геометризация мозаики и выделение на ней «правильных» фото-тональных или цветowych контуров и границ (например, прямолинейных или кругowych), предполагая, что им могут отвечать какие-либо реальные геологические объекты. В тех случаях, когда восприятие не достигает уровня объектного видения, механизмы зрения склонны аппроксимировать сигнальную информацию простейшими геометрическими совокупностями — прямой линией, окружностью и пр. Так когда-то были «открыты» марсианские каналы. Поэтому следует опасаться того, что геометризация мозаики преподнесет объекты, навязанные восприятием и не имеющие какого-либо соответствия в геологическом строении изучаемой территории. Другое решение более сложно, но более плодотворно; оно заключается в привлечении геологических, геоморфологических и других материалов, сравнении их с космическим изображением и хотя бы частичной реконструкции ландшафтно-геологических моделей. Все рассмотренные случаи различного видения космического изображения могут встретиться при анализе одного КС, и, таким образом, дешифрирование разных его частей сможет представлять самостоятельные за-

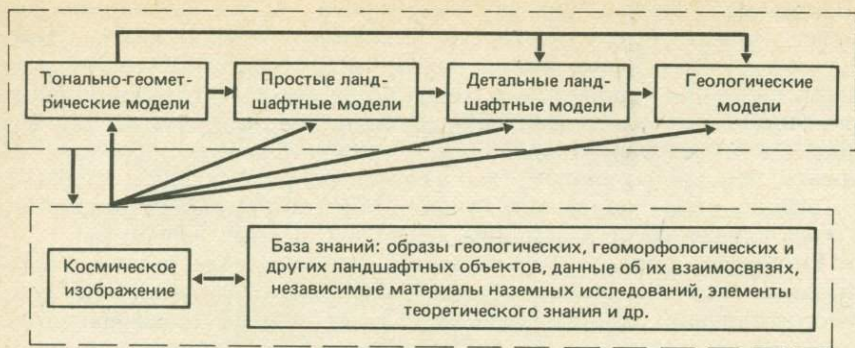


Рис. 16. Схема последовательного формирования моделей космического изображения.

дачи. Анализ космических изображений осуществляется на основе базы знаний, главными элементами которой являются образы геологических, геоморфологических, ландшафтных и др. объектов, а также сведения об их пространственных и временных отношениях и причинных связях. Результатом анализа являются различные модели изображения (рис. 16) — тонально-геометрические, ландшафтные, геологические. В зависимости от конкретных обстоятельств любая из этих моделей может формироваться без участия рассудочной деятельности. Логический анализ связан с необходимостью перехода от тонально-геометрических к ландшафтным и, далее, к геологическим моделям. Сформированные модели корректируют изображение (меняется видение КС), а новые данные, полученные при осмыслении модели, поступают в базу знаний.

#### РЕГИСТРАЦИЯ МОДЕЛЕЙ КОСМИЧЕСКОГО ИЗОБРАЖЕНИЯ

Данные анализа (наблюдения) КС становятся информацией только после того, как они зарегистрированы. Основными методами регистрации являются графический и описательный. Среди графических методов можно выделить составление карт и схем, очень полезно делать зарисовки (в том числе объемные) интересующих объектов (рис. 17), непосредственно по снимку составлять геологические и геоморфологические разрезы и т. д. Методы графической регистрации определяются в каждом конкретном случае. Далее с дешифровочной графикой обращаются так же, как и с другими графическими геологическими материалами.

Важно отметить, что очень многие задачи дистанционного геологического зондирования являются многоуровневыми. Например, для неотектонического районирования требуется предварительное составление геоморфологических карт, для металлогенических исследований — составление карт магматических образований и схем разрывной тектоники и пр. В этих случаях необходима регистрация как исходных, так и промежуточных и конечных моделей, так что визуальное дешифрирование сопровождается созданием целого ряда графических материалов.

Дешифровочная графика сопровождается описаниями, где формулируются цели исследования, обосновывается методика работ, характеризуются используемые исходные материалы ДЗ, описывается, по каким признакам отдешифрованы объекты и каким образом их выделение решает поставленную задачу.

#### 6.4. Системы дешифровочных признаков

При описании материалов дешифрования большое внимание уделяется *дешифровочным признакам*, т. е. тем особенностям фотоизображения, которые позволяют сопоставить его с теми или иными природными объектами.

Существует несколько классификаций дешифровочных признаков. Дешифровочные признаки делятся на прямые и косвенные. Прямые относятся непосредственно к выделяемому геологическому объекту, выражают в понятийной, словесной форме его образ. Например, *прямыми* дешифровочными признаками антиклинальной складки будут концентрический рисунок фотоизображения (соответствующий деформированным

слоям) и определенная ориентировка пластовых треугольников; прямым признаком сдвига является смещенный по прямой линии параллельно-полосчатый рисунок фотоизображения, соответствующий слоистости; поверхность выравнивания может выглядеть на фотоизображении как область однородного фототона и т. д.

Под *косвенными* дешифровочными признаками понимаются особенности изображения определенных элементов ландшафта, раскрывающие непосредственно не наблюдаемые геологические объекты.

Другими словами, косвенные признаки описывают переходы от тонально-геометрических и ландшафтных моделей к моделям геологическим. Например, косвенным признаком развивающегося локального поднятия может быть изометричный участок повышенного эрозионного расчленения: в космическом изображении такой участок проявлен как замкнутая область с упорядоченной линейной текстурой,

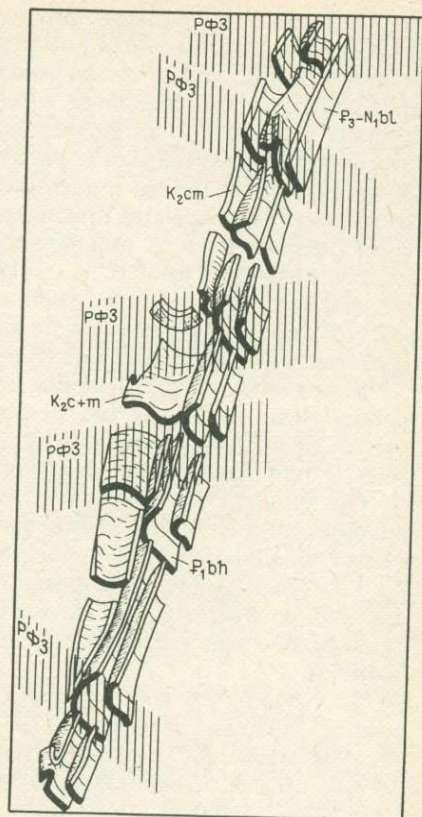


Рис. 17. Зарисовка одной из складчатых систем Средней Азии по данным дешифрования стереомодели космического изображения.

РФЗ — разрывно-флексурные зоны

окруженная однородной фототональной поверхностью; косвенный дешифровочный признак молодого разрыва — трассирующиеся по одной прямой линии эрозионные понижения (на КС это линейные фитоаномалии); косвенным признаком сдвига служат эшелоны ку- лисных складок и т. д. Очевидно, что отнесение дешифровочных признаков к прямым или косвенным зависит как от задачи дешифрирования, так и от типа сформированной модели космического изображения. Так, прямые признаки линейного уступа рельефа в рамках геоморфологического дешифрирования являются косвенными признаками разрыва в рамках дешифрирования структурно-геологического; тонально-геометрические (прямые) признаки кольцевой структуры могут быть косвенными признаками магматического массива и, далее, косвенными признаками разрушенного вулканического аппарата и т. д.

Условность подразделения дешифровочных признаков на прямые и косвенные побудила некоторых исследователей либо вообще отказаться от дробных классификаций, либо классифицировать дешифровочные признаки иным способом.

По мнению Э. Баррета и Л. Куртиса, независимо от характера изображений и передаваемой ими информации, для дешифрирования имеют значение девять признаков объектов.

1. *Форма.* Многочисленные компоненты окружающей среды можно достаточно уверенно распознать по их очертаниям или форме. Это справедливо как в отношении природных, так и антропогенных образований.

2. *Размер.* Во многих случаях важно учитывать длину, ширину, высоту, площадь или объем изображенных объектов. Часто о примерном масштабе многих объектов на снимке судят, сравнивая их со знакомыми элементами местности, например, такими, как дороги.

3. *Тон.* Разные объекты излучают или отражают электромагнитные волны разной длины и энергии. Эти различия могут выражаться на снимках изменениями в тоне, цвете или плотности изображения, что и служит ключом к их дешифрированию.

4. *Тень.* По теневому силуэту можно определять характер формы объектов. Изучение теней применяется при геоморфологических исследованиях. В то же время глубокие тени в районах со сложной орографией могут скрыть важные сведения, например, горные, сильно расчлененные районы выглядят сплошным черным пятном. Однако и этот признак можно рассматривать как полезный, принимая повышение плотности фототона как характеристику расчлененности рельефа.

5. *Облик.* На снимках часто обнаруживаются природные (и искусственные) комплексы сходного облика. Это обстоятельство во многом облегчает дешифрирование, особенно при анализе и картировании сложных образований, а не тех более элементарных составляющих, из которых они слагаются.

6. *Текстура.* Эта важная качественная характеристика фотоизображений тесно связана с тоном и позволяет выделить участки изображения с одинаковым рисунком изображения, обусловленным сочетанием микротоновых различий. К числу распространенных тек-

стур можно отнести гладкие, волнистые, пятнистые, линейные и текстуры с нерегулярным рисунком. Анализ текстур достаточно субъективен. Но текстура редко бывает единственным критерием распознавания и корреляции характеристик, используемых в процессе дешифрирования. Она часто привлекается как основа для подразделения образований, уже выявленных с помощью более четких критериев. Например, снимки различных пород могут иметь одинаковый тон, но разную текстуру.

7. *Местоположение.* На заключительном этапе дешифрирования интерпретацию и классификацию некоторых объектов удается уточнить по их местоположению относительно других, более понятных объектов. Например, складка неясной природы, расположенная между двумя антиклиналями, является, скорее всего, синклиналью; разрыв, соединяющий окончания кулисно расположенных надвигов, как правило, оказывается сдвигом и т. д.

8. *Разрешение на местности.* Разрешающая способность снимка зависит от особенностей аппаратуры дистанционных измерений, от состояния окружающей среды во время наблюдений, а также от последующей обработки полученной первичной информации. Разрешающая способность всегда лимитирует размер и, следовательно, во многих случаях характер объектов, которые могут быть опознаны. Некоторые объекты всегда оказываются слишком маленькими, чтобы получиться на снимке, другие имеют нерезкие или неясные очертания.

9. *Стереозффект.* Стереоскопическая модель космического изображения дает информацию, которую невозможно получить с отдельного снимка (и, как правило, по сканерным снимкам). Все серийные фотографические КС делаются со значительным горизонтальным и вертикальным перекрытием, что позволяет получать по ним стереомодели изображения.

Авторы рассматриваемой классификации приходят к выводу, что дешифрирование фотоснимков по сути своей дедуктивный процесс, при котором выделение одних ключевых объектов способствует опознанию других.

В классификации, предложенной Я. Г. Кацем и М. Л. Коппом, дешифровочные признаки делятся на две основные группы. Первая из них отражает те свойства объектов, которые могут быть переданы фотографией, а именно оптические и геометрические характеристики. Эти признаки, применяемые без учета остальных недостаточны для диагностики. Вместе с тем они дают необходимую основу для всех видов дешифрирования. Учитывая это, дешифровочные признаки данной группы удобно называть «общими» или «фотографическими».

Признаки второй группы — «специальные» — отражают конкретные геолого-ландшафтные особенности объектов и поэтому описываются соответствующими категориями геологических и географических дисциплин. В зависимости от метода анализа специальные признаки могут быть индуктивными и дедуктивными. Первые из них — это такие свойства объектов, которые вытекают из их определения и геологического содержания. Так, индуктивным признаком

осадочных и вулканогенно-осадочных пород является видимая на снимках слоистость; индуктивными признаками антиклинали — выпуклая форма изгибов и присутствие более древних отложений в ядре; разрыва — дешифрирующееся смещение геологических тел или форм рельефа. Учитывая, что все объекты группируются в классы, каждый из которых изучается своими методами, можно объединить индуктивные признаки в несколько основных групп: стратиграфические, структурно-геологические, геоморфологические и т. д.

Индуктивные признаки необходимы и достаточны для однозначной диагностики геологических объектов. Однако сфера их применения ограничена потому, что не все особенности геологических образований могут быть переданы фотографическим способом. В этих случаях приходится применять дедуктивные признаки, проявляющиеся в генетических и парагенетических взаимоотношениях объектов разного ранга и типа. Например, карбонатно-сульфатные толщи не обязательно должны сопровождаться карстовыми формами рельефа, но зато присутствие карста является обыкновенно надежным признаком для распознавания толщ данного состава.

К дедуктивным дешифровочным признакам следует относить те особенности, которые проявляются во взаимоотношениях геологических объектов друг с другом, в характере их расположения, приуроченности к определенным структурам и областям. Так, кинематический тип разрыва можно предположить на основании его ориентировки по отношению к общему простиранию складчатой системы и характеру связанных с ним других структурных форм; о существовании скрытых глубинных разломов говорят такие специфические признаки, как линейное расположение интрузий, вулканов; состав осадков иногда можно определить по типу тектонических деформаций (пластичные флишевые и глинистые толщи в равных условиях образуют более мелкие складки, чем карбонатные); конусы выноса, помимо характерной формы, являющейся их общим признаком, определяются по расположению в устьевой части долины.

Таким образом, главным фактором дешифрирования, обеспечивающим распознавание на космическом изображении тех или иных объектов, является соотнесение космического изображения и представлений об образе, т. е. знания о том, *как выглядит, изображается объект на космических снимках*; это знание хранится либо в памяти исследователя и опирается на предыдущий опыт, либо во внешних по отношению к исследованию банках образов (например, каталогах космических снимков тех или иных геологических образований). Представления об образах в памяти исследователя категоризированы, т. е. после восприятия снимка какого-либо объекта, например равнинной реки, в памяти содержатся представления не столько о конкретной реке, сколько о реках этого типа вообще. Именно это свойство памяти делает восприятие подвижным, иначе распознавание никогда ранее не виденных объектов было бы вообще невозможным. Восприятие снимков приводит к разным моделям изображения — тонально-геометрическим, ландшафтным и геологическим. В тех

случаях, когда восприятие не «дотягивает» до геологического видения, возникает необходимость использования внешних, не относящихся к конкретному снимку знаний о связях геологических объектов между собой и с различными элементами ландшафта, о внутреннем строении геологических и ландшафтных объектов, их временной эволюции, т. е. использования всего богатого теоретического аппарата геологии и смежных с ней областей знания. Эти знания, используемые при дешифрировании для перехода от более простых к более сложным моделям, называются косвенными, дедуктивными и прочими дешифровочными признаками. Дедуктивный анализ данных, направленный на создание сложных геологических моделей из более простых, не является привилегией дистанционного зондирования — это обычная геологическая процедура, применяемая к данным, полученным и любым другим методом.

### 6.5. Идентификация моделей космических изображений

Дешифровочная графика и описание представляют собой предварительные материалы анализа космических снимков. Далее, необходимо убедиться, что между отдешифрованными объектами и объектами, формирующими сцену, наблюдалось соответствие, и выяснить характер этого соответствия; этим целям служит этап идентификации. Несколько условно методы идентификации можно подразделить на прямые и косвенные. Самый хороший способ выявления соответствия объектов дешифрирования и объектов сцены — это полевая проверка материалов дешифрирования. Прямая идентификация такого рода осуществима и необходима при решении многих задач геологического зондирования: при определении мест локализации полезных ископаемых, обнаружении новых элементов геологической структуры, выявлении оползней и обвалов при инженерно-геологических исследованиях и многих других, т. е. при зондировании, ориентированном на обнаружение конкретных, не слишком крупных объектов. Однако дешифрирование очень часто направлено на объекты, полевая проверка которых затруднительна или просто невозможна. Например, для наземной проверки геологической карты открытого района, составленной по результатам дешифрирования, мы должны были бы фактически заново откартировать значительные по площади территории, а убедиться в том, что какая-то выявленная на КС тектоническая зона перспективней соседних на скопления нефти и газа, можно только, разбуриив их по достаточно густой сетке. Кроме того, дешифрирование иногда ориентировано на объекты, чье наземное выражение совершенно неясно, например, образ «региональных линеаментов» генерализуется на космических изображениях, как правило, из огромного количества деталей, каждая из которых в отдельности не говорит о существовании «регионального линеамента». В таких случаях приходится прибегать к косвенным методам идентификации — соотносению с данными независимых исследований, многократному дешифрированию разных материалов

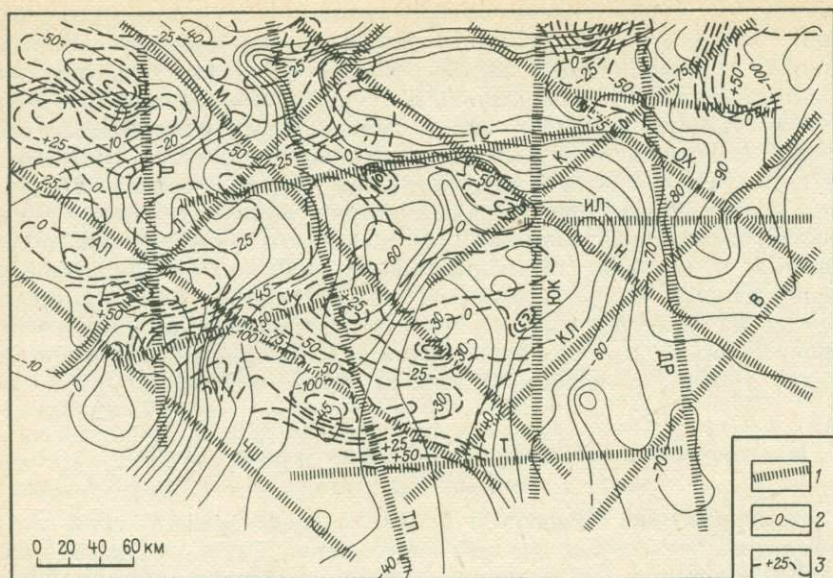


Рис. 18. Сравнение пространственного положения региональных линеаментов западно-Памиро-Алая и строения геофизических полей этого региона:

1 — региональные линеаменты; 2—3 — пересчитанные на высоту 50 км значения аномалий гравитационного (2) и магнитного (3) полей.

Региональные линеаменты: Гиссарский — ГС; Илякский — ИЛ; Северо-Кугитангский — СК; Термезский — Т; Дехканабадский — Д; Туполангский — ТП; Южно-Каратауский — ЮК; Дарвазский — ДР; Чаршангинский — ЧШ; Алакутанский — АЛ; Маляндский — М; Нурекский — Н; Обихингоуский — ОХ; Лянгарский — Л; Каратегинский — К; Кулябский — КЛ; Ванский — В

дистанционного зондирования и выявлению системной упорядоченности объектов дешифрирования.

**Соотнесение с данными независимых исследований.** Этот метод является «облегченным» вариантом прямой полевой идентификации и предусматривает как частичную полевую проверку, так и сравнение с материалами других исследований. Например, «региональные линеаменты» могут пространственно соответствовать линейным градиентам геофизических полей (рис. 18), крупные нефтегазоперспективные зоны обычно проявляют себя в тепловых полях, рудоконцентрирующие разломы практически всегда связаны с геохимическими аномалиями и т. д. Для выбора независимых данных с целью идентификации объектов дешифрирования требуются хорошие знания методов геологических исследований и нестандартное мышление. Отметим, что совпадение результатов дешифрирования и независимых данных еще не гарантирует реальности существования объекта, так же как несовпадение не говорит о «выдуманности» объекта дешифрирования. Все это выдвигает серьезные требования к выбору самой процедуры сопоставления объектов дешифрирования и объектов сцены.

**Многократное дешифрирование различных КС.** На космическое изображение влияют даже небольшие изменения изучаемой поверхности (сезонные, погодные, условия освещенности и пр.), а также

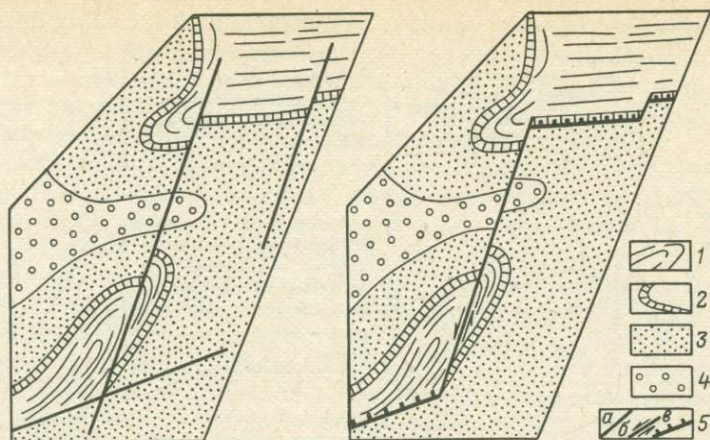


Рис. 19. Сравнение схем дешифрирования одного из участков Таджикской депрессии (пояснения в тексте):

1 — маркирующие горизонты в мезозойских отложениях; 2 — палеоген; 3 — миоцен; 4 — плиоцен; 5 — разрывные нарушения: а — без смещения, б — сдвиги, в — надвиги

технические условия измерения, передачи и регистрации данных. Поэтому причины (зачастую случайные), которые обуславливают формирование образа при анализе одного космического снимка, могут отсутствовать при анализе другого. Дешифрирование предусматривает привлечение как можно более разнообразных МДЗ. При этом некоторые структуры земной коры регистрируются на единичных снимках. Излишне критическое сравнение такого снимка с другими может привести к потере важной информации.

**Выявление системной упорядоченности объектов дешифрирования.** Этот метод заключается в проверке моделей космических изображений на логическую прочность. Объекты дешифрирования должны составлять связную совокупность (систему), имеющую геологический смысл. При этом те особенности геологического строения, которые выявляются в результате анализа МДЗ, должны входить в эту совокупность естественным образом, а не навязываться ей. Несовпадение этих условий вызывает недоверие к результатам дешифрирования. На рис. 19 показаны два варианта дешифрирования КС одного из районов Средней Азии. На левом рисунке все прямолинейные ландшафтные образования показаны как равнозначные разломы, хотя вдоль некоторых из них отсутствуют смещения стратиграфических границ и в целом кинематические особенности разрывов не увязаны между собой. Вариант дешифрирования, представленный на правом рисунке, является более правдоподобным — линияменты без заметного смещения сняты; обнаружены сдвиги неогеновых отложений вдоль меридионального нарушения и сдвиги, сопряженные с компенсирующими их надвигами.

Отметим, по отдельности каждый из способов косвенной идентификации не гарантирует полного соответствия объектов дешифри-

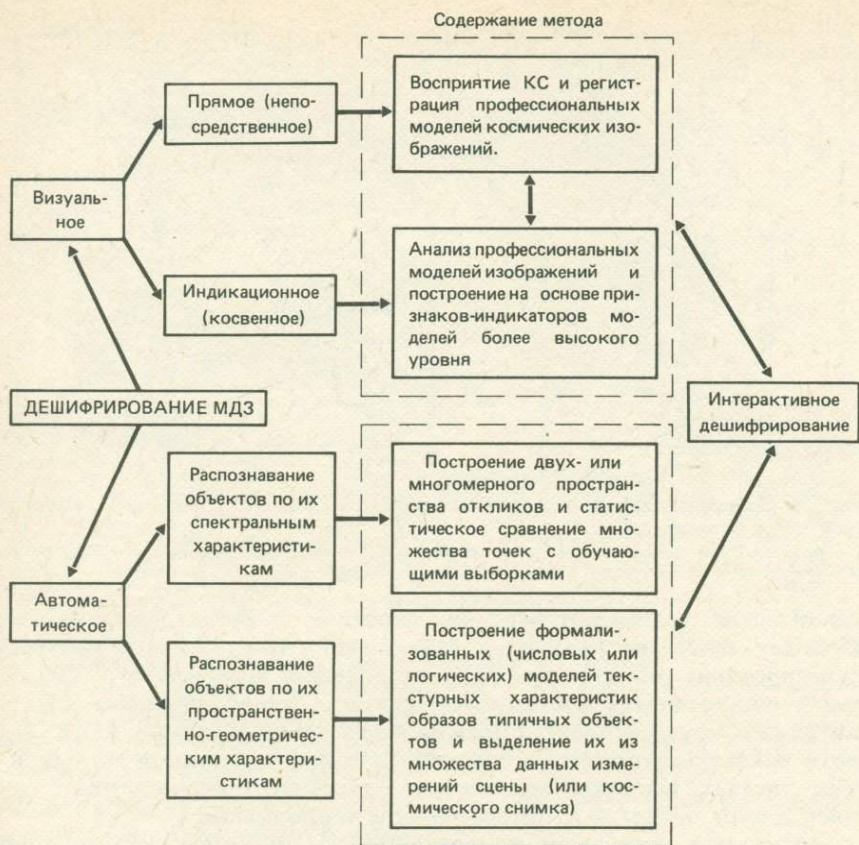


Рис. 20. Основные методы геологического дешифрирования.

рования и сцены (и не претендует на это), но, примененные комплексно, они могут существенно повысить достоверность результатов дешифрирования.

### 6.6. Виды и разновидности геологического дешифрирования космических снимков

Цели и задачи дистанционного геологического зондирования определяют методику дешифрирования КС. В настоящее время КС применяются для решения очень широкого круга задач, охватывающих почти все геологические науки; наиболее широко они применяются при структурно-геологических исследованиях и геологической съемке, в тектонике, структурной геоморфологии и неотектонике, при изучении современных геологических процессов, в рудной и нефтегазовой геологии, а также при изучении нерудных полезных ископаемых, в инженерной геологии, в гидрогеологии и в мерзлотоведении.

Разнообразие задач дистанционного геологического зондирования порождает очень большое количество конкретных методических приемов их решения. Однако в основе дешифрирования лежит небольшое число главных методов анализа. Это обстоятельство позволяет рассматривать геологическое дешифрирование МДЗ как единую междисциплинарную область геологических исследований.

На рис. 20 изображена схема основных методов геологического дешифрирования. Выделяют визуальное и автоматическое дешифрирование. Визуальное дешифрирование несколько условно подразделяется на прямое и косвенное (индикационное). Прямое, или непосредственное, дешифрирование заключается в регистрации спонтанно возникающих моделей космического изображения; индикационное, или косвенное, дешифрирование заключается в анализе изображений, выделении признаков (индикаторов) объектов или явлений, необходимых для решения поставленной задачи, но непосредственно не наблюдаемых, и построении «дедуктивной» модели изучаемого объекта (явления). Прямое и косвенное дешифрирование взаимосвязаны (см. раздел о прямых и косвенных дешифровочных признаках) и при анализе КС производятся совместно.

Также достаточно условно среди этих видов дешифрирования можно выделить разновидности, связанные с описанными группами моделей космического изображения. Так, прямое дешифрирование может быть тонально-геометрическим (эта разновидность была популярна при выделении неидентифицированных на сцене прямолинейных тональных особенностей — «фотолинеаментов»), ландшафтным и геологическим. Индикационное дешифрирование подразделяют на: 1) ландшафтно-геологическое, в котором индикаторами геологических явлений или процессов служат ландшафтные признаки; под названием «ландшафтно-индикационного дешифрирования» этот метод очень широко распространен при прогнозных и других специальных исследованиях; 2) тонально-ландшафтное и тонально-геологическое, в которых признаками (индикаторами) ландшафтных и геологических объектов служат тонально-геометрические характеристики космического изображения; из-за конвергентности тональных признаков этот метод является слабым, но иногда применяется при автоматическом дешифрировании; 3) геологическое, в котором признаками сложных геологических явлений и объектов служат их геологические характеристики; этот вид дешифрирования широко применяется при работе с материалами, полученными и другими (не дистанционными) методами исследований.

Рассмотренные разновидности индикационного дешифрирования наиболее часто употребляются при геологических исследованиях.

Среди методов автоматического дешифрирования в настоящее время наиболее часто употребляются два: распознавание объектов по их спектральным характеристикам и распознавание объектов по их текстурным (пространственно-геометрическим) особенностям. В первом случае основным методом является построение двух- или многомерного пространства данных измерений сцены (соответственно в двух или многих спектральных интервалах) и последующее ста-

тистическое сравнение множества точек с обучающими (типичными для изучаемых объектов) выборками. Во втором — логика метода та же самая, только вместо спектральных характеристик используются формализованные тем или иным способом модели текстурных характеристик образов типичных объектов. При этом могут анализироваться как данные непосредственных измерений сцены, так и данные измерения космических снимков.

В настоящее время автоматическое дешифрирование выполняется в интерактивном режиме, когда автоматические построения контролируются и направляются оператором. В перспективе такое направление работ будет, вероятно, основным.

## 6.7. Информативность космических снимков

Космические снимки, особенно полученные фотографическим способом, являются очень емким носителем информации. Приближенно можно считать, что на КС стандартного размера может быть записано 2—5 мегабайтов эффективной (т. е. используемой для визуального дешифрирования) информации.

Указанная информационная емкость характеризует только технические особенности КС как носителя информации и никак не зависит от того, что на нем изображено.

Поскольку космическое изображение — это результат взаимодействия сигнальной информации от космического снимка с воспринимающими системами человека, постольку геологическая информативность космического изображения не может быть одинаковой для всех наблюдателей. Как отмечалось, восприятие связано с профессиональной подготовленностью и поэтому космическое изображение и модель, у различных исследователей отличаются, так что имеет смысл говорить только об относительной информативности космических изображений.

В настоящее время многие исследователи считают, что проблема неоднозначности восприятия КС может быть решена заменой зрительных образов объектов их логическими моделями, связанными с классификацией образов на основе замеров некоторого множества признаков, описывающих объект и его фотоизображение. Эти признаки должны быть инвариантными или малочувствительными по отношению к типичным искажениям и обладать небольшой избыточностью. При таком подходе задача распознавания фотообразов не зависит (или мало зависит) от оператора и распадается на две части. В первой рассматривается вопрос о том, что нужно измерять и каково должно быть достаточное количество признаков. Во второй части проводится собственно классификация — на основании измерений выбранных признаков принимается решение о принадлежности образа к тому или иному классу.

Этот подход можно рассматривать в качестве некоторой логической основы для автоматического дешифрирования. Что же касается дешифрирования визуального, то никакой набор признаков-описаний не может полностью заменить зрительный образ объекта;

мышление на уровне образов является величайшим даром человека и главным его отличием от систем искусственного интеллекта.

Рассмотрим основные факторы, определяющие относительную информативность космических изображений.

**Генерализация.** В этот термин вкладывается в основном понятие масштабной генерализации — объединение мелких геологических (или ландшафтных) элементов в более крупные. Поскольку величина одного элемента космического изображения является более или менее постоянной, то при изменении масштаба съемки в нем отображаются разные по величине участки сцены; яркостные характеристики участков, отвечающие деталям ландшафтного строения, осредняются. Изображение сцены (соответственно ее ландшафтная или геологическая модели) при разных уровнях генерализации различно. Качественные изменения информативности происходят при изменении масштаба изображения в 3—5 раз. Это означает, что при такой лестнице масштабов основные объекты дешифрирования имеют качественно различный ранг, например слои, складки, антиклинории и синклинории, складчатые хребты и межгорные впадины, складчатые пояса и платформы. Это не исключает того, что в каждом из этих случаев объекты более низкого ранга могут наблюдаться в качестве деталей высокоранговых образований.

Приняты следующие масштабы космических изображений по уровням естественной генерализации:

глобальный — 1 : 15 000 000 и мельче (для сводных карт земного шара);

Таблица 5

Уровни генерализации КС, полученные различными съёмочными системами [6]

Космический носитель	Съёмочная система	Уровень генерализации				
		глобальный	континентальный	региональный	локальный	детальный
«Зонд»	Фотографическая					
«Нимбус»	Сканирующая					
«Метеор»	Инфракрасная					
«Метеор»	Телевизионная					
«Метеор»	Сканирующая					
	МСУ-М					
«Метеор»	Сканирующая					
	МСУ-С					
«Метеор»	Сканирующая					
	МСУ-СК					
«Метеор»	Сканирующая					
	МСУ-Э					
«Метеор»	Сканирующая					
	«Фрагмент»					
«Салют»	Фотографическая					
	КАТЭ-140,					
	МКФ-6М					
«Космос»	Фотографическая					
«Лэндсат-1, 2»	Сканирующая					
«Лэндсат-3»	»					
«Лэндсат-4, 5»	»					

континентальный — 1 : 5 000 000 — 1 : 2 500 000 (для сводных карт СССР и континентов);

региональный — 1:1 000 000—1:500 000 (для региональных мелко-масштабных карт);

локальный — 1:200 000—1:100 000 (для региональных средне-масштабных карт);

детальный — крупнее 1:100 000 (для региональных крупномасштабных и детальных карт).

Эта классификация относится, главным образом, к масштабу съемки. Увеличение снимков приводит к увеличению размеров пикселей; во многих случаях увеличенные снимки удобнее для работы, но информативность изображений при этом меняется слабо, кроме тех случаев, когда четкость исходных снимков так велика, что наименьшие разрешаемые детали изображения находятся за пределами восприятия человека. В табл. 5 показаны уровни генерализации КС, полученные различными съемочными системами.

**Обзорность.** Возможность одновременного изучения разных геологических (или ландшафтных) объектов в их взаимосвязи — одно из важных свойств космических изображений для региональных исследований. Количественной характеристикой этого свойства может быть обзорность изображения, или площадь земной поверхности, отображаемой на снимке (табл. 6).

Таблица 6  
Площадь обзора некоторых съемочных систем

Съемочная система	Уровень генерализации	Площадь обзора, км <sup>2</sup> · 10 <sup>3</sup>
«Нимбус»	Глобальный	10000
«Метеор» (телевизионная и МСУ-М)	»	2—2500
«Метеор» (МСУ-С)	Континентальный	6—1000
«Салют» (КАТЭ-140)	»	200
«Метеор» (МСУ-СК)	Региональный	40
«Метеор» («Фрагмент»)	»	7,2
«Космос»	»	32
«Салют» (МКФ-6М)	»	18
«Метеор» (МСУ-Э)	Локальный	0,4

Приведенные данные показывают, какого ранга геологические объекты могут одновременно находиться в поле зрения исследователя при изучении одного снимка. Это важно для того, чтобы определить оптимальный комплект КС для изучения конкретных геологических объектов в их взаимосвязи или для их детализации.

**Спектральные характеристики.** Различия в спектральных характеристиках различных элементов ландшафта приводят к тому, что в одних спектральных диапазонах они выглядят более контрастно, а в других — менее. Это обстоятельство определяет важность пра-

вильного выбора источников информации для решения конкретных задач дистанционного зондирования. Рекомендации по этому поводу носят несколько условный характер, поскольку невозможно учесть все многообразие задач геологического зондирования, а также довольно сильную изменчивость спектральных характеристик объектов в зависимости от сезонных, погодных и других условий. Поэтому следует привлекать к анализу как можно больше материалов дистанционного зондирования, чтобы иметь возможность выбора из них наиболее информативных для решения конкретной проблемы.

На основе анализа материалов советских исследователей для разных физико-географических районов, с учетом сезона съемки, можно дать следующую обобщенную схему геологической информативности спектральных каналов [6].

1. Геологические объекты континентального ранга — 0,7—0,8 и 0,8—1,1 мкм.

2. Геологические объекты регионального и локального рангов в гумидных областях — 0,5—0,6 мкм; синтезированные снимки зон — 0,5—0,6 и 0,6—0,7 мкм.

3. Геологические объекты регионального ранга в аридных областях — 0,7—0,8 и 0,8—1,1 мкм преимущественно в весенний и осенний сезоны для равнинных и 0,5—0,6 мкм преимущественно в летний сезон для горных районов; синтезированные снимки зон — 0,5—0,6; 0,7—0,8 и 0,8—1,1 мкм.

4. Геологические объекты локального и детального рангов — 0,5—0,6 мкм для резко контрастных объектов; 0,6—0,7 мкм для объектов с пониженной контрастностью; синтезированные снимки этих зон в сочетании с инфракрасными зонами в диапазонах от 1,2 до 2,4 мкм.

5. Геологические объекты всех рангов на мелководьях (менее 50 м) озер, морей и океанов — 0,45—0,5 мкм (камера МКФ-6) и 0,5—0,6 мкм.

Необходимо учитывать, что эта схема неуниверсальна и отдельные геологические объекты и явления могут быть лучше выражены на КС, полученных в других спектральных диапазонах.

Американские исследователи предлагают, как наиболее информативные для геологии, следующие спектральные каналы (мкм): 0,52—0,60; 0,76—0,90; 1,55—1,75; 2,15—2,35. Заметим, что три канала из четырех указанных принадлежат к ИК-диапазону, что во многом связано с характеристиками измерительной аппаратуры спутников «Лэндсат».

### *Вопросы для самопроверки*

1. Как будут выглядеть кластеры двух различающихся по спектральным характеристикам поверхностей в трехмерном пространстве откликов?

2. Попробуйте спроектировать систему дистанционного геологического зондирования (транспортные средства, орбиты, носители,

датчики, методика обработки и пр.), ориентированную на автоматическое выявление гранитных массивов.

3. Космический снимок одной и той же местности рассматривают школьник, геолог, проводивший на этой территории геологическую съемку, и геолог, работавший в соседнем районе. Для кого из них информативность снимка будет наибольшей?

4. Видимое на КС смещение пластов вдоль прямолинейной границы является «прямым» ДП разрывного нарушения. Для какого геологического явления этот признак является «косвенным»?

## Глава 7

### ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МАТЕРИАЛОВ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ В СТРУКТУРНО-ГЕОЛОГИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЯХ И ГЕОЛОГИЧЕСКОМ КАРТИРОВАНИИ

Геологические тела и их комплексы слишком велики, чтобы при наземном изучении находиться в едином поле зрения наблюдателя, и не могут изучаться сразу по всей площади распространения. Большая обзорность и выраженность геологических тел в фотоизображении делают реальным картирование геологических образований, основанное не на интуитивных соображениях, а на объективных данных дешифрирования. Отметим, что КС не заменяют ни более крупномасштабных аэроснимков, ни тем более наземных наблюдений и сколько-нибудь полно их возможности реализуются только при совместном анализе данных дешифрирования МДЗ и данных, полученных другими методами геологических исследований. Использование КС в структурно-геологических исследованиях, во-первых, позволяет улучшить существующие геологические карты (как за счет уточнения рисовки контуров геологических тел, так и за счет детализации структурных характеристик последних), а, во-вторых, расширяет набор картируемых геологических образований ввиду выявления малоамплитудных и «рассеянных» зон тектонических деформаций, нетрадиционных линейных и площадных геологических объектов различной конфигурации и пр.

#### 7.1. Геологическая информативность космических снимков

Информативность и соответственно методика структурно-геологического анализа КС неравнозначны в различных регионах. В целом они зависят от типа и возраста изучаемых тектонических элементов, стиля их внутренней структуры и особенностей рельефа. Полная сводка данных по этому вопросу содержится в работе «Использование материалов космических съемок при региональных геологических исследованиях».

Плиты древних и молодых платформ характеризуются широким развитием на поверхности слабодислоцированных осадочных пород.

Зачастую это новейшие образования, формирующие аккумулятивный рельеф, сглаживающие особенности геологического строения не только складчатых пород фундамента, но и отложений нижней части чехла. Наземные наблюдения в таких районах дают в основном сведения о литологии и генезисе четвертичных образований или, в лучшем случае, о выходящих на дневную поверхность породах чехла. В этих условиях данные, получаемые при анализе МДЗ, представляют большую ценность.

На КС континентального уровня генерализации (см. рис. 11) можно наблюдать наиболее крупные и глубинные элементы геологического строения платформ. Выделяющиеся в фотоизображении площадные объекты отвечают в основном неотектоническим блокам с разным режимом развития. Их соответствие блоковой структуре фундамента или внутренней структуре чехла определяется только степенью унаследованности глубинных неоднородностей. Линейные объекты обычно соответствуют разрывным нарушениям фундамента или осадочного чехла. Значительная часть линейных структур (до 60—70%) не находит соответствия в геологическом строении и не подтверждается геофизическими данными, возможно, из-за их малоамплитудности; часто, однако, они продолжают хорошо задокументированные погребенные разломы.

Крупные своды фундамента плит выражаются в виде фотональных кольцевых структур. Характерную разновидность крупных кольцевых структур представляют структуры метаморфического фундамента, «просвечивающие» из-под платформенного чехла. Некоторые из них не имеют соответствия в геологическом строении.

На региональных и локальных КС площадные объекты чаще всего соответствуют развитым на земной поверхности отложениям разного литологического состава. Однако прямое литологическое картирование пород платформенного чехла осуществимо лишь ограниченно; наиболее четко дешифрируются площади развития литолого-генетических типов рыхлых отложений.

Линейные объекты региональных и локальных КС отвечают, как правило, разломам и флексурам в породах осадочного чехла или фундамента, выраженным элементами геоморфологического строения. Сводовые структуры чехла выражаются кольцевыми объектами дешифрирования. Реальные очертания сводов и мульд имеют, как правило, более сложную форму, а часто и меньшие размеры, чем кольцевые объекты на снимках. Эти же объекты меньшего размера (первые километры — первые десятки километров) по своему положению в ряде случаев совпадают с локальными формами платформенного чехла: отдельными брахиантиклиналями или их группами, соляными куполами, мульдами и т. п.

На детальных снимках площадные объекты отвечают, как правило, площадям развития различных литолого-генетических типов поверхностных отложений. В пределах аккумулятивных равнин это четвертичные образования; в пределах денудационных участков — литологические разности пород различного возраста, выведенные на дневную поверхность.

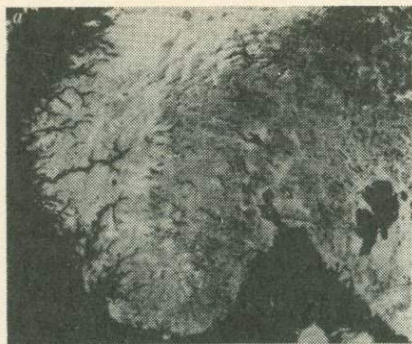


Рис. 21. КС Балтийского щита:

*a* — Юго-западная оконечность Скандинавии. Линейные и мозаичные участки светлого фототона в центральной части снимка соответствуют молодому выполнению грабена Осло; *б* — Балтийское побережье Финляндии. Хорошо заметная дугообразная линия в юго-восточной части снимка является границей морены одного из четвертичных ледников

зонам молодых тектонических нарушений и с внутренней структурой щитов не связаны); структуры с пологоизвилистым строением, приспособленные к границам площадных объектов (интерпретируются как древние мобильные пояса, разделяющие древнейшие «ядра» щитов), и линейные зоны частого чередования субпараллельных или кулисно расположенных полос различного фототона (интерпретируются как зоны мегакливажа, отвечающие областям рассеянной проницаемости земной коры).

Локальные и детальные КС древних щитов содержат сведения о внутренней структуре складчато-метаморфических толщ и магматических тел. 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 удается выделить троговые комплексы

Щиты древних платформ представляют собой выходы на поверхность раннедокембрийских интенсивно метаморфизованных комплексов со своеобразными структурами, свойственными древнейшим этапам развития Земли. Они характеризуются устойчивыми воздыманиями, но невысокой расчлененностью рельефа, свойственной платформенным территориям (рис. 21). Эти явления определяют особенности использования МДЗ на территории древних платформ.

На КС континентального уровня генерализации выделение структурно-вещественных комплексов древних щитов практически невозможно. Иногда выделяются крупные овалы, размером до нескольких сотен километров, отличающиеся более светлым фототонам и ограниченные дугообразными более темными полосами. Такие площадные структуры тесно связаны с крупнейшими кольцевыми системами древних щитов и разделяющими их зонами.

Линейные объекты дешифрирования на континентальных снимках распадаются на три группы: узкие линейные структуры, пересекающие щиты и уходящие за их пределы (соответствуют, видимо,

верхов протерозоя, сложенные зеленокаменными образованиями, тектонические клинья и грабены, выполненные фанерозойскими образованиями. Среди магматических пород лучше всего дешифрируются граниты рапакиви, щелочные интрузии центрального типа (Хибины) и ультраосновные породы.

Линейные структуры на локальных и детальных КС представлены в основном трещинами без смещения и относительно короткими (до 15—20 км) разрывными нарушениями с небольшой амплитудой. Они группируются в зоне сгущений, соответствующие линейным структурам региональных снимков. На детальных снимках удается дешифровать слоистость метаморфических горных цепей, даже если она замаскирована кристаллизационной сланцеватостью.

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

На КС континентального уровня генерализации хорошо выделяются отдельные складчатые системы, срединные массивы, наложенные впадины, а в некоторых случаях антиклинории, отдельные складчатые зоны и отдельные геологические тела, например гранитные массивы пермского возраста в Центральном Казахстане, магматические комплексы восточного склона Урала и др.

Линейные структуры, как правило, легко сопоставляются с крупными глубинными разломами, ограничивающими главные структурные элементы. Иногда в виде узких полосовых аномалий темного фототона выделяются офиолитовые швы. Характерную группу линейных объектов представляют диагональные и поперечные простиранию складчатых систем разрывные структуры; некоторые из них ранее квалифицировались как ремобилизованные на неотектоническом этапе зоны разрывных нарушений, главным образом сдвиговой кинематики, но большинство из них наземными геолого-геофизическими методами не устанавливались.

На КС регионального уровня генерализации можно расшифровать внутреннюю структуру отдельных блоков (рис. 22). Площадные объекты, выделяемые на таких снимках по фототону и фоторисунку, интерпретируются либо как крупные структурные формы, либо как структурно-вещественные комплексы — ядра антиклинориев, сложенные более древними образованиями, нежели их крылья, краевые складчатые зоны синклинориев, площади развития осадочных пород контрастного состава, вулканические образования, офиолиты и т. п. Характер фотоизображения зависит от степени дислоцированности пород и различен для изоклинальных, линейно- и коробчато-складчатых зон. На снимках регионального уровня генерализации может быть отдешифрована большая часть массивов

гранитоидов, причем по специфическим признакам они могут быть расчленены на несколько групп по составу и возрасту.

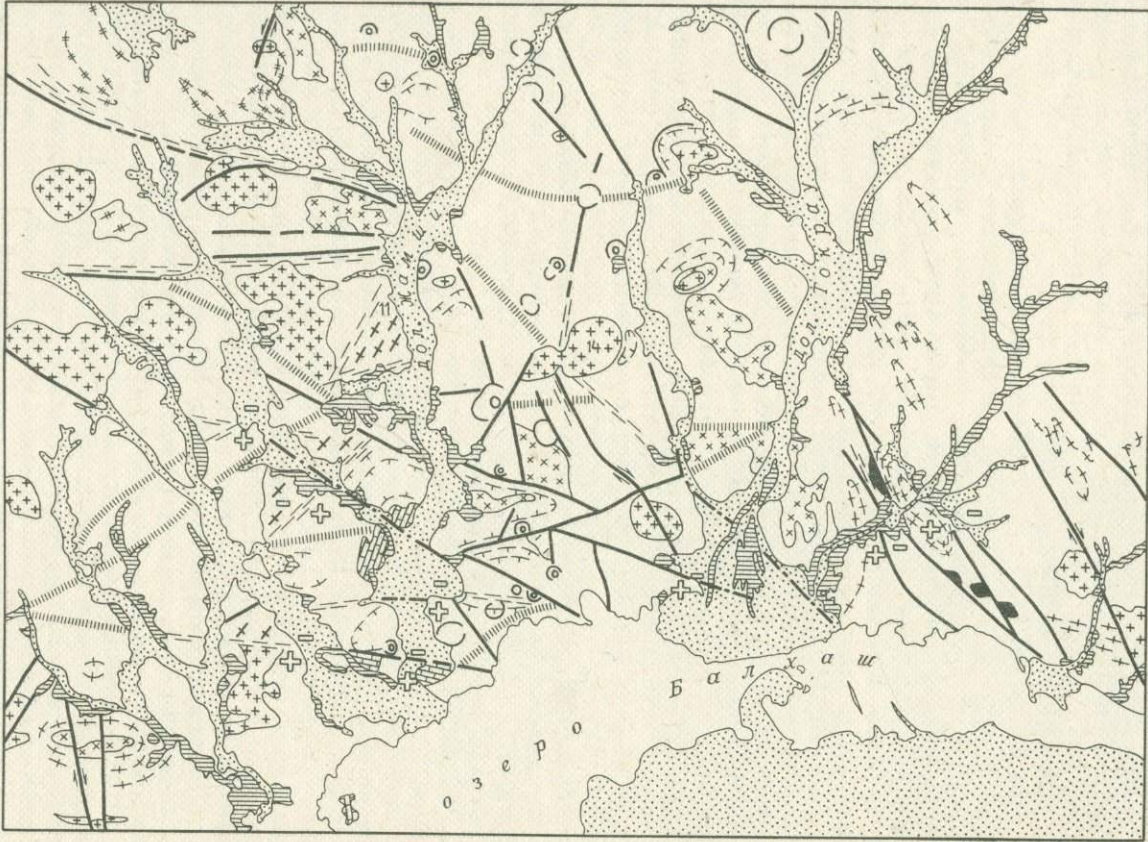
Линейные объекты дешифрирования региональных снимков можно подразделить на две группы. Первую, наиболее распространенную, образуют прямолинейные или слабоизогнутые в плане разломы и зоны разломов.

Достаточно надежно могут быть выделены разломы с вертикальными перемещениями и разломы со сдвиговой составляющей. Вторую группу составляют стратиграфические контакты; на региональных снимках впервые появляются и элементы слоистости.



Рис. 22. КС северного Прибалхашья (а) и схема его геологического дешифрирования (б — справа). По Ал. В. Тевелеву.

Дешифрируемые объекты: 1—10 — площадные (1 — четвертичные долины, 2 — такры и солончаки, 3 — массивы лейкогранитов, 4 — массивы умеренно кислых гранитоидов, 5 — массивы гипербазитов), 6—8 — складки (6 — пермские, вулканические мульды, 7 — саурского и сяжского складчатых комплексов, 8 — тельбесского складчатого комплекса), 9 — карбонаты венда — ордовика; 10 — выступы докембрийского основания); 11—14 — линейные формы (11 — разрывы, выраженные геоморфологически, 12 — то же, под чехлом рыхлых отложений, 13 — зоны с «пилотакситовым» фоторисунком, 14 — зоны неконтрастного «контакта» фототоннов), 15—16 — кольцевые структуры (15 — палеовулканы, 16 — неясного генезиса), 17 — сдвиги; 18 — блоки поднятые (а) и опущенные (б) по молодым разломам



- 1 [Dotted pattern]
- 2 [Wavy pattern]
- 3 [Cross-hatch pattern]
- 4 [X-hatch pattern]
- 5 [Solid black shape]
- 6 [Circle with arrow]
- 7 [Circle with arrow]
- 8 [Circle with arrow]
- 9 [Diagonal hatching]
- 10 [X-hatch pattern]
- 11 [Solid line]
- 12 [Dashed line]
- 13 [Dashed line]
- 14 [Vertical hatching]
- 15 [Circle with dot]
- 16 [Circle with arrow]
- 17 [Diagonal hatching]
- 18 [Cross-hatch pattern]

КС локального уровня генерализации содержат преимущественную информацию о вещественном составе горных пород. Особенно уверенно разделяются пачки пород, имеющие контрастный (в смысле оптических свойств) литологический состав; по соотношениям со слоистыми толщами достаточно четко выявляются поля распространения интрузивных пород. На снимках этого масштаба могут быть определены во многих случаях кинематические характеристики разрывных нарушений и морфология складчатых форм, а также палеовулканические структуры и, иногда, соотношения вулканических фаций и магматических фаз.

**Орогеническим областям** свойственно чередование горных хребтов и межгорных долин и депрессий. В зависимости от вертикальных амплитуд рельефа, климатических особенностей, распределения растительного покрова, активности современных движений, информативность КС горных областей может быть самой различной — от очень низкой в пределах перекрытых гляциогенными образованиями высокогорных плато Памира и Тибета и залесенных склонов Кавказа и Карпат до исключительно высокой в пределах молодых складчатых зон межгорных впадин. Хорошо отражаются активно развивающиеся неотектонические элементы; в этом случае раскрытые в рельефе тектонические структуры становятся наиболее благоприятным объектом для дистанционных методов исследований.

На КС континентального уровня генерализации обособляются основные орографические элементы: горные хребты и массивы, а также межгорные депрессии. Среди линейных объектов дешифрирования наиболее четко выделяются разрывные нарушения, ограничивающие горные массивы и межгорные впадины. Практически всегда на снимках орогенных областей вычитываются и более крупные, трансорогенные линейные структуры, связь которых с тектоническим строением оказывается чаще всего неясной.

КС регионального уровня генерализации по геологической информативности для многих регионов оказываются близки к континентальным снимкам. В то же время на снимках районов межгорных впадин юга СССР и их обрамления могут легко выявляться отдельные складчатые цепи и исследоваться локальные складчатые структуры, морфология и кинематика разрывных нарушений (рис. 23). Кольцевые структуры на региональных КС орогенных областей отражают либо плановую форму выходов интрузивных и вулканических массивов, либо, предположительно, связаны с дуговыми системами разломов и ундуляциями 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 геологическим карт. К таким территориям относятся области молодой складчатости в аридной и полуаридной климатических зонах. В качестве маркирующих

используются различающиеся на космических изображениях горизонты прочных пород, формирующих селективно-денудационные поверхности. В таких случаях удается достаточно детально расшифровать основные складчатые формы и системы разрывных нарушений (рис. 24). При этом некоторые особенности диагональных и поперечных структур позволяют различать сдвиговые перемещения с амплитудой в первые десятки метров (см. гл. 9).

В горно-таежных условиях дешифрирование структурно-вещественных комплексов затруднено, даже рельеф таких территорий воссоздается не всегда. Также неблагоприятны для дешифрирования участки с очень интенсивным вертикальным и горизонтальным расчленением, в которых детали геологических структур «тонут» в массе теней.

Континентальные вулканические пояса являются весьма своеобразными элементами земной коры. Они сложены почти исключительно вулканическими породами и широко распространенными комагматичными интрузиями гранитоидов. Своеобразно также внутреннее строение вулканических толщ, для которых характерны не собственно

складчатые структуры, а тектоновулканические — депрессии, грабены, экструзивные купола, кальдеры, обрушения и др. [6].

На КС континентального и регионального уровня генерализации вулканические пояса четко оконтуриваются по особенностям фотоизображения, если они не перекрыты единой поверхностью пене-плена вместе с одновозрастными тектоническими элементами. Наиболее уверенно проводятся границы вулканических поясов в случае совпадения их с разломами. Отдельные звенья вулканических поясов нередко характеризуются различными рисунками изображения (обычно дендритовидного). Часто, особенно в Центральном Казахстане, хорошо выделяются поднятия древнего основания вулканических поясов среди полей изверженных пород.

Линейные структуры на КС континентального и регионального уровней генерализации обычно отвечают глубинным разломам,

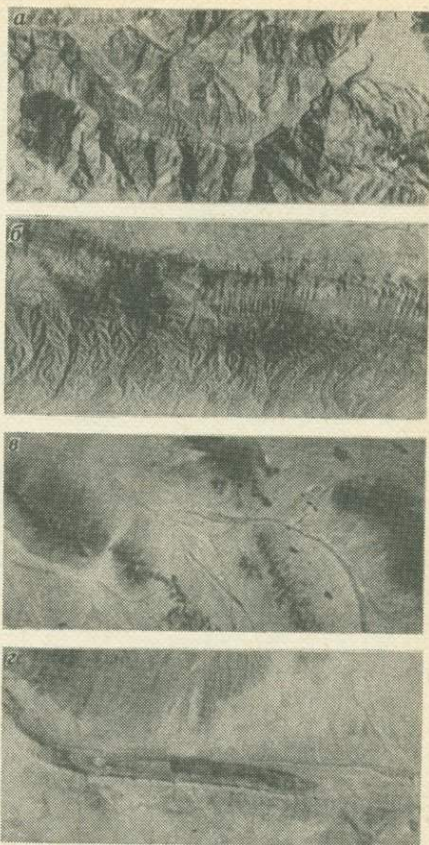


Рис. 23. Локальные складчатые структуры орогенических областей на КС:

а — Байсунтау (Западный Тянь-Шань);  
б — Бабатаг, в — Гловер (шт. Аризона, США),  
г — Акташ (Таджикская депрессия)



параллельным или поперечным простиранию вулканических поясов.

На снимках локального уровня генерализации в виде площадных объектов выделяются отдельные вулканотектонические депрессии, грабены и наложенные впадины. Они различаются по рисунку изображения и общему фототону. На этих же снимках нередко наблюдаются крупные субвулканические тела, сопровождаемые вторичным окварцеванием и другими вторичными явлениями. Они имеют белесый фототон и четко отделяются от более темных полей, отвечающих покровам лав и туфов. Иногда в виде площадных объектов дешифрируются отдельные поля молодых платобазальтов и депрессии, выполненные игнимбритами. Также выделяются участки, сложенные вулканогенно-осадочными комплексами, для которых характерен тонкополосчатый рисунок.

Космические снимки детального уровня генерализации позволяют дешифрировать крупные лавовые потоки, пласты туфов, пачки вулканогенно-осадочных образований, субвулканические и экструзивные тела разной формы, отдельные вулканические аппараты — кальдеры обрушения, некки, шлаковые конусы, корни трещинных излияний.

Таким образом, для структурно-геологических исследований (в традиционном понимании содержания этих работ) пригодны КС масштаба 1 : 2 500 000 и крупнее. Снимки меньшего масштаба дают информацию только при особо благоприятных условиях. Степень выраженности слоистых комплексов на КС зависит не столько от контрастности пород, слагающих эти комплексы (в том числе и от их оптической контрастности), сколько от характера их залегания, переслаивания и различий в степени устойчивости к процессам денудации (рис. 25). Наиболее четкие геологические модели космических изображений формируются при анализе мощных слоистых толщ ритмического строения, образующих простые моноклиальные или складчатые структуры. Толщи такого строения наиболее характерны для мезозойско-палеогеновых разрезов окраинных частей горно-складчатых сооружений, но встречаются среди и более молодых, и более древних отложений. Сложное строение структур слоистых образований приводит к гомогенизации их изображения даже при хорошей выраженности структурных комплексов в рельефе.

Космические изображения складчатых палеозойских и тем более допалеозойских стратифицированных комплексов более трудны для структурно-геологического анализа. Даже слабый метаморфизм этих пород приводит к выравниванию их прочностных (по отношению к денудации) свойств, они перестают «держат» рельеф и соответственно хуже читаются на высотных изображениях. В некоторых случаях слоистые породы настолько контрастны по оптическим свой-

Рис. 24. Схема геологического дешифрирования КС Байсунской впадины (Средняя Азия):

1—3 — контакты: 1 — стратиграфические, 2 — тектонические, 3 — без разделения; 4 — границы участков различной дешифрируемости; 5 — распаханые участки; 6 — локальные линеаменты; 7 — маркирующие горизонты

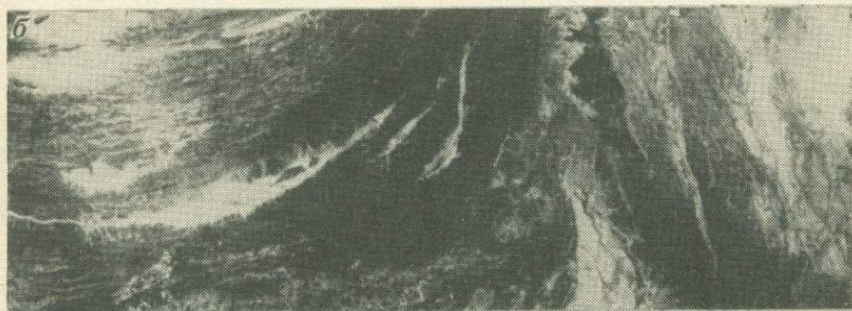


Рис. 25. Складчатые пояса на КС:  
а — Загрос, б — Южный Макран, в — Аппалачи, г — Кельпинтаг

ствам, что различаются просто по фототону. Кроме того, при средне-крутых моноклинальных залеганиях слоев даже небольшие различия в устойчивости пород способствуют формированию грядового куэстового рельефа, отражающего геологическую структуру этих толщ.

Интересно, что в условиях выровненного рельефа (типа Казахстанского мелкосопочника) условия для дешифрирования палеозойских слоистых толщ во многих случаях улучшаются по сравнению с горными регионами. В условиях развитого пенеплена маломощные элювиальные чехлы на породах разного литологического состава очень часто оказываются по оптическим свойствам более контрастными, чем их материнские породы.

Глубокометаморфизованные породы с трудом поддаются структурно-геологическому анализу по данным ДЗ. Для них не характерен литоморфный рельеф, структура их сложна, а оптические характеристики близки. На снимках среднего масштаба изображение глубокометаморфизованных пород в большинстве случаев гомогенно. Однако на снимках крупного масштаба удается восстановить пространственное положение достаточно крупных структурно-формационных комплексов, особенно если их распределение контролируется разрывными нарушениями.

Особую группу объектов для структурно-геологического анализа по данным ДЗ составляют молодые слабометаморфизованные осадочные комплексы. Внутренняя структура терригенных моласс неоген-четвертичного возраста, выполняющих межгорные впадины, на космических снимках выявляется плохо из-за незначительных оптических контрастов большинства молассовых толщ (особенно на черно-белых снимках) и слабо различающейся устойчивости по отношению к процессам денудации. Рельеф дислоцированных моласс определяется случайными латеральными неоднородностями их литологического состава и современной трещинной сетью.

Дешифрируемость молассовых образований значительно улучшается, если в их разрезах встречаются оптически контрастные толщи (типа белых гипсовых горизонтов в красноцветной молассе Таджикской депрессии) или толщи не молассового типа (например, прочные морские сарматские известняки и песчаники в серой молассе Куринской впадины). В первом случае структура моласс выявляется по фототональным признакам, во втором — по структурно-геоморфологическим. И, наконец, еще одно благоприятное для дешифрирования сочетание пород — переслаивание в разрезах моласс пачек конгломератов и менее грубообломочных терригенных пород; конгломераты практически всегда образуют бронирующие поверхности. При этом структурно-определенные формы рельефа могут быть подчиненными, но все же выявляться на космических изображениях достаточно крупного масштаба.

Строение молодых отложений в условиях хорошей обнаженности выявляется на космических изображениях очень отчетливо. Как правило, четвертичные покровные образования слагают вполне определенные формы рельефа, опознаваемые на МДЗ по индивидуаль-

ным рисункам изображения, т. е. при анализе КС территорий, покрытых четвертичными породами, легко формируются и геоморфологические, и соответствующие им геологические модели изображений. Факторами, затрудняющими дешифрирование, являются главным образом залесенность территорий и их сельскохозяйственная освоенность.

Выявление и анализ неслоистых геологических тел на космических изображениях также зависят от региональных тектонических и геоморфологических особенностей. Условия интенсивно расчлененного высокогорья неблагоприятны для обнаружения даже крупных интрузивных массивов. Особенно резко это проявляется в наиболее молодых горных сооружениях, где новейшая тектоника нацело перерабатывает более древние структуры. Так, в пределах Южного Тянь-Шаня только по косвенным признакам определяются границы Гиссарского гранитоидного массива.

Массивы изверженных пород лучше прослеживаются на космических снимках щитов древних и молодых платформ. Степень их выраженности на изображениях во многом зависит от возраста, формы и соотношений с тектонической структурой. Конкордантные линейно вытянутые массивы обнаруживаются, как правило, хуже дискордантных изометричных. Так, на снимках Кольского полуострова (Балтийский щит) слабо распознаются конкордантные ультраосновные массивы Печенгской рифтовой зоны, а изометричные массивы Имандра-Варзугского района выявляются практически на любых снимках, причем это в равной степени касается и палеозойских интрузивов типа Хибинского и Ловозерского и нижнепротерозойского Мончетундровского плутона.

На щитах молодых платформ выраженность интрузивных массивов в ландшафте (и соответственно на КС) также существенно зависит от их формы, состава и возраста. Так, в южной части Центрального Казахстана на космических изображениях хорошо видны самые молодые (пермские) гранитоидные массивы. Такие крупные изометричные интрузивы, как Бектау-Ата, распознаются даже на континентальных снимках. В то же время девонские массивы изометричной формы распознаются значительно хуже. Это связано, по-видимому, с тем, что кислые молодые интрузивы в условиях слабой новейшей активизации «всплывают» по отношению к раме и создают заметные положительные формы рельефа с характерными (обычно центробежными) рисунками фотоизображения. «Всплывание» и денудация девонских (и более древних) массивов закончились в предыдущие тектонические эпохи и сейчас они представлены маломощными, практически плоскими телами и явной выраженности в рельефе не имеют. Еще хуже распознаются согласные со структурой небольшие тела гипербазитов; на космических изображениях в рассматриваемом районе они обнаруживают себя более светлым фототонном, связанным с развитием над этими телами мощных монтмориллонитовых кор выветривания. Контуры интрузивных тел, дешифрированные на космических изображениях, часто превышают реальные контуры тел на дневной поверхности, так как маломощ-

ные, сильно измененные провесы кровли массивов имеют на КС тот же облик, что и сами массивы.

Сходный с изометричными гранитоидными массивами рисунок изображения имеют соляные «купола» в областях новейшей активизации. Это также «всплывающие» структуры, формирующие положительные формы рельефа. В тектонически спокойных областях с выходами солей чаще связаны отрицательные геоморфологические изометричные элементы, иногда имеющие вид «разбитой тарелки» из-за развития систем присводовых разрывных нарушений.

Развитие методов ДЗ существенно изменило содержание терминов «разрывное нарушение» и «разлом». В практике космогеологических работ разрывные нарушения и разломы являются элементами более широкого понятия «линейные объекты дешифрирования» (или «линементы»). Последние, кроме разрывов со смещением и разломов глубинного типа, объединяют линейные деформационные структуры, включающие трещины, зоны трещиноватости и проницаемости, ландшафтно-выраженные погребенные линейные разделы различного типа и др. Значительную часть линейных объектов можно обнаружить только на обзорных дистанционных изображениях, где они генерализуются из множества малозначащих деталей геологического и геоморфологического строения. Подробно вопросы структурно-геологического анализа линементов рассматриваются в гл. 9. Здесь же коротко остановимся на дешифрировании на космических изображениях разрывов со смещением.

Выявление смещений геологических границ по разрыву зависит от кинематики разрывов и их ориентировки по отношению к генеральной тектонической зональности. Наименьшие смещения могут быть обнаружены по разрывам сдвиговой кинематики, поперечным или диагональным по отношению к складкам или моноклиналям. На снимках детального и локального уровня обнаруживаются сдвиги амплитудой в первые десятки метров. Достаточно четко обнаруживаются сдвиги в гранитных (см. рис. 22) и других изверженных породах.

Смещения по поперечным сбросам следятся с меньшей уверенностью. Продольные сбросы обычно выражены лишь геоморфологически; оценить амплитуды смещения по ним можно только предположительно. Это относится также и к крутым взбросам. Надвиги на КС определяются с большим трудом; оценить их амплитуды можно лишь в редких случаях.

В заключение отметим, что на участках с идеальной фотогеничностью геологических образований по данным дешифрирования КС удается составлять геологические карты, по детальности превосходящие одномасштабные карты, составленные по данным наземной геологической съемки. Однако такие участки встречаются не слишком часто. Космическая информация в структурно-геологических исследованиях наряду с уточнением геологического строения отдельных фрагментов изучаемой территории применяется для упорядочения данных (это связано с обзорностью КС), детализации структурных характеристик отдельных элементов геологического строения

и картирования структур, плохо или совсем необнаруживаемых при наземных исследованиях.

## 7.2. Особенности применения материалов дистанционного зондирования при геологической съемке и картировании

В СССР региональные геологические исследования проводятся в масштабах 1:1 000 000—1:500 000, 1:200 000—1:100 000. По способу ведения работ и виду получаемой картографической продукции выделяются: космофотогеологическое картирование, аэрофотогеологическое картирование, групповая и полистная геологическая съемка, геологическое доизучение ранее заснятых площадей, глубинное геологическое картирование, геолого-минералогическое картирование и геологическое изучение площадей заложения сверхглубоких и глубоких скважин [6].

По роли дистанционных методов в общем комплексе геологических исследований перечисленные виды работ можно разделить на три группы. К первой группе относятся космо- и аэрофотогеологическое картирование, т. е. те виды работ, при которых большая часть геологической информации, отображаемой на картах, доставляется дистанционными методами. Ко второй группе относят все остальные виды работ, кроме глубинного геологического картирования. При этих видах работ данные дешифрирования используются в комплексе с данными других методов геологических исследований. К третьей группе относят глубинное геологическое картирование, при котором дистанционное зондирование выступает в качестве дополнительного метода получения геологической информации.

Космофотогеологическое картирование позволяет в сжатые сроки и с небольшими затратами труда оценить особенности геологического строения обширных территорий. Космофотогеологическая карта является самостоятельным геологическим документом и может быть использована для выявления закономерностей строения земной коры и размещения полезных ископаемых; для обновления и уточнения карт геологического содержания; для историко-геологических, регионально-тектонических, геодинамических и других построений; для решения задач прикладного характера; в качестве основы для планирования геологоразведочных работ.

МДЗ применяются не только для составления специализированных карт, но и при составлении традиционных карт геологического содержания, для чего разработаны специалистами Министерства геологии СССР соответствующие методические рекомендации.

**Космофотогеологические карты** составляются в масштабе 1:1 000 000 (преимущественно для районов с плитным комплексом платформ) и 1:500 000 (преимущественно для горно-складчатых районов и щитов платформ); возможно составление карт и более крупных масштабов. Объектом космофотогеологического картирования является площадь, охватывающая единый геоструктурный элемент или его крупную часть размером от 150 до 500 тыс. км<sup>2</sup>, в зависимости от типа района.

В качестве основных материалов используются снимки, полученные со спутников типа «Космос», и космофотокарты, составленные по этим снимкам в масштабе проводимого картирования. Для обзорного дешифрирования рекомендуются сканерные изображения МСУ-М, МСУ-С и фотоснимки, полученные камерой КАТЭ-140.

В предварительный камеральный период составляется макет карты и разрабатывается план наземной проверки материалов дешифрирования.

Полевому изучению подлежат объекты с неясным геологическим и минерагеническим значением, а также эталонные объекты дешифрирования. Кроме того, проверяются участки резкого несоответствия данных дешифрирования с ранее известными геолого-геофизическими данными. На космогеологических картах показываются линейные и кольцевые образования, как известного геологического содержания (разломы и тела, выходящие на поверхность и погребенные), так и с неясной геологической интерпретацией.

Среднемасштабное (1:200 000) **аэрофотогеологическое картирование** проводится на территориях с простым геологическим строением, перекрытых чехлом молодых рыхлых образований. Использование КС при этом виде работ может быть в том же объеме, что и при космофотогеологическом картировании.

**Аэрофотогеологическое картирование** масштаба 1:50 000 — это специализированный вид работ. С помощью КС локального и детального уровней генерализации уточняют общие закономерности геологического строения района, устанавливают взаимосвязи относительно крупных геологических элементов и определяют положение исследуемой территории в пределах геоструктурных форм более высоких таксономических рангов.

**Групповая и полистная геологическая съемка и геологическое доизучение** ранее заснятых площадей — основные виды региональных геологических исследований в СССР. В настоящее время целевое дешифрирование КС при геологической съемке является обязательным.

Анализ КС позволяет установить положение изучаемой территории в общей структуре региона, выделить и проследить крупные зоны и структуры как внутри изучаемого района, так и за его пределами, откартировать основные структурно-вещественные комплексы — структурные этажи и подэтажи. При геологическом доизучении площадей МДЗ дают достаточно полную и связную картину взаимоотношений локальных геологических объектов и более надежный прогноз перспективных территорий на полезные ископаемые.

**Геолого-минерагеническое картирование** заключается в изучении и картировании различных минерагенических (рудоконтролирующих) факторов и поисковых признаков для установления закономерностей размещения полезных ископаемых и выделения перспективных объектов. При этом МДЗ используют как источник принципиально новой геологической и поисковой информации (в комплексе с другими материалами).

Объектами прогноза при геолого-минерагенической съемке мас-

штаба 1:500 000 являются новые рудные узлы и зоны, крупные рудные поля, а при масштабе 1:200 000 — рудные поля и как исключение, месторождения или участки, соразмерные с ними. Предварительно на МДЗ выявляются рудоконтролирующие объекты или относимые к ним. Наиболее успешно МДЗ применяются при установлении структурно-геологических элементов и объектов, которые определяют размещение прогнозируемого вида полезных ископаемых, а также при выявлении связей оруденения с тонально-геометрическими особенностями космических изображений даже в тех случаях, когда геологическая природа их неясна. В процессе картирования обязательными являются полевое обследование эталонных объектов и систематизация на этой основе данных дешифрирования.

Геологическое изучение площадей заложения сверхглубоких и глубоких скважин — специализированные среднемасштабные региональные геологические исследования.

Рекомендуется следующая последовательность работ: 1) составление схем предварительного дешифрирования снимков в разных областях спектра (как правило, масштаба 1:1 000 000) разными операторами; 2) сопоставление результатов и геологическая интерпретация объектов дешифрирования с привлечением данных геолого-геофизических исследований; 3) составление карты дешифрирования, геологических разрезов, уточнение места заложения скважин; 4) составление специализированных карт и построение глубинных моделей территории заложения скважины, учитывающих результаты бурения. При этом применяются локальные и детальные КС при основном масштабе геологических построений 1:200 000.

Как показывает опыт работ в районе Кольской сверхглубокой скважины, целенаправленное дешифрирование КС создает возможности выделения принципиально новых структур, формирования новых представлений о ранее известных структурах и принципов корреляции геологических комплексов, развитых на поверхности и вскрытых скважиной.

### *Вопросы для самопроверки*

1. При каком типе разреза лучше дешифрируется слоистая структура: 1) известняки с прослоями глин; 2) глины с прослоями известняков.

2. Почему массивы кислых интрузивных пород являются в целом более «фотогеничными» по сравнению с основными интрузивами?

3. Для разрывов какой кинематики (из перечисленных ниже) шанс быть обнаруженным на одномасштабных КС больше: 1) поперечные сбросы; 2) диагональные сдвиги; 3) продольные надвиги:

4. Нет ли противоречия в том, что, сознательно используя мелко-масштабные МДЗ, исследователи пытаются их дешифрировать с максимальной детальностью? Не проще ли работать с крупномасштабными аэроснимками?

5. Почему мел-палеогеновые отложения к северу от Памира дешифрируются с неизмеримо меньшей детальностью, чем те же отложения к западу от него?

## ПРИМЕНЕНИЕ КОСМИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ В СТРУКТУРНО-ГЕОМОРФОЛОГИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЯХ

Наиболее успешно космическая информация используется при изучении рельефа поверхности Земли.

Во-первых, при наблюдении стереомоделей космических изображений, рельеф изучаемой поверхности мало или совсем не зависит от каких-либо теоретических представлений, причем все исследователи видят рельеф на стереомоделях одинаково, хотя и с разной степенью детальности.

Во-вторых, рельеф является одной из главных характеристик поверхности, определяющих облик космического изображения. Даже небольшие изменения в высоте рельефа, степени и характере его расчлененности заметно сказываются на его интегральных оптических свойствах и фиксируются на снимках. Это объясняется несколькими причинами. Хорошая фотогеничность рельефа на снимках, полученных пассивными измерительными комплексами, связана прежде всего с огромной изменчивостью и специализированностью природных ландшафтов, имеющих индивидуальные оптические характеристики. Кроме того, выразительность рельефа на КС подчеркивается тенями. При низком стоянии солнца тени проявляют даже незначительные детали эрозионной сети, малозаметные гряды и уступы.

При использовании активных радиолокационных измерительных систем, рельеф является главным измеряемым параметром. Поскольку локация производится под углом к горизонту, детали рельефа подчеркиваются длинными тенями, и в этом смысле радиолокационные снимки сопоставимы с фотоснимками, снятыми при низком стоянии солнца. При этом важно, что сантиметровое излучение радаров слабо рассеивается в атмосфере, в отличие от микрометрового, измеряемого фото- и сканерными системами, и рельеф поэтому проявляется при радарной съемке более четко.

Повышенный интерес к изучению рельефа связан с тем, что он является индикатором геологического строения и геологических процессов. Известны случаи, когда на космических снимках даже регионального уровня генерализации четко дешифрируются слои мощностью всего в 4—5 м, если они образуют достаточно крупные формы рельефа. В то же время структура литологических комплексов, сложенных контрастными по составу, но близкими по устойчивости породами, часто настолько маскируется случайными геоморфологическими деталями, что на космических снимках не читается.

КС являются наиболее удобным материалом для неотектонического районирования. Этому способствуют четкое видение рельефа и естественная для высотных снимков земной поверхности совмещенность в одном изображении ландшафтных, геоморфологических и геологических моделей изучаемой местности.

## 8.1. Задачи и цели структурно-геоморфологических исследований

При структурно-геоморфологических исследованиях рельеф изучается в комплексе с общей структурно-тектонической обстановкой. Постигание причинной взаимосвязи между тектоническими процессами и процессами рельефообразования — главная цель структурно-геоморфологического анализа. Таким образом, структурно-геоморфологические исследования находятся на стыке геологии и общей геоморфологии и в них широко используются методы этих наук.

В связи с ранговостью геологических и соответствующих им геоморфологических объектов, задачи структурно-геоморфологического анализа можно подразделить на локальные, региональные и глобальные. На локальном уровне изучаются выраженность, или отражение в рельефе локальных тектонических структур (складок, блоков, флексур, разрывов и пр.), а также характерные комплексы форм рельефа, связанные с определенными геологическими процессами (например, оледенением, речной эрозией и аккумуляцией, ветровой аккумуляцией, землетрясениями, вулканической деятельностью и т. д.).

На региональном уровне изучаются обобщенные характеристики рельефа и особенности рельефообразования более крупных тектонических и неотектонических единиц — складок основания, крупных платформенных валов и прогибов, поперечных поднятий и опусканий как рифтового, так и иных типов горно-складчатых поясов и межгорных впадин и многих других элементов тектонической и неотектонической структуры. К региональным задачам также относится анализ выраженности в рельефе крупнейших разрывных зон и зон региональных глубинных деформаций.

На глобальном уровне изучаются геоморфологические элементы планетарного ранга как в рамках статичных тектонических моделей (например, континенты — океаны или платформы — эпигеосинклинальные горноскладчатые пояса), так и в рамках динамических моделей тектонического развития (например, срединноокеанические зоны спрединга — океанические котловины — субдукционные системы — континентальные сегменты плит и пр.).

В целом специфические задачи изучения рельефа могут быть сведены к так называемой геоморфологической триаде, предусматривающей выявление и анализ геометрических характеристик рельефа (морфометрия), его возрастных характеристик и особенностей его развития (историческая геоморфология) и его генезиса. МДЗ наиболее информативны при решении морфометрических задач структурной геоморфологии и в несколько меньшей степени — при решении генетических задач. Задачи исторической геоморфологии решаются, как правило, при комплексном применении разнообразных геологических и геоморфологических методов.

## 8.2. Выбор источников информации

При изучении рельефа на стереоизображениях локального и регионального уровней наиболее удобны панхроматические черно-

белые фотоснимки, а также снятые в зеленой части спектра. Цветные фотоснимки обладают, как правило, худшим пространственным разрешением, однако они могут служить хорошим дополнением к черно-белым.

При изучении рельефа по одиночным снимкам рекомендуется кроме фотографических использовать весь спектр сканерных снимков, в разной степени отражающих отдельные компоненты ландшафта. Детальный морфометрический анализ удобно проводить по радарным снимкам, особенно снятым при небольшом угле локации, такие снимки обладают высокой выразительностью передачи рельефа.

РЛ-снимки позволяют иногда проследживать рельеф, погребенный под рыхлыми отложениями небольшой мощности. При благоприятной освещенности на высотных фотоснимках удается изучать подводный рельеф на глубинах до 40—60 м. При большей толщине слоя воды рельеф может быть восстановлен лишь по косвенным данным.

В настоящее время разработаны методы выявления рельефа дна океанов по данным измерения водной поверхности спутниковыми РЛ-высотометрами. Поверхность океана отражает рельеф наподобие грубого шерстяного одеяла, накинутого на сад с каменными горками. При таком способе получения карт рельефа дна океана требуются учет огромного количества РЛ-данных, сопоставление их с гравитационным полем и использование специальных компьютерных методов получения изображений.

### 8.3. Формы и комплексы форм рельефа как результат развития структур земной коры

Представление о земной коре как о развивающейся, изменяющейся во времени системе позволяет представить ее структуру как сочетание разновозрастных и разнопорядковых элементов.

В общем случае, в каждый момент времени дневную поверхность можно представить как сочетание участков, на одних из которых рельефообразование имеет активный характер, отражая развитие «живых» в это время структур, а на других происходит только пассивная препаляция или, наоборот, нивелирование «отмерших» структур.

Рельеф как индикатор новейших, и в особенности современных тектонических движений имеет большую наглядность, чем тектоническая структура. Метровые, а иногда и дециметровые перемещения вдоль активных тектонических линий в геологическом смысле мгновенно отражаются в хорошо заметных формах рельефа, в то же время их выявление в геологической структуре часто затруднено даже при наземных исследованиях. Наиболее чувствительным к тектоническим движениям экзогенным процессом является, вероятно, водная эрозия. Любые ослабленные зоны, например зоны повышенной трещиноватости, подвергаются эрозии в первую очередь, на них закрепляется гидросеть, и они обнаруживают себя в рельефе в виде эрозионных ложбин разной масштабности. Развитие площадных

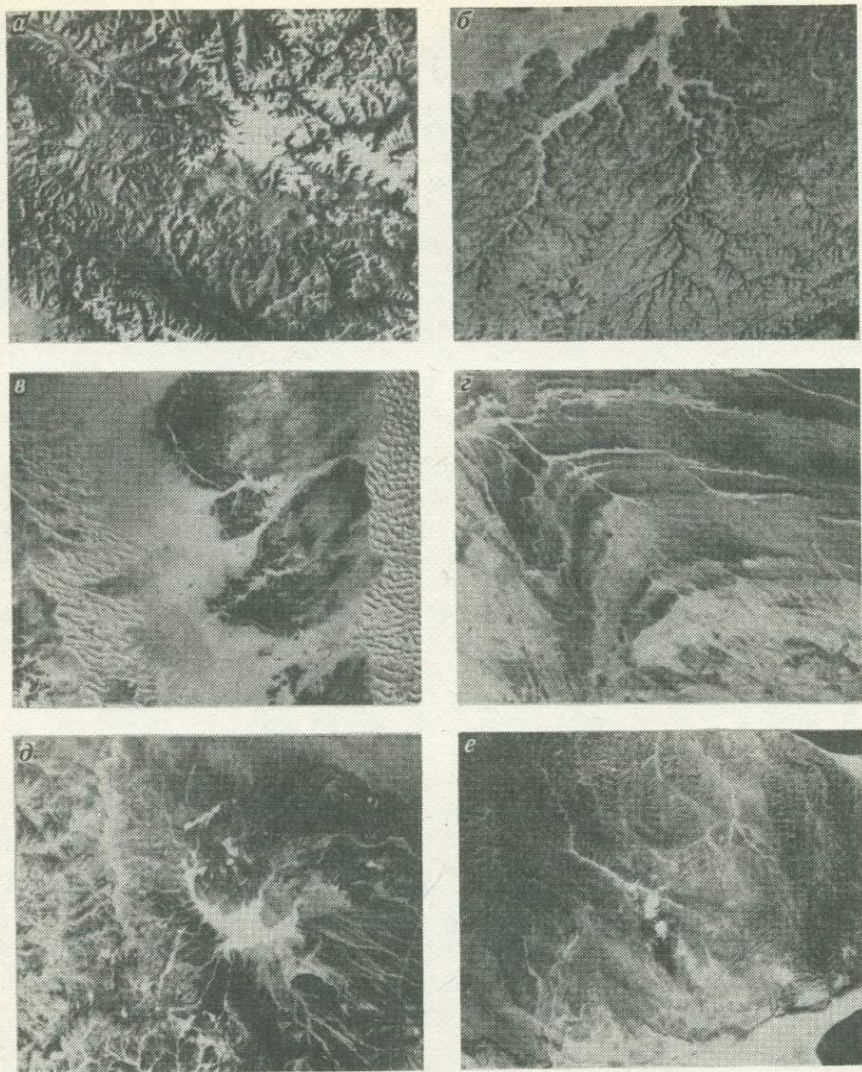


Рис. 26. Характерные рисунки эрозионного расчленения горных и равнинных районов: *а* — Монгольский Алтай, *б* — плато Хардамат (п-ов Аравия), *в* — Тассилин-Аджер, *г* — Антиатлас (*в*—*г* — Северная Африка), *д* — Иордания, *е* — Сомали

структур часто сопровождается изменением региональных уклонов местности и соответственно перестройкой плана гидросети, перехватом и отмиранием одних долин и развитием других. Итогом эволюции эрозионной сети того или иного региона является характерный рисунок расчлененности его рельефа (рис. 26). Рисунок расчлененности наиболее легко выявляется на КС; классификация рисунков эрозионной сети и обособление участков местности соответственно

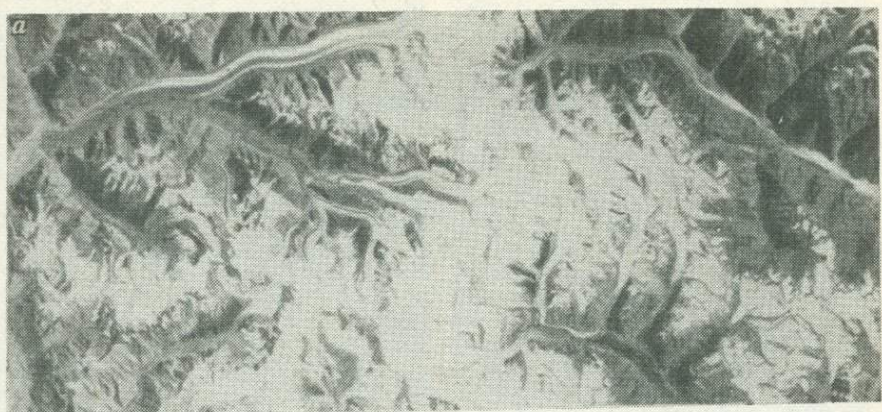


Рис. 27. Горные ледники на КС:

*а* — Памир (в верхней части снимка — ледник Федченко), *б* — Кунь-Лунь, *в* — Терской-Алатау

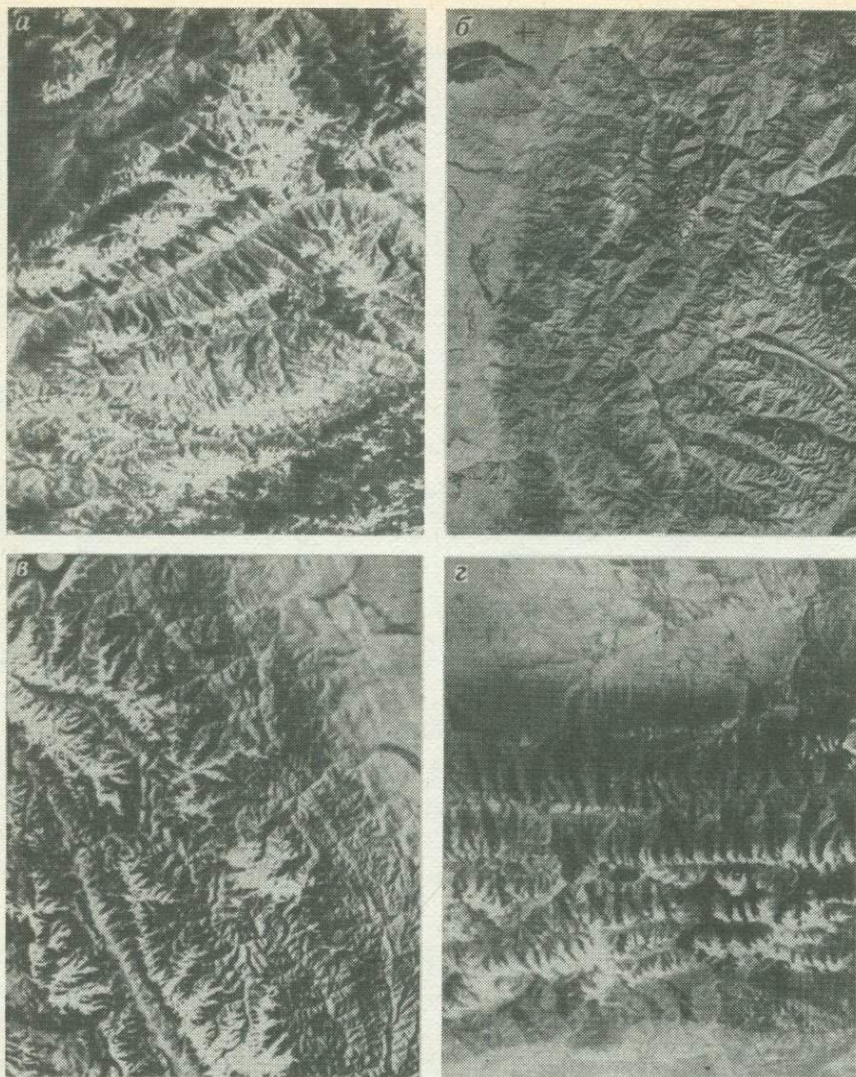


Рис. 28. Горные области на КС:

а — Гиндукуш и Южный Памир, б — Западный Памир, в — Кунь-Лунь, г — Южный Тянь-Шань

этой классификации являются простым, но очень наглядным и надежным методом неотектонического районирования.

Не столь очевидна связь с новейшими тектоническими движениями форм рельефа, связанных с эоловыми и ледниковыми процессами, однако существуют данные, подтверждающие такую связь. Например, ориентировка протяженных барханных цепей имеет, по-видимому, структурную основу, хотя морфология каждого отдельного бархана

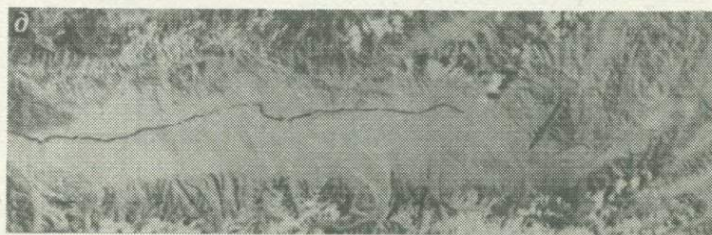
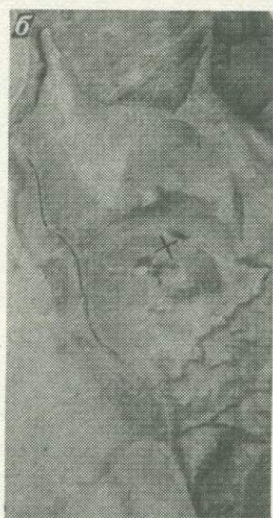


Рис. 29. Молодые межгорные впадины на КС:

а — Таджикская депрессия, б — Байсунская впадина (схему дешифрирования см. на рис. 24), в — Кулябская впадина, г — Душанбинская впадина (Гиссарская долина), д — Алайская долина

связана с преобладающим направлением ветра. Характерный для пустынных и полупустынных районов дефляционный ячеистый рельеф, связанный с локальным выдуванием малоустойчивых грунтов, также, вероятно, наследует структурный план территорий.

Современное распространение ледников (вне арктических зон) связано с активно растущими неотектоническими структурами (рис. 27), кроме того, во многих случаях очевиден тектонический контроль ориентировки и местоположения конечно-моренных гряд (как в горах, так и на равнинах), ложбин стока водно-ледниковых потоков, ориентировки камов и озв и пр. Для выявления этих форм рельефа на космических изображениях, даже среднемасштабных, требуется определенный опыт; по своей фотогеничности они уступают эрозионным формам.

На снимках регионального и локального уровней генерализации иногда удается установить формы рельефа, связанные с карстовыми и суффозионными процессами. Образование линейного карста связано с водной эрозией; соответствующие формы рельефа индицируют линейные тектонические структуры. В районах молодой складчатости часто наблюдается концентрическое расположение локальных образований карста и суффозионных западин; иногда удается установить, что они приурочены к периферическим частям растущих молодых поднятий.

Важным аспектом структурно-геоморфологических исследований является изучение комплексов форм рельефа, созданных различными экзогенными процессами, но обусловленных в целом единой тектонической причиной. Такая комплексная индикация новейших тектонических структур наиболее убедительна, а геологическая интерпретация комплексов форм рельефа — зачастую единственна. Например, на космических изображениях крупных положительных активных структур горных областей (рис. 28) практически всегда удается обнаружить: обширные денудационные или селективно-денудационные поверхности, формирующие их вершинный уровень; глубокие многоярусные эрозионные врезы, образующие в целом центробежный линейный или дендритовидный рисунок гидросети и т. д. Многие межгорные впадины обладают зонально-концентрическим рельефом (рис. 29).

Анализ пространственного сочетания более мелких форм рельефа разного генезиса позволяет выявлять локальные неотектонические структуры. Этот анализ особенно актуален в нефтепрогнозных и нефтепоисковых исследованиях, где положительные локальные структуры рассматриваются как потенциальные ловушки углеводородов. При этом особенно важно, что совокупность форм рельефа может в некоторых случаях индицировать не только приповерхностные, но и глубинные структуры.

#### **8.4. Дешифрирование и тектонический анализ рельефа локальных новейших структур**

**Анализ ландшафтной линейности.** На среднемасштабных КС относительно выровненных районов молодых горно-складчатых стран

(частные впадины, адыры предгорий, субгоризонтальные селективно-денудационные поверхности и пр.), а также некоторых районов платформенных равнин обнаруживается своеобразный рисунок изображений, имеющий вид тонкой параллельной штриховки. В рельефе мобильных областей ей отвечают относительно небольшие эрозионные понижения длиной до первых километров, обладающие четкой пространственной упорядоченностью. Последняя заключается в параллельности рассматриваемых понижений и примерно равном расстоянии между ними. Эти системы элементов рельефа имеют локальное распространение и занимают обычно небольшие изометричные площади, часто трассирующиеся по одной линии. Иногда скопления таких площадей образуют четкий линейно-концентрический рисунок.

Детальный анализ крупномасштабных аэроснимков и полевые наблюдения показывают, что тонкая параллельная штриховка на космических снимках объединяет эрозионные формы двух видов. Это или система параллельных эрозионных понижений, образующих основные формы мезорельефа, или системы второстепенных долин.

Во втором случае соотношения между малыми долинами, отражающимися на КС параллельной штриховкой и прочей эрозионной сетью, могут быть сложными. В гл. 9 на рис. 43а показана схема дешифрирования одного из районов Сурхандарьинской впадины (Средняя Азия). Здесь наблюдается в целом сетчато-перистый рисунок гидросети, образованный основными водотоками юго-восточного простираения и их притоками юго-западной, широтной и других ориентировок. Субдолготные эрозионные понижения наименее развиты и часто имеют вид неглубоких слепых долин, расположенных на частных водоразделах и не достигающих основной гидросети. На космических снимках, однако, наблюдается тонкая штриховка именно меридионального простираения. Это, по-видимому, связано с высокой пространственной упорядоченностью субпараллельных долготных понижений и, возможно, с тем, что они отражают наиболее молодую трещинную сеть. По данным полевых наблюдений, трещины и малоамплитудные разрывы, контролируемые эрозионные формы, образующие как ландшафтную линейность, так и закономерно связанные с ними линейные понижения иных простирааний, в целом являются приповерхностными.

Явление упорядоченности малых форм рельефа предгорий и межгорных впадин давно уже привлекало внимание специалистов. Они изучались задолго до появления КС (С. С. Шульц, А. С. Кесь, Г. Льюис и др.); результаты этих исследований были обобщены Н. П. Костенко.

Н. П. Костенко отвергает чисто экзогенное происхождение линейности и считает, что она, как было отмечено, предопределена структурными факторами. Однако вопрос заключается в том, каким образом развивается трещинная сеть в приповерхностных горизонтах пород, мощностью порой всего в несколько метров, не затрагивая нижележащих, часто близких по реологическим свойствам образований. Одно из наиболее вероятных решений — данные трещины

развиваются «сверху» и связаны с чисто поверхностными геодинамическими эффектами.

Особенности строения и пространственного распределения малых линейных элементов ландшафта дают основание связывать их образование с характером поверхностного разрушения пород в условиях их неоднородно-напряженного состояния. Как показывают эксперименты, поле напряжений всегда имеет дискретный характер, что связано с развитием в материале параллельных или концентрических силовых линий, которые можно рассматривать как своеобразные ловушки потенциальной энергии.

Выявляемая на космических снимках тонкая параллельная штриховка может являться ландшафтным отражением, «снимком» структуры поля напряжений, что открывает большие перспективы ее дальнейшего изучения.

В последнее время обнаружены малые линейные формы ландшафта на территории древних платформ. В. Н. Губиным и Э. А. Левковым был описан параллельно-полосчатый рисунок фотоизображения областей древнего материкового оледенения (Белорусская ССР). По мнению этих исследователей, параллельно-полосчатый рисунок этих областей прямо или косвенно связан с «гляциальным воздействием на субстрат». В одних случаях он обусловлен развитием гляциодислокаций в приповерхностной части разреза платформенного чехла (в этом случае образуются структуры, являющиеся миниатюрной моделью складчато-надвиговых поясов мобильных областей), в других — гляциогенной активизацией разломных зон более древнего заложения. Если такая трактовка малых элементов ландшафта областей древнего оледенения верна, то соответствующие структуры можно было бы использовать для выяснения направления движения ледника, поскольку, очевидно, они должны располагаться перпендикулярно к направлению движения.

Изучение малых линейных элементов ландшафта, по данным ДЗ, только начинается, и уже в ближайшее время можно ожидать получения важных результатов.

Более распространенным видом ландшафтной линейности, обнаруживаемой практически на всех космических изображениях локального и регионального уровней генерализации, являются достаточно протяженные (первые километры — первые десятки километров) линейные элементы рельефа, которые выглядят на МДЗ как прямые или почти прямые непрерывные однородные линии полосового и граничного характера.

Полосовые линейные элементы рельефа представлены в основном прямолинейными эрозионными ложбинами и долинами разных порядков, развитыми как в горных, так и на равнинных участках. Прямолинейные водораздельные гребни, как правило, сочетаются с линейными понижениями и наиболее развиты в горных областях. Они отвечают либо особенностям литологического состава геологических комплексов, либо особенностям их трещинной тектоники.

Также широко распространены граничные линейные элементы рельефа, являющиеся границами крупных форм последнего. На-

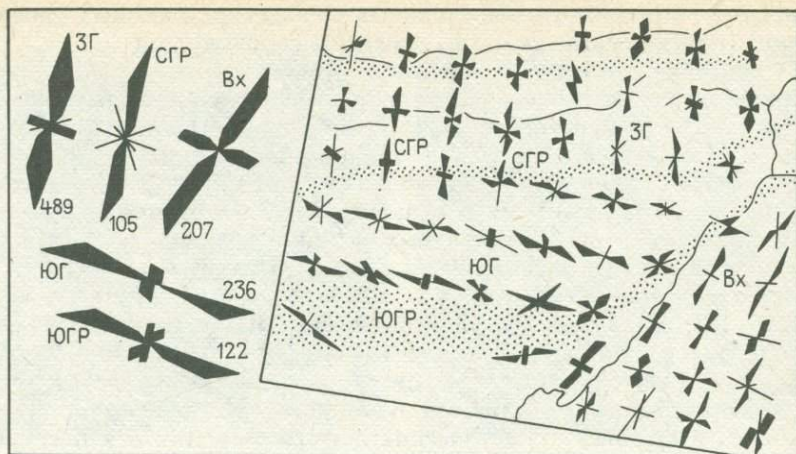


Рис. 30. Розы-диаграммы ориентировок линейных элементов рельефа Южного Тянь-Шаня и Таджикской депрессии. По В. Н. Кузнецко и др.

Слева — сводные диаграммы, характеризующие тектонические зоны (ЗГ — Зеравшано-Гиссарская, ЮГ — Южно-Гиссарская, Вх — Вахшская) и глубинные разломы (СГР — Северо-Гиссарский, ЮГР — Южно-Гиссарский); цифры показывают количество замеров

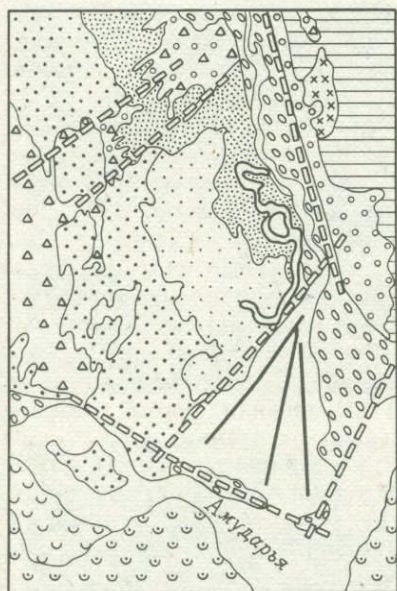
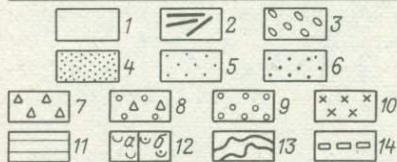


Рис. 31. Схема дешифрирования КС района песков Каттакум (Средняя Азия).

Террасовый комплекс: 1 — пойменные террасы, 2 — дельта Сурхандарьи, 3 — низкие надпойменные террасы, 4—6 — террасы Сурхандарьи, моделированные золовыми процессами (4 — поздняя, 5 — средняя, 6 — ранняя); долинные поверхности выравнивания: 7 — пролювиальная, 8 — пролювиально-аллювиальная, 9 — аллювиальная, 10 — эрозионно-аккумулятивная, 11 — денудационная, 12 — золовая (а — пески закрепленные, б — пески развываемые); 13 — покинутые меандры Сурхандарьи; 14 — линейменты



пример, на равнинных территориях это границы морфологических элементов долин крупных рек (террасовые бровки, тыловые швы, уступы, границы раскрывающихся в долины конусов выноса и пр.), совпадающие с границами четвертичных комплексов, а в горных

областях — ограничения выровненных водоразделов разных уровней, границы протяженных склонов, перегибы склонов и пр.

Ориентировка крупных линейных элементов рельефа, как правило, упорядочена, что наблюдается в преимущественном развитии элементов одних направлений и подавлении других. Общий рисунок линейных элементов рельефа для каждой достаточно крупной неотектонической структуры индивидуален (рис. 30). Очевидно, что рисунок линейности связан, в общем, с неотектоническим режимом, поэтому корреляцию линеаментных полей отдельных неотектонических единиц можно использовать в качестве критерия сходства их режимов развития.

Как было показано, большая часть линейных элементов рельефа имеет структурную основу. Конденудационное и конэрозионное развитие новейших структур приводит к становлению в рельефе как активных разрывов, трещин, зон трещиноватости, малоамплитудных (а иногда и крупных) пластических деформаций, так и к пассивной препаляции «отмерших» линейных неоднородностей геологической структуры. Поэтому рельефообразование как бы «проявляет» все накопившиеся линейные неоднородности геологической структуры, что позволяет использовать ландшафтную линейность как индикатор деформационных обстановок настоящего и прошлого времени.

**Рельеф новейших локальных поднятий.** Конкретное сочетание форм рельефа, образующихся на участках новейших поднятий, зависит от множества факторов — региональной тектонической позиции, климата, литологического состава вовлеченных в поднятие пород, типа и амплитуды поднятий и пр. Однако некоторые особенности рельефа локальных поднятий наиболее характерны и лучше всего дешифрируются на КС: 1) специфические рисунки гидросети; 2) локальные аномалии густоты и глубины расчленения; 3) локальное появление денудационных поверхностей выравнивания среди аккумулятивных или участков с эрозионным типом рельефа среди денудационного и аккумулятивного; 4) аномальная форма элементов рельефа, имеющих обычно «правильные» очертания.

Транзитные водотоки, пересекающие локальные поднятия, находящиеся в конседиментационных фазах развития, обычно резко уменьшают меандрирование, спрямляют русло и сужают долину. Для энергично растущих поднятий, находящихся в конденудационной стадии развития, характерно обтекание их транзитным водоток, причем обтекание может быть односторонним и двухсторонним, с бифуркацией русла перед поднятием и слиянием протоков после него. Часто на космических изображениях удается наблюдать последовательные стадии латерального смещения долин рек, от которых остаются высохшие русла или просто фрагменты сильно моделированных линейных понижений (рис. 31).

Если рост поднятий происходит медленно, то транзитные водотоки успевают в них врезаться; такие поднятия выявляются по локальным увеличениям глубин параллельных долин. Интересное сочетание форм рельефа возникает при неравномерной во времени скорости роста локальных поднятий. Иногда конседиментационное

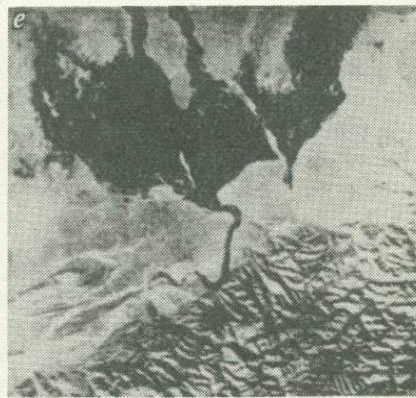
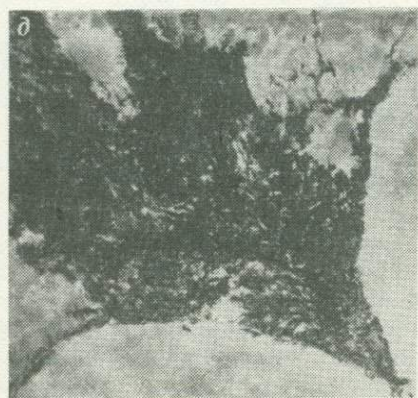
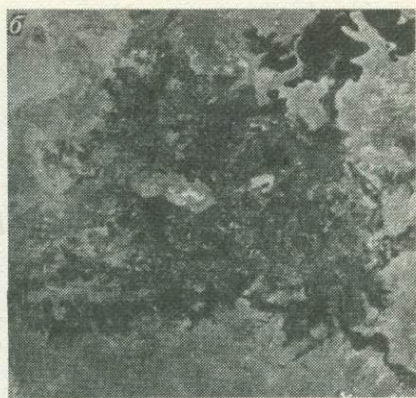


Рис. 32. Дельты и конусы выноса на КС:

*а* — р. Урал, *б* — р. Сырдарья, *в* — р. Балх (республика Афганистан), *г* — р. Пяндж, *д* — р. Теджен, *е* — р. Тарим

развитие поднятий происходит так быстро, что сказывается в выполаживании продольного профиля пересекающей его реки и образовании на перегибе своеобразной частной дельты. При выходе поднятия в рельеф и замедлении его роста дельтовые протоки врезаются и образуют систему antecedentных долин. Классическим примером врезанной дельты является один из участков реки Гердыманчай в Азербайджане, которая пятью параллельными протоками пропиливает Карамарьямский увал.

Очень наглядно локальные поднятия выявляются по аномалиям густоты и глубины эрозионного расчленения, связанного с местной (не транзитной) эрозионной сетью (см. рис. 26). Эти аномалии в пределах поднятий более интенсивны, причем увеличение густоты расчленения связано со сменой аккумулятивного рельефа на денудационный в районе поднятия, с выходом на дневную поверхность коренных пород, обычно более трещиноватых, чем четвертичные осадки, и со значительной тектонической раздробленностью купольных частей развивающихся антиклинальных поднятий. В редких случаях локальные поднятия имеют очень слабые расчлененность и врез; это происходит, когда селективная денудация выносит с купольных частей поднятий рыхлые и раздробленные породы и на поверхности обнажается однородный бронирующий горизонт.

Легко выявляются на КС локальные площади с более разработанным эрозионным или денудационным рельефом среди менее разработанного. Как правило, такие площади также соответствуют молодым локальным поднятиям.

Еще один наглядный способ проявления в рельефе активных локальных поднятий — аномальная форма элементов рельефа или «неестественные» пространственные сочетания последних. Наиболее характерные примеры — это резкие сужения долин рек, вплоть до полного исчезновения аккумулятивных элементов долин, и отчетливые деформации плановых очертаний конусов выноса и сухих дельт, имеющих обычно правильную веерную форму. Часто встречающийся случай индикации локальных поднятий — так называемый «отстрел» конусов выноса, когда молодые их генерации не вложены в более древние, а в разной степени сдвинуты по латерали. Участок между конусами, пропиливаемый основным руслом водотока, соответствует локальному поднятию (рис. 32).

Рассмотренные примеры не исчерпывают всех случаев проявления в рельефе активных локальных поднятий. Поиск и интерпретация форм индикаторов активных структур является сильным методом анализа космических изображений и находит широкое практическое применение в разных отраслях геологии.

**Рельеф зон активных разрывных нарушений.** Помимо регионально-тектонических, климатических и других причин, рельеф разрывных зон зависит от кинематического типа последних, а также от соотношений ориентировки разрывов с общей структурно-геоморфологической зональностью.

Активно развивающиеся продольные разрывы с субвертикальным положением сместителя формируют уступы, разделяющие блоки

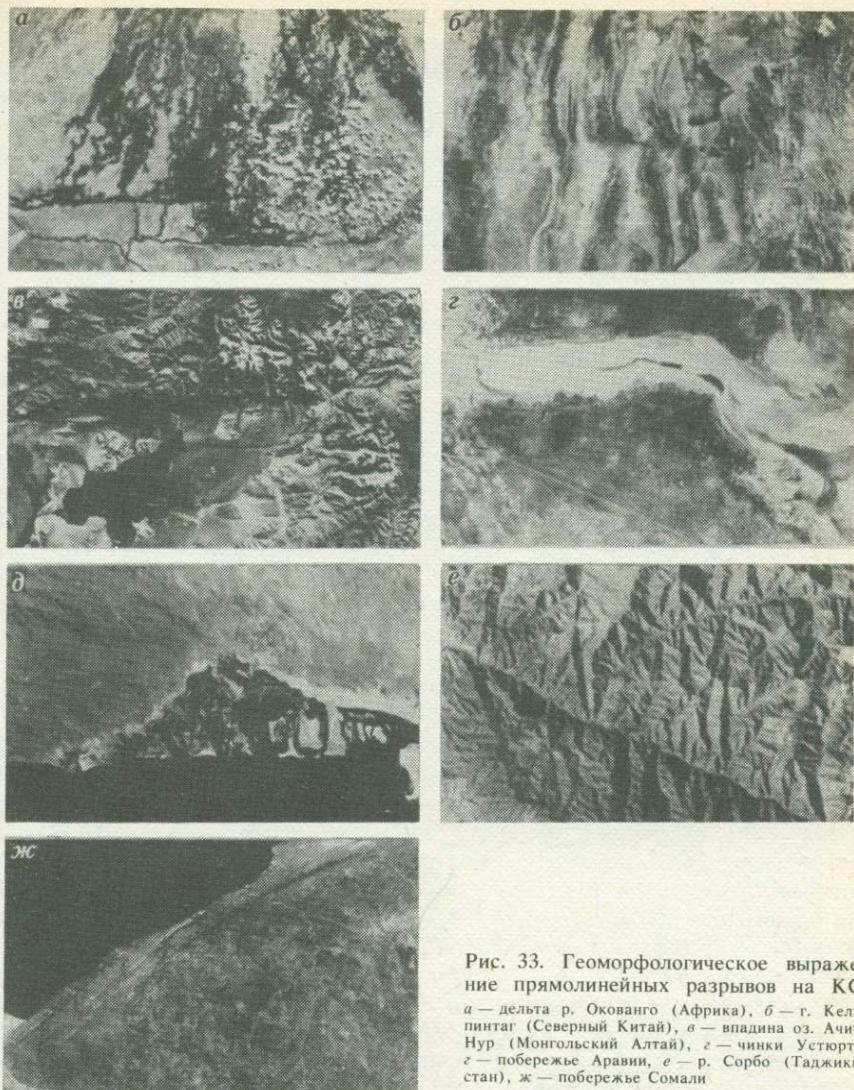


Рис. 33. Геоморфологическое выражение прямолинейных разрывов на КС: а — дельта р. Окованго (Африка), б — г. Кельпинга (Северный Китай), в — впадина оз. Ачит-Нур (Монгольский Алтай), г — чинки Устюрта, д — побережье Аравии, е — р. Сорбо (Таджикистан), ж — побережье Сомали

неодинакового геоморфологического строения (рис. 33). На космических изображениях особенно хорошо выявляются разрывы, разделяющие области денудационного и аккумулятивного рельефа; иногда хорошо заметен протяженный, отчетливо выраженный уступ, разделяющий поверхности со слабо различающимся рельефом. По соотношению рельефа в крыльях продольных активных разрывов иногда удается восстановить их кинематику. Для активных сбросов характерно развитие аккумулятивного рельефа в опущенном крыле и денудационного в поднятом; при этом неравновесность неотектони-

ческого режима компенсируется, главным образом, за счет активной аккумуляции в опущенном. В предгорных районах это обнаруживается по широкому развитию конусов выноса из долин, поперечных тектоническому уступу. В случае активных взбросов формирование единых тектонических уступов не происходит (хотя на бровке поднимающегося крыла развиваются стенки оползневых отрывов), а поднятия компенсируются за счет эрозии активного крыла. Во многих случаях это удастся обнаружить на космических снимках локального уровня, где видны мощные шлейфы гравитационных образований в тылу опущенного крыла взброса.

Поперечные и диагональные к структурно-геоморфологической зональности сбросы и взбросы обычно очень отчетливо отражены в формах рельефа и хорошо заметны на космических изображениях. В тех случаях, когда они сопряжены с локальными поперечными прогибами, разрывы этой группы выражены в рельефе примерно так же, как и продольные. Однако иногда они сказываются только в ступенчатости рельефа, которую легко спутать с денудационной. Тектоническая (разрывная) природа ступенчатости обнаруживается благодаря прямолинейности уступов, разделяющих блоки с разной степенью расчлененности, а иногда и смене типа рельефа блоков по обе стороны от уступа и по широкому развитию молодых коллювиальных образований вблизи него. Очень часто зоны поперечных приразломных прогибов (неотектонических грабенов) обнаруживаются по более светлому фототону, связанному с меньшей расчлененностью ложа грабена, даже если оно лишено молодого аккумулятивного чехла.

Отметим еще раз, что поперечные и диагональные к основной зональности формы выявляются на космическом изображении и на картографических материалах намного более четко, чем продольные, и поэтому они дешифрируются более детально и рассматриваются как более важные. Между тем этот эффект во многом связан с особенностями механизмов восприятия. Если рисунок изображения составлен из большего числа параллельных или субпараллельных линий и небольшого числа отрезков, поперечных к ним, первые воспринимаются как фон, а зачастую просто игнорируются. Понимание этой особенности восприятия обязывает подходить более объективно к оценке значимости выявляемых при дешифрировании структур.

В отличие от разрывных нарушений с крутым заложением сместителей, надвиги, особенно пологие, как правило, не разрабатываются эрозионной сетью и обнаруживаются на космических изображениях слабо. Однако если анализировать не просто поверхность надвига, а весь комплекс принадлежностей структурных форм и связанных с ними элементов рельефа, то геоморфологическая выраженность зон новейшего активного надвигания может быть вполне определенной (рис. 34). Как правило, фронтальная часть надвигающегося блока сминается в асимметричную антиклинальную складку, замковая часть которой разрушается в первую очередь, вследствие чего образуется уступ, параллельный фронту надвига. В нижней части уступа, на некотором удалении от него, обычно сохра-

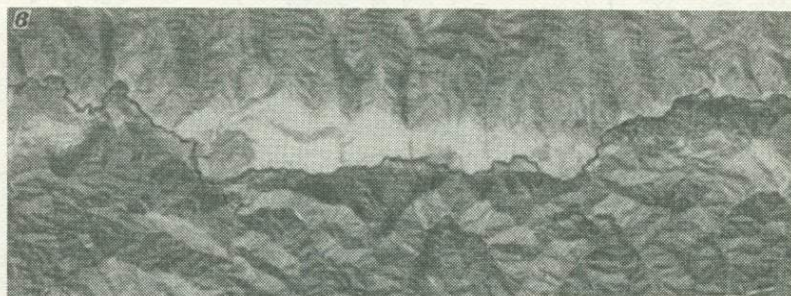


Рис. 34. Структурно-геоморфологическое выражение надвигов на КС:  
*а* — Дарваз-Каракульская зона разломов, *б* — один из надвигов Северо-Макранской зоны (Пакистан),  
*в* — участок Зеравшанской зоны разлома, *г* — Сурхантауский надвиг (юго-западная часть Гиссарского нагорья).

няются фрагменты подвернутого крыла принадлежковой антиклинали, образующие небольшие куэстообразные возвышения в рельефе. Рисунок эрозионной сети между уступом и куэстой в большинстве случаев отличается от такового за пределами надвиговой зоны. В результате образуется характерный рельеф, отображающийся на КС полосовым рисунком изображения. На снимках регионального уровня наиболее заметен пологоизогнутый в плане принадлежковый уступ, особенно если он подчеркнут тенями, а на снимках локального и детального уровня часто удается обнаружить все элементы принадлежкового рельефа.

Пассивные надвиговые структуры, а также надвиговые пакеты и покровы также образуют полосовой рисунок рельефа, однако его структурная интерпретация (по данным МДЗ) является затруднительной, поскольку такой же рельеф могут давать и другие пассивные структуры.

Рельеф зон сдвиговых деформаций отличается наибольшей «узонаваемостью» среди типов рельефа, предопределенных разрывными нарушениями. Это связано с тем, что элементы присдвигового рельефа образуют характерный комплекс форм, ориентированный чаще всего поперек или диагонально к региональной геоморфологической зональности; кроме того, плановые смещения элементов рельефа обнаруживаются легче, чем вертикальные смещения той же амплитуды (рис. 35).

Наблюдается три основных вида проявления сдвиговых зон в геоморфологическом строении: плановые смещения литоморфных элементов рельефа вдоль системы эрозионных ложбин; аналогичные смещения элементов рельефа, не связанных с литологией коренных пород, и, наконец, характерные изгибы линейных положительных форм рельефа.

Первый случай наиболее типичен для рельефа пассивно препарированных складчатых структур, нарушенных поперечными сдвигами. На качественных среднемасштабных КС отчетливо выявляются смещения с амплитудой в несколько десятков метров.

Плановые смещения молодых форм рельефа наблюдаются в активных сдвиговых зонах, например среднеазиатских Талассо-Ферганской, Дарваз-Каракульской и др. Здесь обнаруживаются закономерные систематические смещения вдоль линейных понижений рельефа поперечных к ним молодых долин и разделяющих их водоразделов, а в некоторых случаях террас, конусов выноса и др. Используя выявленные на космических изображениях плановые смещения молодых элементов рельефа, П. Молнар, П. Тапонье, В. Г. Трифонов и другие исследователи установили, что многие крупнейшие разломы восточной части Средиземноморского пояса и горных сооружений Центральной Азии (Чаманский, Алтындагский, Джунгарский, Анатолийский и др.) на новейшем и современном этапах развивались как сдвиги. В том случае, если сдвиговые деформации не локализованы в узких разрывных структурах, а распределены в значительных по ширине зонах, линейные элементы рельефа, пересекающие эти зоны, приобретают характерную S- и Z-образную плановую форму.

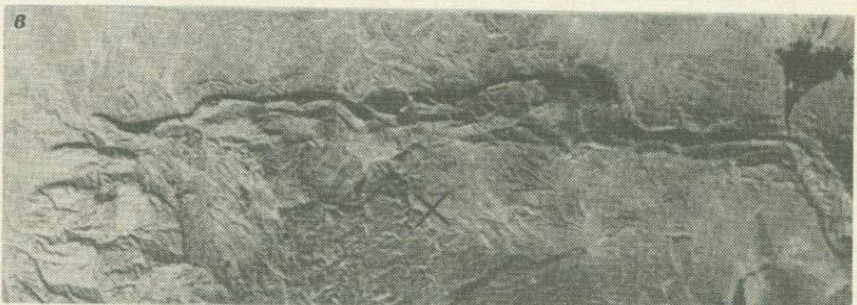
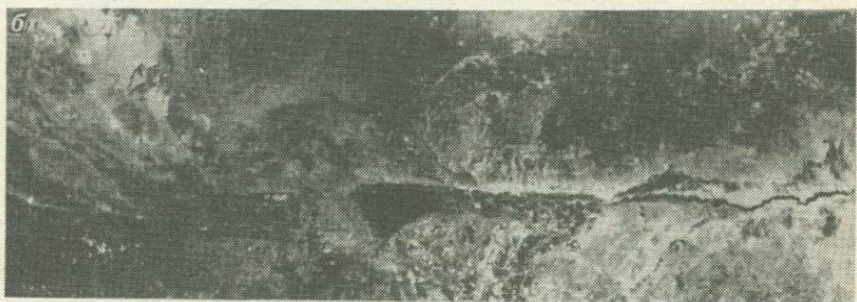


Рис. 35. Структурно-геоморфологическое выражение сдвиговых структур:  
*а* — Алтындагский левосторонний сдвиг, *б* — левосторонний сдвиг Мертвого моря (Левантийский), *в* — левосторонний Альбурзский сдвиг (Афганистан), *г* — правосторонний Илякский сдвиг (Средняя Азия)

На космических снимках соответствующий «шеvronный» рисунок изображения выглядит наиболее наглядно, когда в сдвиговой зоне преломляется сразу большое число параллельных линейных элементов рельефа.

### 8.5. Анализ космических изображений при региональных и глобальных структурно-геоморфологических исследованиях

К важнейшим задачам регионального структурно-геоморфологического анализа следует отнести выявление новейшего структурного плана крупных регионов и изучение обобщенных характеристик рельефа и процессов рельефообразования, составляющих их тектонических и неотектонических единиц.

При изучении новейшего структурного плана по данным МДЗ основное внимание сосредоточено на уточнении границ крупных структур и установлении глубинного контроля их пространственного размещения (рис. 36, 37). По мнению большинства исследователей, границы основных неотектонических элементов — платформенных равнин и горноскладчатых областей — контролируются упорядоченными системами линейных зон деформаций, образующих своеобразный структурный каркас, в ячеи которого вписаны контрастные новейшие структуры. На примере Тянь-Шаньского региона и его обрамления В. И. Макаров и Л. И. Соловьева показали, что неотектоническая значимость региональных линейных зон не зависит от того, включают они или не включают крупные разрывные нарушения, а также от того, находятся ли они в соответствии с древней тектонической зональностью. Признание равноправности региональных линейных зон разных простираний привело этих авторов к концепции «перекрестного структурного плана» (новейших структур), которая затем была перенесена на другие регионы. Более подробно этот аспект структурно-геоморфологических исследований рассматривается в гл. 9, посвященной изучению линеаментов.

Хорошая выраженность на КС регионального уровня даже небольших форм рельефа позволяет решать разнообразные практические задачи. Так, С. А. Сладкопепцев, изучивший эрозионную сеть Иссык-Кульского района, сделал вывод о том, что глубина и густота расчленения этой территории связаны с высотой и типом рельефа. Глубины расчленения наиболее велики на максимальных поднятиях — хребтах с альпийским рельефом. Крупные трогои здесь имеют протяженные и крутые склоны, однако дробность их расчленения невелика; часто склоны трогов сглажены. По-видимому, густота расчленения ограничивается активностью склоновых процессов, длительной консервацией рельефа подо льдом и экзарацией, которая срезала мелкие формы рельефа. Кроме этого, разреженность врезов высокогорий может объясняться развитием селективно-денудационных поверхностей и освоением древних высокоподнятых поверхностей выравнивания.

В пределах среднегорных возвышенностей и приподнятых предгорных шлейфов густота расчленения максимальная при сравни-



Рис. 36. Озера высокогорных (сильнорасчлененных) территорий на КС:  
 а — Иссык-Куль (Центральный Тянь-Шань), б — Кара-Куль (Памир)

тельно небольших врезках, что объясняется рыхлостью эродируемых пород при сравнительно небольшой активности эрозии. Наконец, на пологонаклонных предгорных равнинах глубины расчленения уменьшаются до минимальных и одновременно становится меньше густота сети временных водотоков.

С помощью КС созданы серии региональных геоморфологиче-

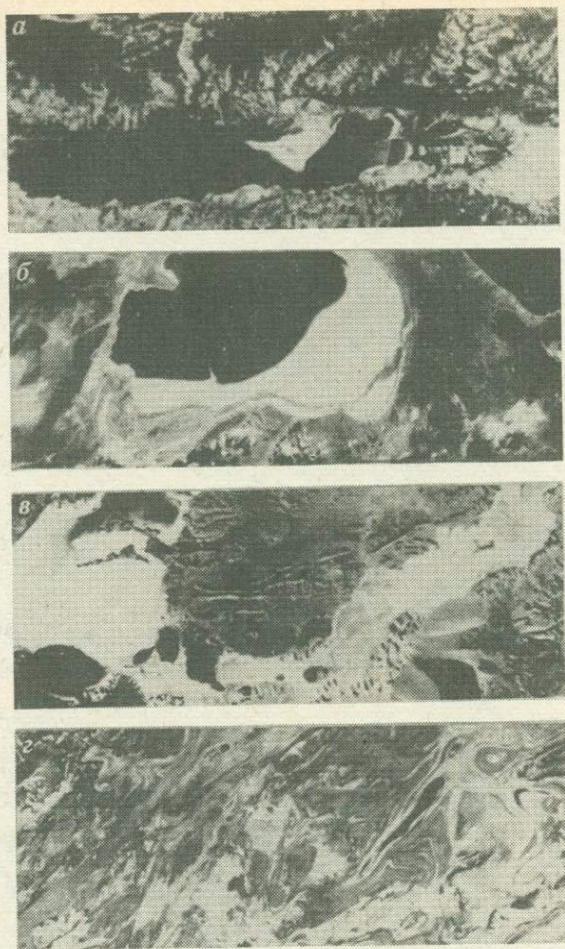


Рис. 37. Озера низкоргорных (слаборасчлененных) территорий на КС:  
*а* — Мертвое море (Израиль), *б* — залив Кара-Богаз-Гол (Туркмения), *в* — Дешт и Нейриз (Загрос),  
*г* — высохшие соленые озера (Северный Иран)

ских и структурно-геоморфологических карт различных районов Земли и других планет земной группы. Даже в хорошо изученных регионах космические изображения позволяют получить новые данные как о распространенности разновозрастных геоморфологических поверхностей и врезов, так и о формах проявления новейших и современных неотектонических структур в рельефе. Одно из важных открытий, которое стало возможным главным образом благодаря КС,— это обнаружение региональных кольцевых или концентрических структур рельефа, анализу которых посвящена гл. 10.

Большой интерес для региональных геоморфологических исследований представляют перспективные снимки горных областей (рис. 38). Расчлененность рельефа, бросающаяся в глаза при на-

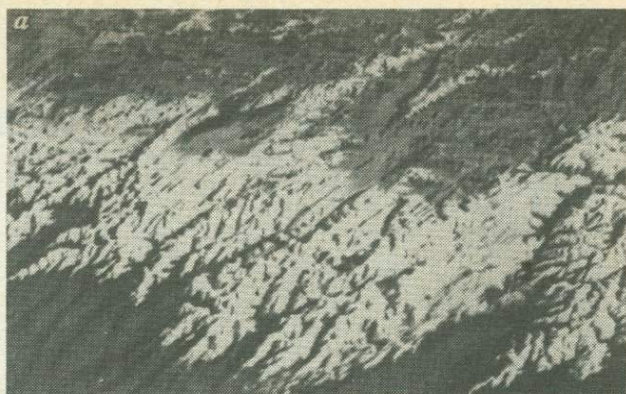


Рис. 38. Сравнение перспективного («а», Гималаи) и планового («б», Гиндукуш) КС горных областей

блюденни плановых снимков, здесь маскируется, но становятся наглядными наличие исходных вершинных поверхностей выравнивания и их связь с аналогичными поверхностями соседних территорий. Анализ таких снимков позволяет лучше понять точку зрения геологов, связывающих горообразование в таких регионах, как Гималаи, не с автономными поднятиями этих областей, а с «подтягиванием» под них внешних прогибов и всплыванием сдвоенной сиалической коры.

Главными областями применения материалов дистанционного зондирования при глобальных структурно-геоморфологических



Рис. 39. Карта рельефа дна Атлантического и Индийского океанов по данным РЛ-измерений водной поверхности. По Б. Хаксби.

исследованиях являются: изучение пространственного распределения геоморфологических объектов планетарного ранга; анализ их взаимоотношений с целью установления генетических связей этих объектов; выявление планетарной делимости земной коры и структур, контролирующей эту делимость; изучение геоморфологического строения дна океанов, скрытого многокилометровой толщей воды.

Эти вопросы в настоящее время решаются с помощью линейного анализа. Соответствующие сведения приведены в гл. 9. Рассмотрим результаты изучения рельефа дна океанов по данным радиолокационных измерений их водной поверхности со спутника «Сисат» в 1978 г. На рис. 39 показан фрагмент карты океанического дна для восточного полушария Земли. Чтобы получить эту карту, данные измерения водной поверхности были приложены к единой сетке опорных точек, покрывающих поверхность Мирового океана (около 5 миллионов точек). Используя сложную компьютерную программу цветных графических построений, Б. Хаксби выбрал для каждого такого элемента изображения один из 15 цветов и 256 их оттенков. Многие детали, выявившиеся на карте, были до этого либо вообще неизвестны, либо окончательно не подтверждены.

Например, в Индийском океане к югу от Африки были обнаружены новые подводные горы и зоны разломов. На карте виден Рейкьянес — срединноокеанический хребет, простирающийся к юго-западу от Исландии. Раньше выражались сомнения, действительно ли этот хребет имеет V-образную форму. Карта показывает, что это так и есть.

### Вопросы для самопроверки

1. Как будут выглядеть на черно-белом КС северные и южные склоны средневысокого хребта в аридной климатической зоне?
2. Чем различается фотоизображение районов активных и пассивных надвигов?
3. Какую новую информацию могут внести среднемасштабные КС при наземном крупномасштабном структурно-геоморфологическом картировании?
4. Попробуйте выработать стратегию поиска активных локальных поднятий по космическим изображениям предгорных равнин.

## Глава 9

### ОСОБЕННОСТИ ИЗУЧЕНИЯ ЛИНЕЙНЫХ СТРУКТУР (ЛИНЕАМЕНТОВ) С ПОМОЩЬЮ МАТЕРИАЛОВ КОСМИЧЕСКОГО ЗОНДИРОВАНИЯ

Линейные структуры, или *линеаменты* \*, — широко распространенные геологические объекты. Они дешифрируются на разномасштабных КС и выявляются при анализе топографических, батиметрических, геофизических, сейсмологических и других карт и схем.

#### 9.1. Возникновение и эволюция представлений о линеаментах

Представления о линейных структурах земной коры развиваются примерно с первой трети XIX в. и связаны с именами Эли де Бомона, В. Гопкинса и других геологов, рассматривавших линейные структуры в рамках планетарной трещиноватости. В дальнейшем Л. Бух, А. Добрэ и другие ученые обратили внимание на влияние ортогональных систем разрывов на гидрографический рисунок планеты, а также на ориентировку линейно вытянутых складчатых деформаций. Так, протяженные прямолинейные структурные элементы, дуговые структуры и поперечные (субмеридиональные) элементы Понто-Каспийской области, по Н. И. Андрусову, расположены на выявленных в настоящее время трассах Транскавказского и Урало-Оманского линеаментов. В работах А. П. Карпинского по разломной тектонике земной коры европейской части России показаны строго выдержанные северо-западное и северо-восточное простираения трещиноватости. В конце

\* От лат. *lineamentum* — линия.

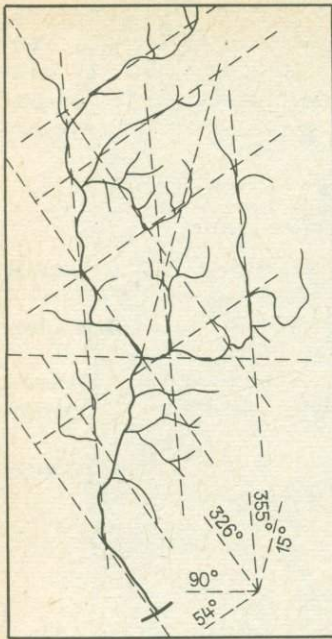


Рис. 40. Гидрографическая сеть, приуроченная к трещинным зонам (линеаментам). По В. Хоббсу.

Рис. 41. Кардинальные линеаменты Европы. По Г. Штилле.



XIX в. М. Бертран развил представления о линейных структурах, пересекающих целые континенты и вдоль которых группируются складчатые или разрывные дислокации и крупные палеогеографические или современные формы рельефа (горные хребты, речные долины, берега морей и т. д.).

Непосредственным «толчком», который помог сформулировать понятие о линеаментах, послужили исследования закономерностей пространственного расположения эпицентров землетрясений на территории Нижней Австрии и Южной Италии, проводимые в конце XIX в. выдающимся австрийским геологом Эдуардом Зюссом: ученый открыл и описал названные им «обычные линии ударов землетрясений», вытягивающиеся по прямым линиям на значительные расстояния.

В работах 1904 и 1911 гг. американский геолог В. Хоббс сформулировал понятие «линеамент» и ввел его в научную геологическую литературу. Под линеаментами В. Хоббс подразумевал гетерогенные образования — границы геологических тел и прямолинейные участки береговой линии моря, ограничения горных массивов и прочие спрямленные элементы ландшафта (например, речные долины) (рис. 40), а также упоминавшиеся «сейсмотектонические линии», выделенные Э. Зюссом.

В настоящее время трудно переоценить значение этого «терминологического открытия» в геологии, потому что оно предложило чрезвычайно простой, доступный и эффективный экспресс-метод

изучения глубинного строения планеты по внешним (поверхностным) признакам.

Д. И. Мушкетов применил понятие *линеамент* для названия сейсмостектонических дислокаций — прямолинейных протяженных уступов, появившихся на склонах Заилийского Алатау в результате Кебинского землетрясения 1911 г.

Г. Штилле дал специальное описание европейских линеаментов, предложил схему «Кардинальные линеаменты Европы» (рис. 41). По мнению Г. Штилле, земную кору, а также прежнюю Мегатею следует считать сильно изборожденной линеаментами, из которых только отдельные в ходе развития Земли активизировались и приобрели особое значение. Он отметил генетическую связь древнего и новейшего линеаментогенеза.

Р. А. Зондер в конце 30-х годов нашего века выявил шесть основных направлений линеаментов Западной Европы, сформулировал понятие *линеаментная тектоника* и наметил круг проблем, решаемых этой отраслью геологии.

Новый качественный скачок в изучении линеаментов и в развитии представлений линеаментной тектоники связан с началом исследования Земли и планет земной группы с помощью методов ДЗ.

Первые же фото- и телеизображения Земли, полученные с космических аппаратов, предоставили специалистам много новой информации о линейных, дуговых и кольцевых геологических объектах. Однако до настоящего времени под линеаментами продолжают понимать самые различные по генезису линейные образования географической среды, геологических структур и геофизических полей. Как показал анализ, проведенный Я. Г. Кацем и А. В. Тевелевым, сложилось несколько пониманий термина «линеамент».

Первое из них восходит к ранним работам Э. Зюсса, А. П. Карпинского, Г. Штилле, Р. Зондера, развивается на современном этапе в работах В. Е. Хаина, В. А. Буша и других исследователей и заключается в признании за линеаментами линий длительно развивающихся разломов, определяющих направление складок, поверхностных разрывов, зон рифтогенеза, цепочек вулканов, эпицентров землетрясений и т. д.

Второе связано с представлением о линеаментах как глубинных, но молодых (позднеплейстоцен-голоценовых) структурах, выраженных на поверхности или разрывами, как считают В. Г. Трифонов, С. С. Шульц, или разрывно-флексурными зонами, как полагают В. И. Макаров и Л. И. Соловьева, при этом часто контролирующими, по сведениям И. К. Волчанской, И. Н. Томсона, М. А. Фаворской и других металлогенистов, металлогеническую зональность.

Третье понимание линеамента содержится в работах Л. М. Расцветаева, П. В. Флоренского, В. С. Милеева, Ю. В. Юнаковской и других геологов. Они придают ему ранг самостоятельной глубинной структуры, выраженной на поверхности земной коры разными типами нарушений, формой и ориентировкой геологических и геоморфологических объектов, а также особенностями строения геофизических полей.

Четвертое сводится к прямолинейным или пологоизогнутым относительно узким высокоградиентным зонам резкого изменения параметров географической среды, геологической структуры и геофизических полей, отражающим, как считают Я. Г. Кац, В. И. Макаров, А. И. Полетаев, Э. Ф. Румянцев, А. В. Тевелев и другие, глубинные неоднородности литосферы.

Отсутствие единства в понимании термина «линеамент» — закономерное и объективное явление современной геологии. Причина этого — отсутствие единства определения изначальной (первичной) природы линеаментов. Линеаменты — это уникальные объекты земной коры, передающие на поверхность Земли достаточно убедительную и объективную информацию о разномасштабных, разновозрастных и разноглубинных неоднородностях земной коры и литосферы, что используется как в геологической теории, так и в практике.

В геологической теории линеаменты, как своеобразные естественные индикаторы глубинной делимости земной коры, могут служить надежным инструментом познания современной геодинамики.

В геологической практике линеаменты могут отражать подводящие каналы различных флюидов и растворов, а значит, служить прямыми индикаторами при прогнозе и поиске месторождений различных полезных ископаемых.

## 9.2. Методы поиска, выявления и изучения линеаментов

В настоящее время в геологии при поиске, выявлении и изучении линеаментов и их систем применяются три группы методов: эвристические, инструментальные и комплексные.

Эвристические методы имеют качественный характер, инструментальные — количественный, в комплексных методах используют и качественные свойства, и количественные характеристики. Эвристические методы связаны с прямым (визуальным) или косвенным (опосредованным) выделением линеаментов соответственно по КС или по геолого-геофизическим материалам.

*Прямое* выделение линеаментов основано на визуальном дешифрировании КС, что обусловлено двумя причинами.

Во-первых, экспериментально установлено, что, хотя повторяемость линеаментов, визуально отдешифрированных разными операторами (см. рис. 14), в некоторых случаях довольно низка и составляет не более 30%, даже и в этих случаях совпадение максимумов густоты линеаментов на картах, составленных разными дешифровщиками, достигает 70%. Отсюда следует, что, несмотря на расхождение в рисовке отдельных линеаментов, общая картина линеаментного поля слабо зависит от субъективности визуального геологического дешифрирования.

Во-вторых, по данным Н. В. Антощенко-Оленева и В. Я. Голды, при современном техническом и математическом обеспечении технология инструментальных методов все еще более дорогая и трудоемкая по сравнению с работой опытных дешифровщиков и не

обеспечивает уверенного выделения линеаментов и других геологических объектов, особенно в районах культивированного ландшафта.

*Косвенное* выделение линеаментов и их систем связано с поиском и трассированием их по данным о пространственном размещении масс Земли, характеризующихся различными параметрами: литологическими (состав и плотность пород); тектоническими (степень раздробленности структуры земной коры, плотность разрывных нарушений и формы делимости, доминирующая кинематика и преобладающие простирания нарушений); геофизическими; сейсмологическими и геохимическими (интенсивность и ориентировка соответствующих полей); гидрогеологическими (степень обводненности, состав и глубина залегания подземных вод); ландшафтными (рисунок гидросети (см. рис. 43), особенности распределения растительного покрова и т. д.).

**Инструментальные методы.** Широкое применение и развитие в изучении линеаментов получили методы машинного (автоматизированного) анализа, т. е. инструментальные методы. В основе автоматизированного картирования линеаментов на КС лежит контрастно-аналоговый подход, позволяющий выделять линеаменты по контрастам фототона независимо от абсолютных значений яркости и контрастов. Получаемая на экране дисплея линеаментная сеть, с целью достижения различной степени генерализации, может изменяться по желанию оператора.

Контрастно-аналоговый подход реализуется путем сравнения яркостей двух соседних пикселей, разделенных третьим. При этом измеренная величина различия приписывается среднему пикселу. Такой анализ проводится по всем направлениям, а поскольку для каждого пикселя в этом случае получается несколько значений, за окончательное принимается максимальное. Числовые результаты, выражающие линии максимальных вариаций, представляются графически как схемы линеаментов. Однако при этом необходимо корректировать результаты для исключения линеаментов искусственного (техногенного или антропогенного) происхождения.

Для максимального исключения субъективного фактора, данные представляют в виде роз-диаграмм или гистограмм простираний линеаментов, в виде карт роз-диаграмм линеаментов или карт удельной длины линеаментов, а также в виде графиков.

Для объективных сопоставлений и корреляций полученных количественных характеристик предложено ввести объемные параметры, например коэффициент глобальной трещиноватости, характеризующий степень линеаментности различных блоков земной коры. В настоящее время разработаны алгоритмы и программы для автоматического выделения линеаментов на КС.

**Комплексирование** разнородных материалов ДЗ, например разносезонных снимков и снимков, выполненных в разных спектральных диапазонах в сочетании с геолого-геофизическими материалами, позволяет получить новую геологическую информацию.

Например, структурный анализ одного из районов юго-восточной Франции был выполнен путем комплексирования КС «Лэндсат»,

тепловых снимков, топографических и гравиметрических карт, записанных в цифровой форме. По имеющимся КС сначала были выделены линеаменты, а затем путем фильтрации по направлениям выделены главные структурные элементы. Аналогичная операция была проведена с линеаменами, выделенными по тепловым снимкам. Пространственное сопоставление выделенных линеаментов позволило отделить поверхностные нарушения от глубинных. Пространственная корреляция линеаментов с гравитационными аномалиями (или ступенями) позволила выделить нарушения, пересекающие фундамент. Полученные данные были использованы для построения модели геодинамической эволюции региона.

Взаимодополняемость этих методов в настоящее время привела к появлению *интерактивного* метода, т. е. человеко-машинного преобразования изображений, позволяющего за счет повышения контрастности или иных способов обработки КС увеличить полноту, достоверность и точность визуального дешифрирования линеаментов и их систем. Для этих же целей используются методы создания синтезированных или комбинированных изображений из снимков, полученных разными приборами. Работы по автоматизированной обработке изображений в диалоговом режиме существенно повысили надежность выделения линеаментов.

Кроме перечисленных методов в последние годы успешно развивается системный подход и используется тренд-анализ.

### 9.3. Морфология, строение и элементы классификации линеаментов

Вопросы морфологии, строения и классификации линеаментов и их систем тесно взаимосвязаны и практически неотделимы друг от друга.

О. М. Борисов и А. К. Глух показали, что линеаменты обладают самой различной морфологией: линейной, дугообразной, волнистой, полигональной (зигзагообразной). Во внутреннем строении линеаментов эти исследователи выделяют следующие элементы:

*контур* — внешняя граница, выраженная относительно резкой сменой типа ландшафта, рельефа и структурно-геологических элементов;

*центральная зона (эндоструктура)* — полоса, заключенная между двумя контурами и выраженная положительными или отрицательными элементами рельефа;

*структурная линия* — линия, условно проведенная по середине центральной зоны по земной поверхности;

*плоскость* — плоскость, проведенная по падению центральной зоны линеамента вдоль структурной линии.

Полезно выделять *обрамление* того или иного линеамента, что значительно облегчит анализ, изучение и описание соотношений линеамента и окружающих его структур. Приведенные элементы могут дополняться наблюдениями о специфических изменениях вдоль простирания линеаментов таких, как: знакопеременные шар-

нирные движения крыльев; различия в составе, мощности и возрасте примыкающих к линеаменту геологических формаций; в доминирующих простираниях разрывных и складчатых структур внутри линеамента (или его зоны) и его (или ее) крыльев; в преобладании тех или иных кинематических типов линеаментов (или разрывов) внутри выделенного линеамента (или его зоны) и в его (ее) крыльях; в удельной плотности разрывных нарушений, магматических тел или эпицентров землетрясений внутри выделенного линеамента или его зоны и в структурах обрамления.

В качестве примера приведем схемы строения трансконтинентальных линеаментов Евразии — Транскавказского (рис. 42), Турано-Гималайского линеаментов и линии Карпинского, опубликованных в работе В. А. Буша.

В вопросах классификации линеаментов и их систем нет единого мнения, а предложенные в литературе схемы типизации, как правило, касаются лишь некоторых их особенностей. Так, О. М. Борисов и А. К. Глух подразделяют их по номенклатуре, протяженности, ширине, степени организации, особенностям пространственной ориентировки и другим признакам, например, по глубине заложения: коровые (экзогенные) и мантийные (эндогенные); по степени четкости изображения линеаментов на КС — достоверные и предполагаемые; по степени трассирования (прослеживания) — прерывистые и непрерывные.

По протяженности линеаменты и их системы делятся на локальные, региональные, трансрегиональные и глобальные.

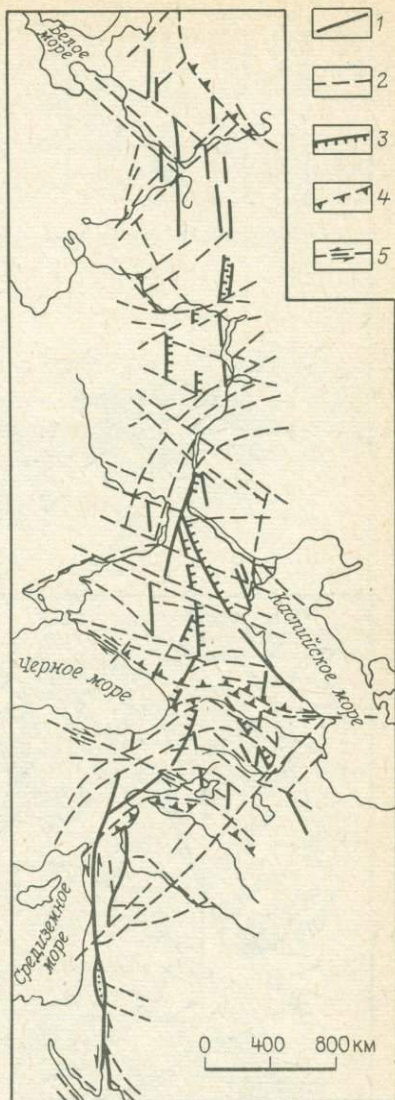


Рис. 42. Строение Транскавказского линеамента (линия Шатского) по данным дешифрирования КС. По В. А. Бушу:

1 — линейные структуры на КС, составляющие трансконтинентальный линеамент; 2 — прочие линейные структуры по данным дешифрирования; 3—5 — морфологические особенности разрывных нарушений по геологическим данным и данным дешифрирования: 3 — сбросы, раздвиги, 4 — надвиги, шарьяжи, 5 — сдвиги

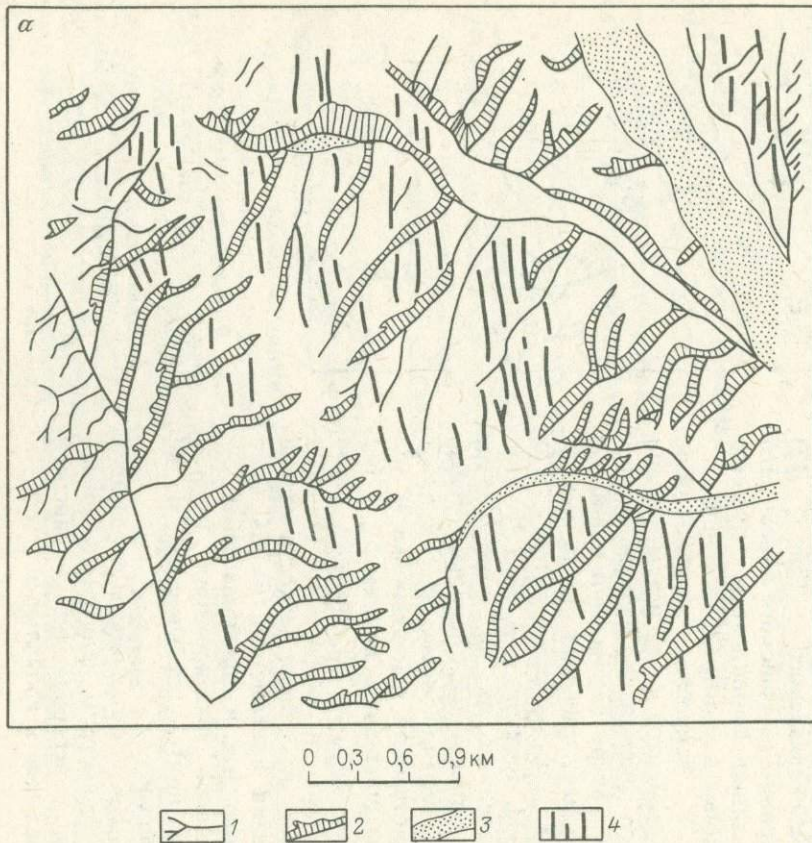
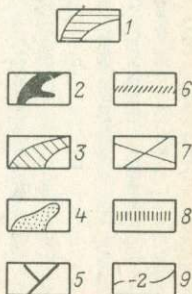
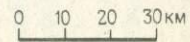
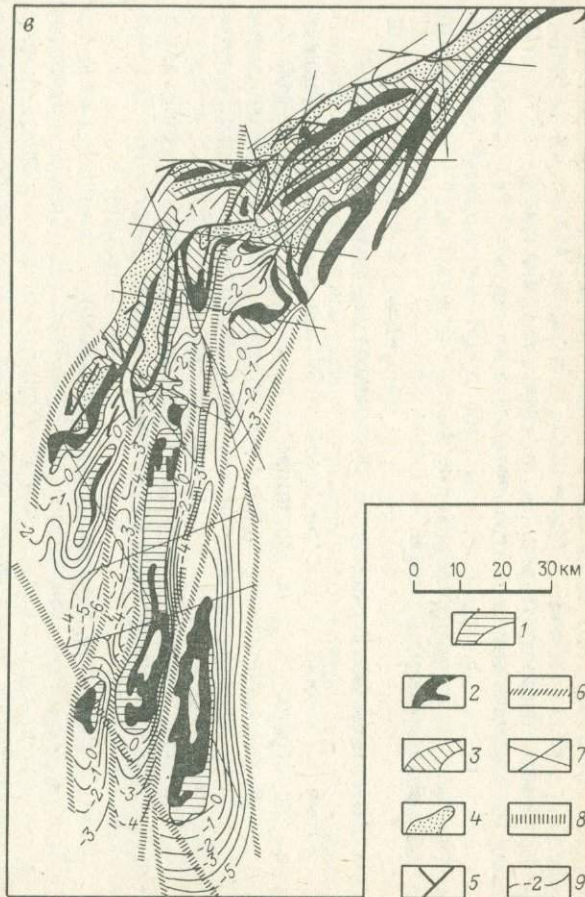
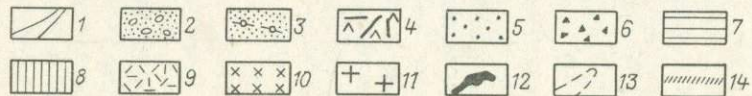
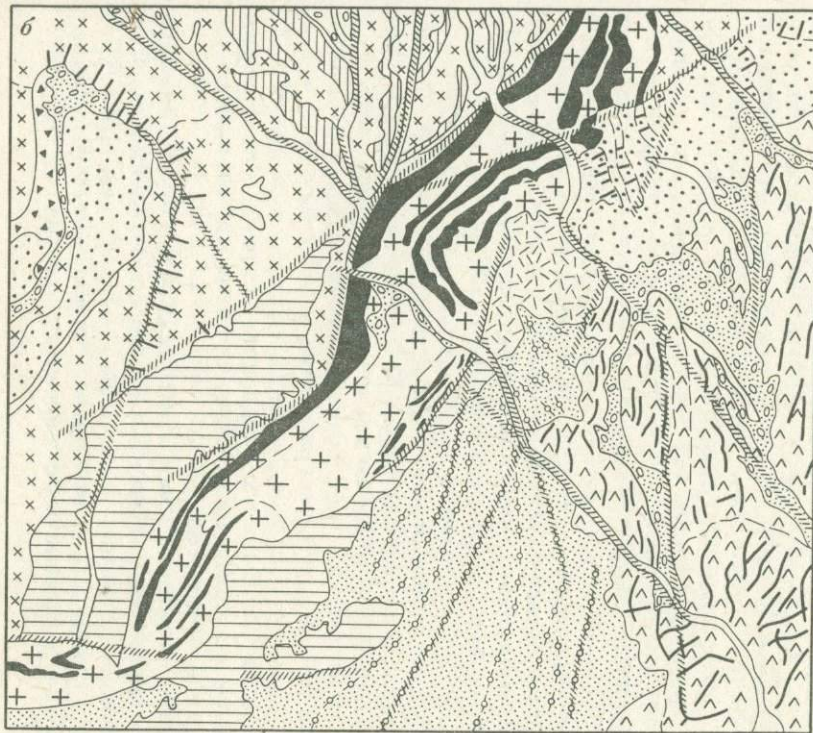


Рис. 43. Классы линейментов, выявляемых на КС:

*a* — малые линейные элементы рельефа (северо-западная часть Сурхандарьинской впадины): 1—3 — эрозионная сеть (1 — сухие русла, 2 — крутые склоны долин, 3 — разработанные днища долин); 4 — упорядоченные эрозионные понижения, генерализующиеся на КС в виде тонкой параллельной полосчатости; *b* — крупные линейные элементы ландшафта района Боянгоринской антиклинали (Западный Тянь-Шань): 1 — эрозионные понижения, 2—4 — частные плоские водоразделы с чехлом среднечетвертичных отложений (2 — пролювиально-аллювиальных, 3 — пролювиальных, 4 — лёссовых); 5 — останцы водораздельной поверхности; 6—9 — пологие поверхности, преимущественно денудационные; 10—11 — площади преимущественно эрозионного рельефа; 12 — селективно-денудационные формы рельефа; 13 — границы участков с различными рисунками эрозионного расчленения; 14 — крупные линейные элементы рельефа и геологической структуры; *в* — локальные и региональные линейные зоны Обигармского антиклинория: 1—4 — домолассовые отложения (1 — эоцен, 2 — палеоцен, 3 — верхний мел, 4 — нижний мел), 5—6 — разрывы (5 — по геологическим, 6 — по геофизическим данным), 7—8 — линейные зоны (7 — локальные, 8 — региональные), 9 — изогипсы поверхности палеоцена



Указанная систематизация не может считаться всеобъемлющей, так как в ней заложен собирательный, а не генетический принцип.

Стремительное наращивание фактического материала по различным параметрам линеаментов позволяет надеяться, что имеющиеся попытки систематизации линеаментов будут непрерывно совершенствоваться, что послужит в конце концов основой для генетической классификации линеаментов.

#### 9.4. Линеаментные сообщества: зоны, системы, поля, рисунки

Одна из особенностей распределения линеаментов в геологическом пространстве — их «групповое», а не «единичное» распространение, причем строго упорядоченное. Наличие определенного ритма или «шага» между линеаментами одного порядка и возможные вариации этого шага могут определяться мощностью и составом земной коры, различной ориентировкой линеаментов, принадлежностью их к разным тектоническим эпохам и различным геологическим областям.

Уже в прошлом веке А. Добрэ использовал принцип равноудаленности элементов геологической структуры. В. Хоббс исследовал данное явление и показал, что в восточных районах Северной Америки характерные расстояния между разломами северо-восточного, северо-западного и меридионального простираний составляют соответственно 125, 75 и 40 миль. Дальнейшее накопление эмпирических данных неоднократно приводило исследователей к подтверждению наблюдаемой закономерности постоянства расстояний — *эквидистантности* — между линейными нарушениями земной коры — разрывами, трещинами и линеаментами. Чехословацкий геолог В. Немец предложил формулу дискретности геологических структур:  $V_x = 2^{-x}D$ , где  $V$  — расстояние между линеаментами (трещинами или разрывами),  $x$  — порядок структуры,  $D$  — диаметр Земли.

Наряду с этим описаны многочисленные факты сгущения (концентрации) линеаментов одного ранга в протяженные непрерывные или прерывистые зоны, с резким уменьшением шага между линеаментами.

Так, в одном из последних обобщений Я. Г. Кац и А. В. Тевелев показали, что линеаменты, выделяемые на КС, являются структурами разного ранга, но в целом образуют непрерывные ряды, в которых по величине объектов, их выраженности в ландшафте и способу проявления на космических изображениях можно выделить четыре класса.

1. Малые линейные элементы ландшафта — природные образования, выраженные на среднемасштабных КС тонкой, обычно параллельной штриховкой (рис. 43, а).

2. Крупные линейные элементы ландшафта — протяженные (первые километры — первые десятки километров) линейные элементы геологической структуры и рельефа, которые дешифрируются на КС в виде прямых или почти прямых непрерывных однородных линий полосового или граничного характера (см. рис. 43, б).

3. Локальные линейные зоны — протяженные (десятки — первые сотни километров) структуры, состоящие из более мелких линейных элементов, пересекающие сразу несколько тектонических структур и заметно влияющие на геологическое строение вмещающих структур (см. рис. 43, в).

4. Региональные линейные зоны — наиболее протяженные объекты дешифрирования (длиной сотни — первые тысячи километров и шириной десятки километров) (см. рис. 43, в).

Среди линеаментных сообществ выделяют: а) зоны регионального значения, б) мегазоны трансрегионального ранга, в) глобальные линеаментные пояса.

Различные пространственные сочетания линеаментов образуют пространственные сообщества: 1) зоны, т. е. узкие протяженные концентрации линеаментов; 2) системы, образованные совокупностью субпараллельных линеаментных зон; 3) поля, возникающие в результате закономерного сочетания разноориентированных линеаментных систем региона и потому характеризующиеся перекрестным структурным планом.

Линеаментные поля различаются степенью плотности (или густоты) линеаментов и их упорядоченности, доминирующими и подчиненными простираниями, морфологией линеаментных зон и наличием аномальных простираний, пространственным взаимоотношением линеаментов между собой, а также их соотношением с генеральными простираниями разрывных и складчатых структур региона и т. д.

Разнообразные сочетания отдельных линеаментов и их систем создают определенный графический (геометрический) образ, который по аналогии со структурным рисунком земной коры можно именовать *линеаментным рисунком* — Т-, У-, Х-образным, ромбовидным и т. д.

Линеаменты и их сообщества могут служить достаточно объективной характеристикой дискретности земной коры. Наиболее информативны параметры линеаментного рисунка и линеаментного поля, так как первый дает представление об основных направлениях и «шаге» дискретности, а второе характеризует степень дискретности и форму делимости глубинных уровней земной коры. По косвенным кинематическим характеристикам линеаментов можно построить геодинамические модели глубинных частей земной коры (рис. 44).

## 9.5. Методы интерпретации линеаментов и их систем

Процесс интерпретации выявленных на КС линеаментов и их систем тесно связан с процессом поиска, выявления и изучения самих объектов и обусловлен целями интерпретации, степенью изученности исследуемого региона и профессиональной подготовкой оператора.

Наметилось несколько подходов к процессу интерпретации линеаментов и их систем.

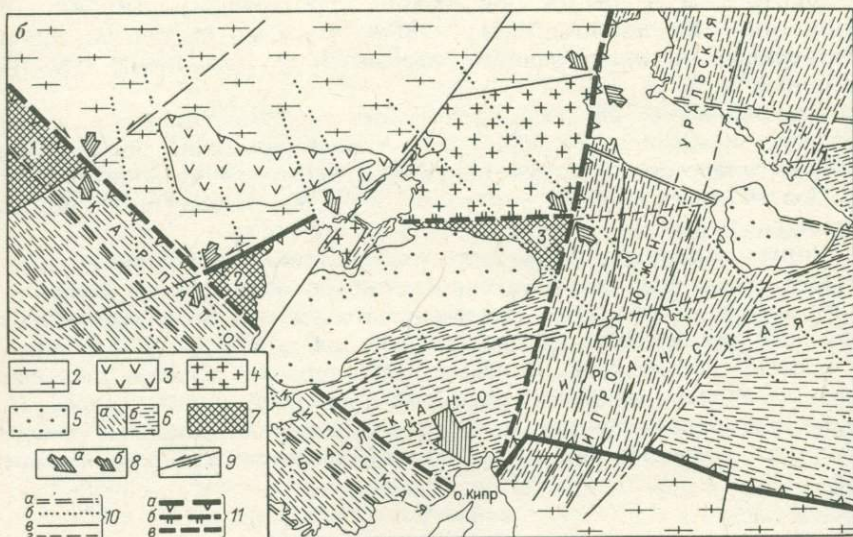
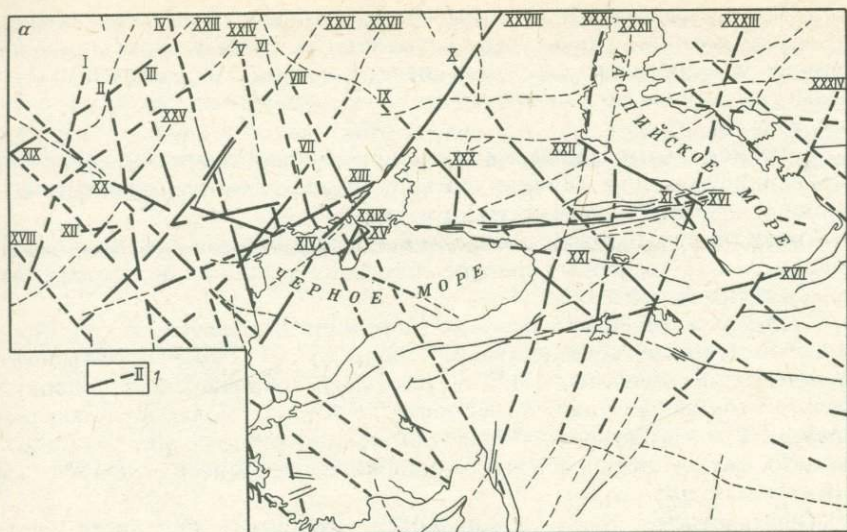


Рис. 44. Основные линеаменты (а) и геодинамическая модель (б) зоны сочленения Восточно-Европейской платформы и Карпатского, Крымского и Кавказского фрагментов Средиземноморского горно-складчатого пояса:

1 — линеаменты и их номера (см. табл. 7), 2 — древние платформы; 3 — Украинский кристаллический щит; 4 — Скифская плита; 5 — глубоководные морские впадины; 6 — линеаментные зоны (а — поперечные, б — продольные); 7 — выступы фундамента: Висленский (1), Дунайский (2), Рионский (3); 8 — направления сжатия (а — общие, б — локальные); 9 — разрывы и направления смещения по ним; 10 — простирание линеаментов (а — северо-западное, б — субмеридиональное, в — северо-восточное, г — субширотное), 11 — границы (а — древних платформ, б — Скифской плиты, в — выступов фундамента)

*Сравнительный* — прямое пространственное сопоставление единичных линеаментов, их систем или полей (карт) с известными геологическими, геофизическими, сейсмическими и прочими материалами.

*Статистический* — систематизация отдельных линеаментов по каким-либо параметрам, а затем геологическая интерпретация не самих линеаментов, а параметров линеаментных сетей.

*Собственно геологический* — выяснение причин, порождающих образование и развитие упорядоченных систем крупных линейных элементов ландшафта, рассматриваемых как природные, а не фотометрические объекты.

Первые два подхода широко развиты в современной линеаментологии: первый, как один из самых простых и доступных, используется всеми поколениями линеаментологов, второй — получил широкое применение в связи с компьютеризацией геологических исследований. Третий подход, как это ни парадоксально, еще ждет своего развития, поэтому рассмотрим его подробнее.

Исследования, выполненные Я. Г. Кацем и А. В. Тевелевым, показали, что ранговая соподчиненность линеаментов как бы предопределяет особенности их геологической интерпретации. Так, малые линейные элементы ландшафта, выраженные на КС тонкой параллельной штриховкой (см. рис. 43, а), интерпретируются как своеобразный линеаментный снимок структуры поля напряжений, что открывает большие перспективы дальнейшего изучения последнего.

Крупные линейные элементы ландшафта (см. рис. 43, б) рассматриваются как отражение локальных неоднородностей приповерхностных горизонтов земной коры.

Локальные линейные зоны (см. рис. 43, в) отвечают ослабленным зонам приповерхностных горизонтов земной коры, разделяющим относительно однородно деформированные блоки и обладающим в большинстве случаев четкой динамической специализацией.

Региональные линейные зоны (см. рис. 43, г) рассматриваются как отражение зон глубинной концентрации напряжений, в которых реализуются современные глубинные движения разного типа.

Следует помнить, что не только любой, отдельно взятый (примененный) подход, но даже их комплексное применение не гарантирует получения однозначного и бесспорного результата интерпретации, тем более не гарантирует однозначного восприятия полученного результата исследователями разных школ, направлений, специализации и квалификации.

Достоверность процесса интерпретации определяется сопоставлением вновь обнаруженного линеамента со всем комплексом имеющихся данных о геологическом развитии, современной структуре и физических свойствах региона. Отсюда следует необходимость постоянного сбора и обновления собранного комплекса (банка) фактических данных, качественная или количественная корреляция которых с обнаруженным на КС линеаментом (или системой линеаментов) и поможет установить генезис, глубину и возраст зало-

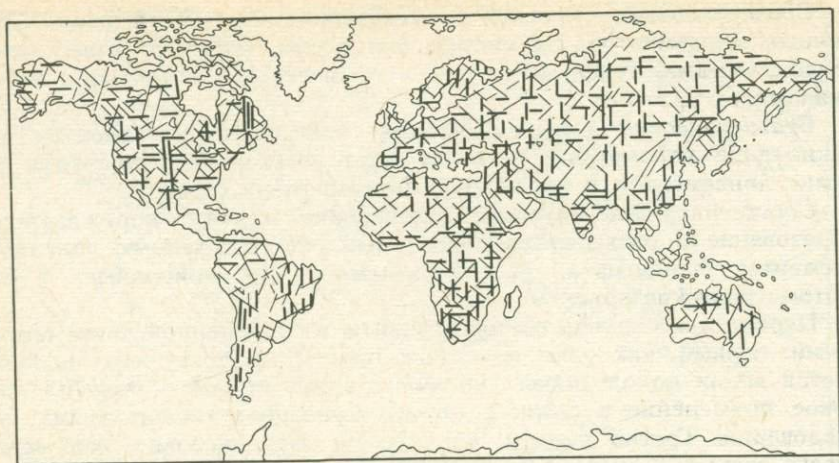


Рис. 45. Линеamentное поле континентов Мира (составлено по результатам дешифрирования КС и анализа мелкомасштабных топографических основ).

Линеаменты ортогональной системы показаны жирными линиями, диагональной — тонкими

жения, а иногда и возраст активизации (омоложения) той глубинной неоднородности земной коры, следом которой на земной поверхности и является обнаруженный линеамент.

### 9.6. Линеamentная тектоника платформенных областей \*

Древние платформы Евразии рассечены густой сетью линеаментов, четко дешифрирующихся по комплексу МДЗ (рис. 45).

Особенности линеamentного поля (ЛП) Восточно-Европейской платформы (рис. 46) заключены в том, что:

1) линеаменты северо-западного простирания наиболее четко, по данным С. И. Стрельникова, проявлены на КС региона. Они имеют постоянный шаг 75—100 км, который отражает параллельную глубинную делимость земной коры, предопределившую развитие древних трогов и глубинных разломов;

2) субширотные линеаменты, рассекая платформу с шагом 500—750 км, контролируют, по данным Д. М. Трофимова, структуры фундамента и характеризуются сдвиговыми смещениями;

3) субмеридиональные линеаменты ограничивают узкие (до 200 км) клиновидные зоны (см. рис. 46), отражающиеся в строении поверхности Мохоровичича и часто выходящие далеко за пределы региона. Например, Кавказско-Рыбинская, намеченная ранее Н. С. Шатским как Транскавказский линеамент; Мраморноморско-Ладожская, представляющая, вероятно, северный отрезок Норгидо-Нигерийской зоны, выделенная В. Е. Хаиным;

4) линеаменты северо-западного простирания образуют (ограничивают) чередующиеся зоны — широкие (500—700 км, на-

\* При написании раздела использованы материалы В. А. Буша, В. В. Козлова, В. И. Макарова, Л. М. Расцветаева, Д. М. Трофимова и др.

пример, Эгейско-Северо-Уральская) и узкие (до 15 км, Кавказско-Среднеуральская), играющие значительную роль в современном геодинамическом режиме территории, так как служат иногда зонами затухания сейсмических колебаний.

Восточно-Сибирская платформа также характеризуется интенсивно развитым линеamentным полем, образованным линеamentами ортогональной (О) и диагональной (Д) систем (см. рис. 45).

При дешифрировании телевизионных и сканерных мелкомасштабных КС уверенно выделены краевые, трансрегиональные и региональные линеamentы.

Геофизическая интерпретация линеamentного рисунка Восточно-Сибирской платформы позволяет предположить, что краевые, трансрегиональные и крупнейшие региональные линеamentные зоны отражают наиболее глубокие нижнекоровые и верхнемантийные

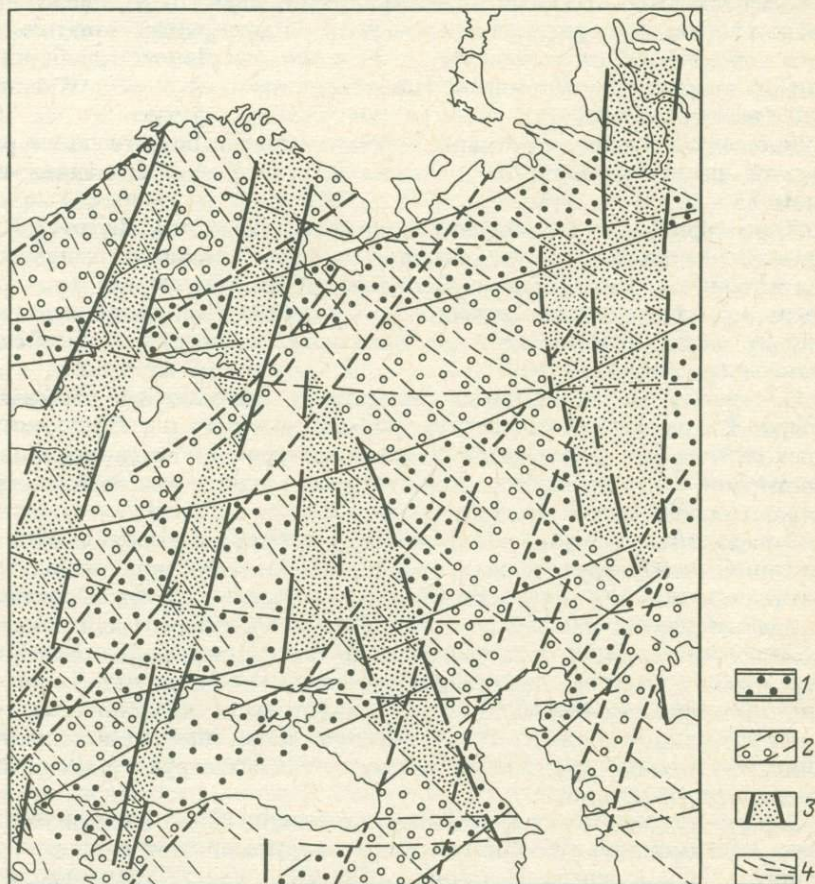


Рис. 46. Линеamentные зоны Восточно-Европейской платформы (по результатам дешифрирования КС и анализа топооснов):

1 — субширотные, 2 — северо-восточные, 3 — субмеридиональные, 4 — северо-западные

неоднородности, а линеаменты меньшей протяженности — тектонические нарушения.

Очень приблизительно, по взаимоотношению линеаментов с известными геологическими структурами, может быть определен возраст линеаментов и их зон: наиболее древние — линеаменты О-системы — субмеридиональные отражают нарушения архея — нижнего протерозоя; широтные — дислокации позднего протерозоя — нижнего палеозоя; линеаменты Д-системы более молодые, они отражают нарушения, связанные с проявлением раннетриасового траппового магматизма и более поздними геологическими процессами. При этом для всех линеаментов и их зон присуща неотектоническая активизация, благодаря чему они четко проявляются и в ландшафте, и на КС.

Линеаментный рисунок Восточно-Сибирской платформы резко осложняется аномальными простираниями двух пар линеаментов северо-западного простирания: первая трассируется по линии Чита — Сергеево (на р. Енисей) — Брусово (на Западно-Сибирской плите); вторая — г. Норильск (на северо-западе) — пос. Крестовский (на юго-востоке).

Аномальные линеаментопары пересекаются на широте пос. Крестовский, раскрываясь таким образом на запад — северо-запад под углом 25—30°.

Характерно, что аномальные линеаментные зоны Восточно-Сибирской платформы «встречаются» с аналогичными аномальными простираниями линеаментов Западно-Сибирской плиты (но уже северо-восточного простирания) на отрезке протяженностью до 1000 км между р. Подкаменной Тунгуской (на юге) и Енисейским заливом (на севере).

С переходом на соседние территории аномальные линеаментопары Восточно-Сибирской платформы, равно как и Западно-Сибирской плиты, или полностью совпадают с доминирующими простираниями линеаментов, или «гасятся», теряя свое четкое отражение в особенностях ландшафта.

Линеаменты Восточно-Сибирской платформы проявляются в глубинной структуре региона, контролируют простирание внутриплатформенных структур, например Байкальской рифтовой системы, и пролонгируются на смежные территории континента и в пределы смежных акваторий. Так, в пределы акватории моря Лаптевых трассируются линеаменты северо-восточного (таймырского) простирания, а в пределы Карского моря — практически перпендикулярные к ним линеаменты северо-западного, т. е. антитаймырского, простирания, что лишний раз свидетельствует о тесных структурных связях континентов и океанов.

**Северо-Американская платформа** рассечена аналогичными системами линеаментов субмеридионального, субширотного, северо-западного (320°) и северо-восточного (25—30 и 40—50°) простираний, четко дешифрирующимися по КС (см. рис. 45).

Средний линеаментный шаг Северо-Американской платформы превышает аналогичный параметр Восточно-Европейской и Восточно-

Сибирской платформ и равен 250—300 км. Формы делимости, образованные в результате пересечения ортогональных и диагональных линеаментов, также имеют треугольные, квадратные, прямоугольные, трапециевидные, ромбовидные и другие очертания. Например, в четкий ромб размером 500 км по широте и до 1500 км по долготе вписываются Восточно-Скалистые горы вместе с массивом Колорадо.

Для Северо-Американской платформы также характерен переход континентальных линеаментов в нарушения морского (или океанического) дна. Примером служат нарушения дна Тихого океана, выраженные субширотно ориентированными разломами Мендосино и Меррей, продолжение которых «просвечивается» через мощный складчатый чехол Северо-Американских Кордильер, имеющих северо-западное, т. е. поперечное, простирание.

Подводя краткий итог рассмотрению линеаментных полей древних платформ Лавразии, следует отметить, что они характеризуются относительно выдержанными соотношениями линеаментов О- и Д-систем и сходным рисунком делимости земной коры. Необходимо отметить единство субширотных линеаментов, трассирующихся с шагом 500 км по северу перечисленных платформ от Гудзонова залива и Аляски через Северо-Восток СССР и Восточную Сибирь и далее, просвечиваясь под Уральским горноскладчатым поясом, в пределы севера европейской части СССР и Скандинавии.

Однако при общей сходимости линеаментного рисунка реализация делимости земной коры изученных платформ имеет и некоторые особенности, связанные с доминированием одних и редукцией других простираний линеаментов, в степени упорядоченности линеаментов в зоны, в количественных параметрах делимости (ширина шага делимости по разным системам линеаментов), и, наконец, в появлении аномальных простираний линеаментов, осложняющих основной рисунок делимости. Это, вероятно, является следствием, во-первых, разной реакции крупных жестких блоков земной коры, каковыми являются рассмотренные платформы, на «контактное» динамическое взаимодействие между собой; во-вторых, разной реакции на это контактное взаимодействие крупных блоков более мелких внутриплатформенных блоков; в-третьих, разной реакции различающегося по физическим параметрам вещества, слагающего как мелкие внутриплатформенные блоки, так и платформы в целом.

Дешифрирование КС древних платформ Гондваны выявило густую, ритмично повторяющуюся в пространстве сеть линеаментов. Рисунок линеаментного поля Африканской платформы (см. рис. 45) образован пересечением ортогональных и диагональных (северо-западных —  $310\text{--}315^\circ$  и северо-восточных —  $30^\circ$ ) нарушений. Конкретные формы делимости, возникающие в результате пространственных соотношений О- и Д-линеаментов, самые разнообразные — треугольные, квадратные, прямоугольные, параллелограммовидные, трапециевидные, ромбовидные и пр.

Центральная и южная части платформы имеют более частый ритм дробления земной коры по О- и Д-системам линеаментов со средним шагом 150—300 км, а северная, вследствие редуцирования

субширотных и резкого “угнетения” северо-западных линеаментов, характеризуется более редким ритмом дробления с увеличением “шага” до 600 км между линеаментами северо-восточного простирания.

Отдешифрованные на территории Африканской платформы линеаментные системы прослеживаются на смежные структурные элементы Земли: субмеридиональные линеаменты находят продолжение в линеаментах Европы; субширотные — в батилинеаментах Атлантического и Индийского океанов; северо-восточные — в линеаментных системах Аравии, Туркмено-Иранского сегмента, Западно-Сибирской плиты и Восточно-Сибирской платформы (на северо-востоке), в батилинеаментах Атлантического океана (на юго-западе); северо-западные — в линеаментах Пиренейского полуострова и батилинеаментах Атлантического и Индийского океанов.

Сопоставление линеаментов Африканской платформы со схемами геологического строения показывает, что линеаментное поле этого региона имело сложный и длительный путь развития.

На современном этапе активизированы практически все составляющие линеаментного поля Африканской платформы — и ортогональной, и диагональной систем, так как к трассам линеаментов и их систем приурочены практически все элементы рельефа региона — долины рек Нигера, Нила, Конго, Замбези и других, очертания береговой линии Атлантического и Индийского побережий Африки, границы хребтов и равнин, периокеанических и внутриконтинентальных впадин и т. д. Но наиболее оживленной может, вероятно, считаться Калахари-Руб-эль-Халийская линеаментная система, характеризующаяся высокой плотностью эпицентров землетрясений, ареалами новейшего вулканизма и высоким градиентом неотектонических движений.

Все эти факты свидетельствуют о значительной «транзитности» линеаментов и их систем не только в геологическом пространстве, но и в геологическом времени.

Уже само ограничение Индостанского клина предопределено линеаментами субмеридионального (западное ограничение) и северо-восточного (юго-восточное ограничение) простираний. Дешифрирование космических снимков системы «Лэндсат» показало широкое развитие в пределах Индостанской платформы линеаментов различных порядков и простираний (см. рис. 45). Сопоставление схемы линеаментов и геологического строения региона показало, что на КС четко отражены как продольные линеаменты, согласные с простиранием складчатых поясов метаморфических пород, так и поперечные (или диагональные). В целом линеаментный рисунок Индостанской платформы образован линеаментами О- и Д-систем, выявляемых и при дешифрировании разномасштабных топографических основ. Характерно, что с простиранием космолинеаментов совпадают простирания различных типов нарушений земной коры — разломы (Тингини), зоны скалывания (Ингольда) и трещиноватости (Кальяри), которые являются одновременно и рудовмещающими зонами. Характерные особенности линеаментного поля Индостана:

четкое продолжение практически всех крупных континентальных линеаментов (Индского, Нармадского, Гадаврийского и др.) в батилинеаментах дна Аравийского моря и Бенгальского залива; значительная пролонгируемость его составляющих на смежные регионы Земли: линеаменты субширотного простирания прослеживаются далеко и на запад (вплоть до Сахарской плиты) и на восток (в пределы Индокитая); линеаменты северо-западного простирания трассируются вплоть до Балтийского щита (на северо-западе) и Австралийской платформы (на юго-востоке); линеаменты северо-восточного простирания, особенно на трассе Индского, следятся далеко на северо-восток в пределы Восточно-Сибирской платформы; угнетенность линеаментов субмеридионального простирания на территории собственно Индостанской платформы и широкое их развитие по ее западному (Урало-Оманская линеаментная система) и восточному (Таймыро-Индостанская линеаментная система) ограничениям.

В целом линеаментное поле Индостанской платформы свидетельствует об интенсивной глубинной делимости земной коры региона и о структурных (глубинных) связях Индостанской платформы, расположенной как бы в центре Восточного полушария Земли, с соседними структурами Африки, Евразии и Австралии.

Дешифрирование разномасштабных КС отдельных участков Австралийской платформы (см. рис. 45) выявило напряженную линеаментную тектонику Австралийской платформы, рассеченной не только диагональными, но и ортогональными линеаментами.

Субмеридионально ориентированные линеаменты, пересекающие территорию платформы с шагом 100—300 км, совпадают с простиранием наиболее древних тектонических элементов: восточной границы древней платформы и обрамляющих ее с востока складчатых систем байкалитид, каледонид и герцинитид. В пределах собственно платформы субмеридиональные линеаменты совпадают с простираниями выступов архейского фундамента, что свидетельствует о древности линеаментов субмеридионального простирания.

Наиболее контрастно субмеридиональные линеаменты выражены в структурах дна океана, например, линеамент на меридиане порта Аделаида следится далеко на юг в виде четко выраженного батилинеамента.

Субширотно ориентированные линеаменты развиты значительно слабее: наиболее четко они трассируются на границе Большой пустыни Виктории и равнины Налларбор на юге Австралии и на северной границе равнины Нового Уэльса и субширотного «колена» Большого Водораздельного хребта на широте оз. Эйр.

Диагональные линеаменты четко выявляются при дешифрировании КС по спрямленным элементам рельефа: долинам рек, океаническим побережьям, границам равнин и хребтов и т. д. Интересно, что, не очень ярко прослеживаясь в структурах океанического дна, линеаменты северо-западного простирания как бы «выныривают» на Индостанской платформе, чтобы потом, практически непрерывно, трассироваться через Туркмено-Иранский, Тавро-Кавказский и Кар-

пато-Балканский сегменты альпийского складчатого пояса Евразии вплоть до Балтийского щита Восточно-Европейской платформы.

Взаимное пересечение линеаментов северо-восточного и северо-западного простираний (с шагом 150—200 км) образует четко выраженную ромбоидальную делимость земной коры Австралийской платформы. В некоторые ромбы делимости «вписываются» отдельные глыбы древних (архейских) пород и разделяющих их зеленокаменных поясов, например в районе Пилбара Западной Австралии.

Молодые платформы Евразии, в силу их высокой геологической изученности и наличия материалов космических съемок, а также топографических, геофизических и других, служат наиболее оптимальными объектами Евразии для изучения особенностей линеаментной тектоники.

Линеаментный рисунок **Скифской плиты**, расположенной в зоне сочленения древней Восточно-Европейской платформы и молодого Средиземноморского складчатого пояса, характеризуется преобладанием линеаментов О-системы. При этом субмеридиональные и субширотные линеаменты коррелируются с докембрийскими структурами.

Основной формой делимости земной коры Скифской плиты являются прямоугольные блоки размером примерно  $50 \times 75$  км, удлинённые по широте и образованные за счет пересечения меридиональных и широтных линеаментов.

Геолого-геофизическая интерпретация линеаментного поля Скифской плиты показывает высокую мобильность земной коры и значительную автономность ее блоков; вероятность сложных горизонтальных перемещений мелких блоков и независимость структурной значимости линеаментов от их протяженности и степени выраженности на КС и в рельефе; тесную связь древних глубинных структур и линеаментов, отдешифрованных на КС; образование основной сети линеаментов за счет горизонтально приложенных тел.

Схема линеаментов **Туранской плиты** (см. рис. 45) почти полностью отражает особенности глубинного строения района, определенного в результате геолого-геофизических исследований. Повидимому, это обусловлено унаследованным развитием основных структур плиты в новейшее время. Наиболее четко выраженная ортогональная система линеаментов отражает морфологию основных структурных форм, обусловленных в основном новейшими тектоническими движениями. Система диагональных линеаментов нередко осложняет строение блоков или является границами структур более высоких порядков.

Сравнение схем грави- и магнитолинеаментов со схемами линеаментов, отдешифрованных на КС и выделенных с помощью морфометрических построений, показало, что последние, отражая новейший структурный план плиты и развитие его в геологическом времени, также коррелируются с элементами глубинного строения и характеризуют геодинамическое состояние региона, определяемое субмеридиональным сжатием и субширотным растяжением.

В геологическом строении **Западно-Сибирской плиты** (см. рис. 45) важную роль играют линеаментные зоны, протягивающиеся на сотни

и тысячи километров и соответствующие зонам глубинных разломов ортогонального и диагонального простираний. На зимних и летних КС серии «Метеор» четко дешифрируются линеаментные зоны субширотного, субмеридионального и северо-восточного простираний.

Линеаментные зоны субширотного простирания соответствуют сравнительно молодым разломам, развивавшимся синхронно с формированием юрско-мелового осадочного чехла, а позднее — в кайнозойе — ограничивавшим блоки, отличавшиеся интенсивностью неотектонических движений. Кроме того, срединная — Березовско-Ванаварская линеаментная зона в период максимального оледенения Западно-Сибирской плиты представляла собой барьер, ограничивший продвижение ледника в южном направлении.

Омско-Игарская линеаментная зона северо-восточного простирания на тектонических картах не показана, хотя и пересекает всю плиту с юго-запада на северо-восток вплоть до Таймырского полуострова, причем юго-западный отрезок зоны (до р. Вах) отвечает южной ветви Уренгойско-Колтогорского грабен-рифта.

В целом на территории Западно-Сибирской плиты дешифрируется по КС большое количество линеаментов преимущественно диагональной системы, часть из которых соответствует разломам фундамента.

По возрасту линеаменты и линеаментные зоны плиты делятся на две группы: древние, заложенные на стадии формирования палеозойского фундамента (Пурско-Гыданская линеаментная зона субмеридионального простирания и многие линеаменты диагональной системы), и молодые, синхронные образованию юрско-мелового осадочного чехла (в основном линеаменты и линеаментные зоны субширотной ориентировки). На неотектоническом этапе практически все линеаменты и линеаментные зоны плиты испытали активизацию, что привело к их четкому отражению в элементах рельефа и ландшафта.

Следует отметить, что аномальные линеаментопары Западно-Сибирской плиты между р. Подкаменной Тунгуской и Енисейским заливом практически под прямым углом пересекаются с аномальными для Восточно-Сибирской платформы двумя линеаментопарами северо-западного простирания ( $300^\circ$ ), описанными ранее.

Не исключено, что взаимно пересекающиеся линеаментопары молодой Западно-Сибирской плиты и древней Восточно-Сибирской платформы отражают сопряженные системы глубинных нарушений земной коры, глубина заложения и структурное значение которых требует дальнейшего исследования.

## 9.7. Линеаментная тектоника складчатых поясов

Уральский складчатый пояс (см. рис. 46), расположенный на границе Русской и Западно-Сибирской плит, характеризуется ярко выраженной линейностью основных структурных зон, ограниченных протяженными глубинными разломами, четко отражающимися в магнитном, гравитационном полях. Отметим, что выраженная в поверх-

ностной геологической структуре линейная субмеридиональная зональность осложнена поперечными направлениями, секущими Уральский пояс в северо-западном, северо-восточном и субширотном направлениях. Поперечные — антиуральские структуры представлены разрывными нарушениями, поднятиями и прогибами, шовными антиклиналями, зонами воздыманий и погружений шарниров продольных складок; к ним приурочены смена фаций и мощностей осадочных отложений, развитие осадочно-вулканогенных и интрузивных формаций, а также различные рудные тела.

Дешифрирование КС позволило выявить определенные закономерности распределения линеаментов Уральского складчатого пояса: 1) наиболее уверенно и четко дешифрируются крупнейшие линеаменты северо-западного и субмеридионального простирания; 2) наиболее четкую постоянную периодичность имеют крупнейшие линеаменты северо-западного простирания; 3) субширотные линеаменты в целом выражены слабее, но также прослеживаются (фрагментарно) на значительные расстояния, особенно на Среднем и на севере Южного Урала.

По данным дешифрирования КС в Уральском поясе выделяется (с севера на юг) четыре зоны: северная (до 64° с. ш.) — с широким развитием крупных и мелких кольцевых структур; Северного Урала — с четко выраженными меридиональными, северо-западными и субширотными трассами линеаментов; Среднего Урала — со слабо выраженными меридиональными линеаментами и широким развитием субширотных линеаментов, дуговых и кольцевых элементов; северная часть Южного Урала — с четко выраженным полосчатым рисунком, отражающим основные простирания структур Башкирского антиклинория.

Деление Уральского пояса на четыре части (сегмента) в целом отвечает блоковому строению земной коры региона, установленному по геофизическим данным, и подтверждается интенсивностью новейших движений выделенных частей.

Следует особо отметить четкость проявления линеаментного рисунка Уральского пояса в элементах рельефа: речные долины самых разных порядков с удивительным постоянством (и в горной Уральской части и в смежных равнинных частях Русской и Западно-Сибирской плит) приурочиваются к трассам линеаментов.

В схеме линеаментной тектоники Средиземноморского складчатого пояса (см. рис. 44, 45, табл. 7) учтены результаты дешифрирования КС, выполненного Б. Бижу-Дювалем, В. А. Бушем, А. С. Караханяном, Л. М. Расцветаевым, В. З. Сахатовым, С. Шановым и многими другими исследователями.

При дешифрировании разномасштабных КС выявлены широко развитые на территории пояса линеаменты трех систем простираний — продольные, поперечные и диагональные.

Линеаменты продольной системы простираются согласно основным направлениям региональных структур складчатого пояса и наиболее ярко прослеживаются на границе пояса и смежных платформ (например, Предкопетдагский линеамент), но могут трассиро-

## Линеаменты Средиземноморского (альпийского) горно-складчатого пояса

Фрагменты пояса	Ортогональные							Диагональные								
	Субмеридиональные	М*	Г	С	Субширотные	М	Г	С	Северо-западные	М	Г	С	Северо-восточные	М	Г	С
Карпатский	(I) Западно-Пайнносский	—	—	—	(XII) Мукачешо-Сорочинский	+	—	—	(XVIII) Вена-Белградский	—	—	—	(XXIII) Вена-Варшавский	+	+	—
	(II) Клуз-Самбор-Брестский	+	—	—	(XIII) Клуз-Одесский	+	—	—	(XIX) Острава-Бурский	—	—	—	(XXIV) Брно-Брестский	+	+	—
	(III) Буззу-Бродский	+	—	—					(XX) Варшава-Констанцкий	+	—	—	(XXV) Мукачешо-Ровненский	+	—	—
	(IV) Констанца-Винницкий	—	+	—									(XXVI) Клуз-Курский	+	+	—
	(V) Одесса-Белоцерковский	+	+	—									(XXVII) Крайова-Тираспольский	+	—	+
Крымский	(VI) Западно-Крымский	+	+	+	(XIV) Каркинитско-Сивашский	+	+	—					(XXVIII) Азово-Среднеуральский	+	+	+
	(VII) Центрально-Крымский	—	—	+	(XV) Луккульско-Каменский	—	—	—					(XXIX) Бахчисарай-Нижегорский	—	—	—
	(VIII) Восточно-Крымский	+	—	—												
Кавказский	(IX) Восточно-Черноморский	+	+	+	(XVI) Таманско-Апшеронский	+	+	+	(XXI) Керчь-Кутаисский	+	+	+	(XXX) Сочи-Ставропольский	+	—	+
	(X) Центрально-Кавказский	+	—	—	(XVII) Понтийско-Эльбурский	—	—	+	(XXII) Махачкала-Сумгаитский	+	—	—	(XXXI) Понтийско-Кизлярский	+	+	+
	(XI) Западно-Каспийский	—	+	+									(XXXII) Ван-Аграханский	+	—	—
													(XXXIII) Пальмиро-Апшеронский	—	+	+
													(XXXIV) Решт-Аральский	—	+	+

\* Отражение линеаментов в магнитном поле (М), в гравитационном поле (Г) и по сейсмическим данным (С).

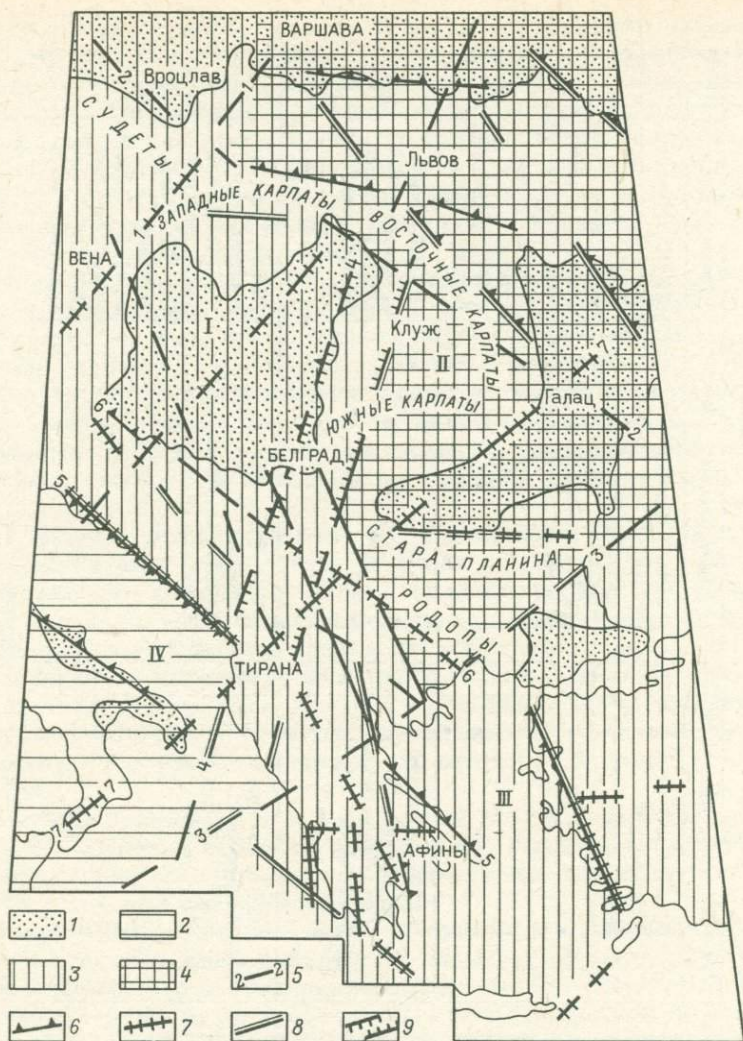


Рис. 47. Линеаментная тектоника Карпато-Балканского региона:

1 — впадины современного рельефа; 2—4 — глубина залегания поверхности Мохоровичича: 2 — 15—45 км, 3 — 25—45 км, 4 — 25—65 км; 5—8 — линеаменты: 5 — выделенные по комплексу данных, 6 — выраженные в градиентах рельефа, 7 — отраженные в сейсмичности, 8 — разделяющие блоки с разной глубиной поверхности Мохоровичича: I — Паинонско-Судетский, II — Карпато-Подольский, III — Мизийско-Родопский, IV — Адриатический; 9 — Тирано-Минская линеаментная зона. Линеаменты: 1 — Вена-Варшавский, 2 — Вроцлав-Галауский, 3 — Лефкас-Халкидики-Тунджа, 4 — Тирано-Львовский, 5 — Истрия-Эвбейский, 6 — Сава-Родопский, 7 — Скутари-Печ-Вранча

ваться и внутри горноскладчатого пояса, отражая процессы продольной деструкции внутри пояса (например, Понтийско-Эльбурская линеаментная зона внутри Кавказского фрагмента пояса).

Линеаменты поперечной системы трассируются под углом, близким к  $90^\circ$ , к простираению региональных структур пояса: как правило,

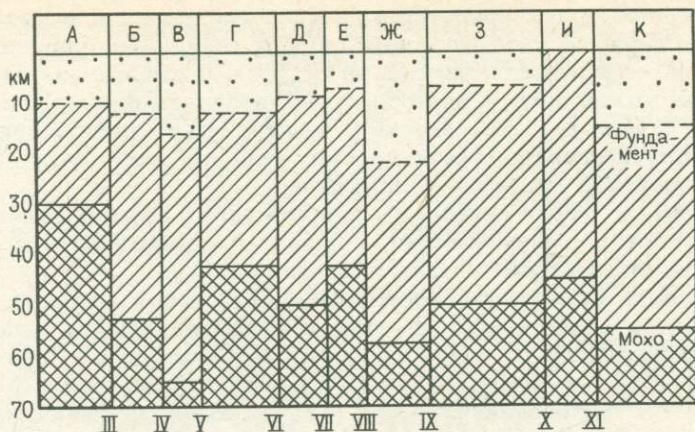


Рис. 48. Отражение линеаментных зон сочленения Восточно-Европейской платформы и Средиземноморского складчатого пояса в глубинной структуре земной коры:

А — Паннонская впадина, Б — Карпаты, В — Предкарпатский прогиб, Г — юго-западный склон Восточно-Европейской платформы, Д — Западный Крым, Е — Центральный Крым, Ж — Восточный Крым, З — северо-запад Большого Кавказа, И — Центральный Кавказ, К — юго-восток Большого Кавказа. Номера линеаментов соответствуют номерам линеаментов в табл. 7 и на рис. 44, а

линеаменты данной системы пролонгируются далеко в «тело» смежной платформы, например Центрально-Крымская или Центрально-Кавказская линеаментные зоны.

Линеаменты диагональной системы пересекают региональные структуры пояса и смежных платформ под косым (острым или тупым) углом по отношению к линии их сочленения и также трассируются далеко на территории платформ, часто являясь трансрегиональными. Например, Центрально-Кавказская линеаментная зона, протягивается через всю смежную Восточно-Европейскую платформу.

Схема линеаментной тектоники Балканского фрагмента Средиземноморского пояса (рис. 47) демонстрирует, что земная кора региона деструктивирована многочисленными скрытыми нарушениями, хорошо отраженными протяженными элементами рельефа, геологической структуры, сейсмического и других геофизических полей, и практически не зафиксированными в виде картируемых геологической съемкой разрывов.

Каркас линеаментного поля региона образован линеаментами ортогональной и диагональной систем и промежуточных простираний.

В целом линеаментный каркас имеет древнее происхождение, связанное с растрескиванием первичной коры, но испытывал перманентное омоложение. В новейшее время наибольшую активизацию испытали линеаменты диагональной системы: северо-восточные и северо-западные, они интенсивно выражены в современном рельефе.

В результате дешифрирования КС Крымского фрагмента Средиземноморского складчатого пояса выявлено множество линеаментов

самой разнообразной ориентировки, в основном дешифрирующихся благодаря спрямленным береговым линиям (например, Каркинитско-Сивашский, Луккульско-Каменский и др.), аномальным ориентировкам овражной сети (Евпаторийско-Криворожский и др.) и спрямленных долин рек (Судакский), межгрядовым понижениям рельефа (Бахчисарайско-Нижнегорский) или по комплексу (Центрально-Крымский линеамент) признаков.

Собственно горно-складчатое сооружение Крыма ограничено двумя крупными линеаментами — Луккульско-Каменским с севера и Бахчисарайско-Нижнегорским с северо-востока.

Отдельные линеаменты, пересекающие Крымский фрагмент, концентрируются в линеаментные зоны субмеридионального простиранья — Западно-, Центрально- и Восточно-Крымскую — протяженностью до 150 км, шириной до 25 км. Они отражаются в рельефе поверхности Мохоровичича (рис. 48) резкими понижениями до 50 км (Западно-Крымская зона) и 60 км (Восточно-Крымская) и горстообразным воздыманием до 40 км (Центрально-Крымская зона), выраженными на космических снимках, в рельефе и подтвержденными различными геофизическими материалами.

Центрально-Крымская линеаментная зона (см. рис. 44) субмеридионального простиранья протягивается по меридиану Алушта-Симферополь и далее на север, разделяя Горный Крым и равнинные пространства Скифской плиты на западную, относительно приподнятую и восточную, относительно опущенную части. К Центрально-Крымской линеаментной зоне приурочены региональный излом простиранья Горного Крыма в районе Симферополя, Симферопольское поднятие, раннемеловой Салгирский грабен, выходы среднеюрских магматических пород, повышенная концентрация трещиноватости и развитие обвалов на западном склоне горы Южная Демерджи. Максимум плотности эпицентров землетрясений Крымского континентального склона также находится на трассе этой крупной линеаментной зоны, еще раз подчеркивая значительную — во времени и в пространстве — геодинамическую подвижность зоны.

В целом ортогональные и диагональные составляющие линеаментного рисунка Горного Крыма и Скифской плиты отражают структурные направления разного возраста заложения. Меридиональные линеаментные зоны представляют собой реликты, возможно омоложенные на орогенном этапе, раннепротерозойского структурного плана, северо-восточные — байкальского и герцинского.

Линеаментный рисунок земной коры Крымского фрагмента принципиально отличается от структурного рисунка имеющихся тектонических карт и схем и демонстрирует интенсивное дробление региона на отдельные блоки, мозаика и контактные взаимоотношения которых, несомненно, влияют на современную геодинамику Горного Крыма и Крымского фрагмента в целом.

Современная структура Кавказского фрагмента альпийского Средиземноморского пояса, как и рассмотренных Карпатского и Крымского фрагментов, возникла на новейшем этапе развития

альпийского пояса Евразии за счет активных сжимающих встречных движений Восточно-Европейской и Африканской платформ.

В геологическом строении и развитии Кавказа значительную роль играли (и играют) продольные и поперечные разломы. На КС Кавказа уверенно опознаются, дешифрируются и оконтуриваются практически все основные региональные структурные элементы благодаря ярким различиям фотоизображений. Кроме того, при дешифрировании КС по комплексу прямых и косвенных признаков выявлены многочисленные линейные образования, которые концентрируются в линеаментные зоны ортогонального и диагонального простираний.

Среди линеаментных зон субмеридионального простирания наиболее четко выделяются в современной структуре региона три (см. рис. 44) — Восточно-Черноморская (или Сочи-Таганрогская), Центрально-Кавказская (или Транскавказская) и Западно-Каспийская. Эти зоны — протяженные (250, 1500 и 600 км соответственно), широкие (75—100, 200 и 100 км), четко дешифрируются на КС, ярко проявляясь благодаря протяженным спрямленным элементам ландшафта, и подтверждаются различными геологическими и геофизическими данными. Субмеридиональные линеаментные зоны Кавказского фрагмента обрамления относятся к ортогональной системе, но по отношению к генеральному простиранию структур Большого Кавказа они являются диагональными.

Среди линеаментных зон субширотного простирания наиболее значительны Таманско-Апшеронская (см. рис. 45) и Понтийско-Эльбурская.

Среди диагональных линеаментных зон наиболее четко развиты зоны северо-восточного простирания, поперечные по отношению к генеральному направлению структур Кавказского фрагмента (трансорогенные), т. е. практически ортогональные.

Фрагментарно намеченные ранее Сочи-Ставропольская, Понтийско-Кизлярская, Ван-Аграханская и (Аракс) Урмия-Апшеронская линеаментные зоны (см. рис. 44) выделяются по комплексу дистанционных и геолого-геофизических данных в виде мощных систем нарушений, играющих значительную роль в глубинном строении и поверхностной геологической структуре, в развитии региона в целом, а также контролирующими некоторые особенности сейсмичности и распределения некоторых полезных ископаемых территории.

Линеаменты Копетдагского фрагмента Средиземноморского пояса (рис. 49) ориентированы по тем же направлениям, что и геологические разрывы палеозойского фундамента и основные элементы новейшей структуры, т. е. в северо-западном, субмеридиональном, северо-восточном и субширотном направлениях.

Одна из самых проявленных структур региона — Межбалхан-Узбойская линеаментная зона северо-восточного простирания, прослеживающаяся на юго-запад до северо-западного замыкания рифтовой депрессии Красного моря, на северо-восток в район выходов палеозойского основания Султан-Уиздага и далее, совпадая с

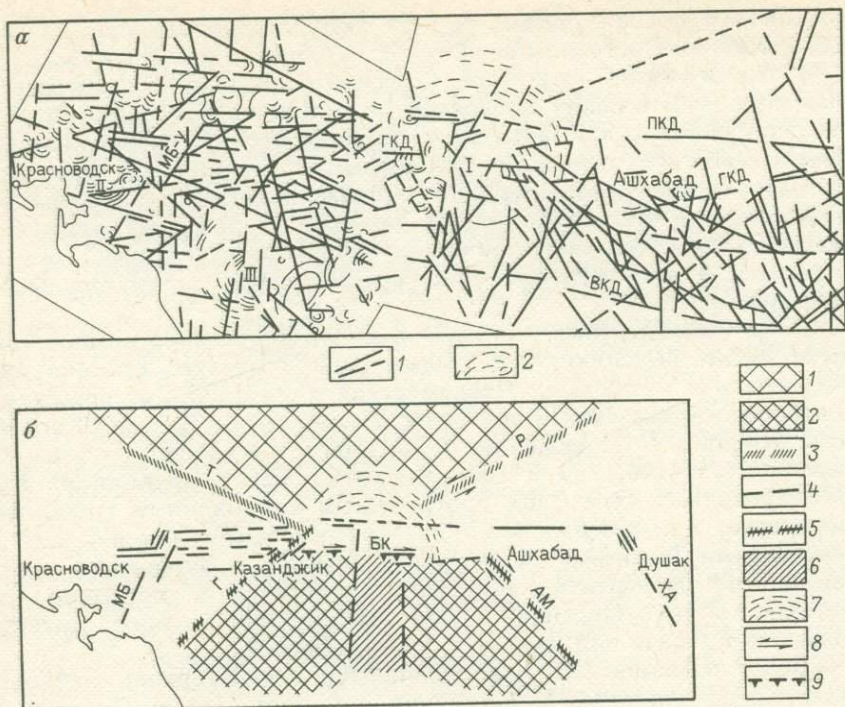


Рис. 49. Схемы дешифрирования Копетдагского фрагмента Средиземноморского складчатого пояса

*a* — линеamentное поле, 1 — линеamentы; 2 — кольцевые структуры; *b* — геодинамическая модель. Линеamentы: ПКД — Предкопетдагский, ГКД — Главный Копетдагский, МКД — Внутрикопетдагский, МБ-У — Межбалхан-Узбойский; кольцевые структуры: I — Кизыл-Арват-Бахарденская, II — Бекмамедская, III — Гейджанская; 1-2 — трапещидальные блоки: 1 — Туранский, 2 — Копетдагский; 3-6 — линеamentы и их зоны: 3 — внутри Туранской плиты (Т — Туаркырский, Р — Репетекский), 4 — пограничные (МБ — Межбалханский, БК — Балхан-Копетдагский, ХА — Хивеабад-Арабалинский), 5 — внутри Копетдагского орогена (Г — Гяурлинский, АМ — Ашхабад-Мешхедский), 6 — осевая Эльбурс-Бахарденская; 7 — Кизыл-Арват — Бахарденская кольцевая структура; 8 — сдвиги, 9 — надвиги и взбросы

Восточно-Аральской системой разломов, ограничивающих впадину Аральского моря с юго-востока.

Простирание этой зоны практически параллельно простиранию известного Пальмиро-Апшеронского линеamenta, трассирующегося в 300 км к северо-западу, и не исключено, что эти линеamentы образуют своеобразную линеamentопару северо-восточного простирания, протяженность которой может косвенно свидетельствовать о значительной структурной роли данной линеamentной зоны, разделяющей Тавро-Кавказский и Туркмено-Иранский сегменты Средиземноморского пояса (см. рис. 45).

Межбалхан-Узбойская линеamentная зона на мелкомасштабных КС дешифрируется по резкой смене фототона и часто довольно четко трассируется линейно вытянутыми облаками, что связано, как указывал в 30-х годах французский ученый К. Шлюмберже, с тектоническими нарушениями земной коры, по которым проходит

подъем земного тепла, влияющего на распределение облачности в атмосфере.

В целом выделенный линеамент (или линеаментную зону) предложено именовать **Красноморско-Аральской линией** или линией **Мушкетова**, в честь И. В. Мушкетова, указавшего в 1890 г. на принципиальную возможность данного нарушения.

Сопоставление линеаментов Копетдагского региона со схемой глубины залегания поверхности фундамента показывает их большую сходимость.

Горно-складчатый пояс **Северо-Американских Кордильер**, ориентированный в северо-западном ( $320\text{—}330^\circ$ ) направлении, протягивающийся на расстояние более 9000 км (от Берингова пролива до Карибского моря) и имеющий ширину от 800 до 1600 км (на широте Денвера), образован в целом в позднем мезозое, а свой современный облик приобрел в результате неоген-антропогенных движений и сопутствовавшего им вулканизма. Глубинные разломы разделяют и продольные зоны Северо-Американских Кордильер, и их поперечные сегменты: канадский и американский, мексиканский и центрально-американский. Причем глубинные тектонические швы подчеркиваются цепочками молодых вулканов.

Стержневой структурой Северо-Американских Кордильер может, вероятно, считаться глубинный разлом Сан-Андреас, северо-западного, как и Кордильеры, простирания, протягивающийся примерно на 1500 км и квалифицирующийся как правый сдвиг, смещения по которому установлены как минимум с конца юры.

Поперечные зоны разломов субширотного направления часто находят прямое продолжение в широтных зонах разломов Тихого океана, например в зонах Меррей, Пайонир, Мендосино и др.

Линеаментный рисунок пояса (см. рис. 45) дает дополнительную информацию о глубинных нарушениях субмеридионального и северо-восточного простирания, развитых в горно-складчатом поясе так же интенсивно, как и на территории смежной Северо-Американской платформы.

В целом линеаменты продольного — северо-западного, поперечного — северо-восточного и диагонального — субширотного и субмеридионального простираний, взаимно пересекаясь, образуют напряженное линеаментное поле с самыми различными формами делимости земной коры — треугольной, прямоугольной, ромбоидальной и др. (см. рис. 45).

Горно-складчатые сооружения **Аппалачского** и **Тихоокеанского поясов**, несмотря на отличия масштабов и истории геологического развития современной структуры, могут служить наглядным примером постоянства закономерностей линеаментного поля. Так, в структуре обоих поясов важную роль играют линеаменты продольные поясам — северо-восточного ( $50^\circ$ ) простирания, вероятно контролировавшие ограничения современных поднятий этих регионов. Не меньшее значение в формировании современного облика этих поясов имели и поперечные линеаменты северо-западного ( $320\text{—}330^\circ$ ) простирания, предопределившие поперечную — геологическую и

геоморфологическую — зональность Аппалачского и Тихоокеанского поясов, а также прямые структурные связи последних со смежными древними платформами — Северо-Американской и Восточно-Сибирской — и молодыми океанами, в которых продолжают существовать линейные, трассирующиеся через указанные континентальные горно-складчатые сооружения.

В целом линейный рисунок, расшифрованный по разномасштабным КС, складывается из ортогональных и диагональных направлений, образующих напряженное линейное поле с описанными формами делимости земной коры с шагом не более 200—300 км (см. рис. 45).

Возрастные соотношения линейных структур разных простираний меняются в широких пределах, но в целом субмеридиональные структуры значительно древнее остальных, что доказывается, например, пересечением (и даже смещением) каледонских субмеридиональных структур Южных Аппалачей структурами герцинского этапа, имеющими северо-восточное простирание.

## 9.8. Особенности линейной тектоники Земли

Обзор линейной тектоники платформенных областей и складчатых поясов позволяет сделать некоторые выводы.

Первое, что выявляется, — значительная *автономность* линейных структур, далеко не всегда и не везде совпадающих с определенными по геологическим и геофизическим данным структурами, что свидетельствует о несовпадении структурных планов поверхностной геологии и различных по глубине уровней земной коры. Несовпадение с геологической структурой в целом, частичное совпадение с элементами геологической структуры и практически 100%-ный контроль элементов ландшафта и рельефа приводят к заключению о древнем заложении линейного каркаса Земли. Его отдельные составляющие испытывают избирательное омоложение и активизацию, что предопределяло в прошлой геологической истории заложение и развитие строго ориентированных структурных линий, а в современном геоморфологическом рисунке предопределяет ориентировку положительных и отрицательных элементов.

Второе, что следует отметить, связано с *транзитностью* или *планетарностью* линейных структур и их систем. Отдельные линейные структуры (и их системы) с удивительным постоянством трассируются на гигантские расстояния, «просвечиваясь» под древними платформами и молодыми складчатыми поясами, под современными морями (рис. 50) и океанами. Примером такой транспланетной транзитности могут служить субширотные линейные структуры платформ Лавразии, трассирующиеся через Балтийский щит, древнюю Русскую плиту, Уральский складчатый пояс, молодую Западно-Сибирскую плиту, древнюю Восточно-Сибирскую платформу, гетерогенный Тихоокеанский складчатый пояс, акваторию Тихого океана, складчатый пояс Северо-Американских Кордильер, древнюю Северо-Американскую платформу и т. д. (см. рис. 45).

С таким же постоянством прослеживаются субмеридиональные линеаментные зоны по трассам Баффинова Земля — Чилийские Анды, Скандинавский п-ов — Южная Африка, п-ов Таймыр — п-ов Индокитай и т. д. Протяженность этих зон, достигающая 10 000 км и более и ширина, часто превышающая 1000 км, свидетельствуют о наличии гигантских глубинных неоднородностей Земли.

Аналогичных масштабов достигают и диагональные линеаментные зоны, трассирующиеся в северо-западном — Балтийско-Индонезийская, Аляскинско-Бразильская и др. — и северо-восточном — Пиренейско-Ямальская, Калахари-Колымская и др. — направлениях.

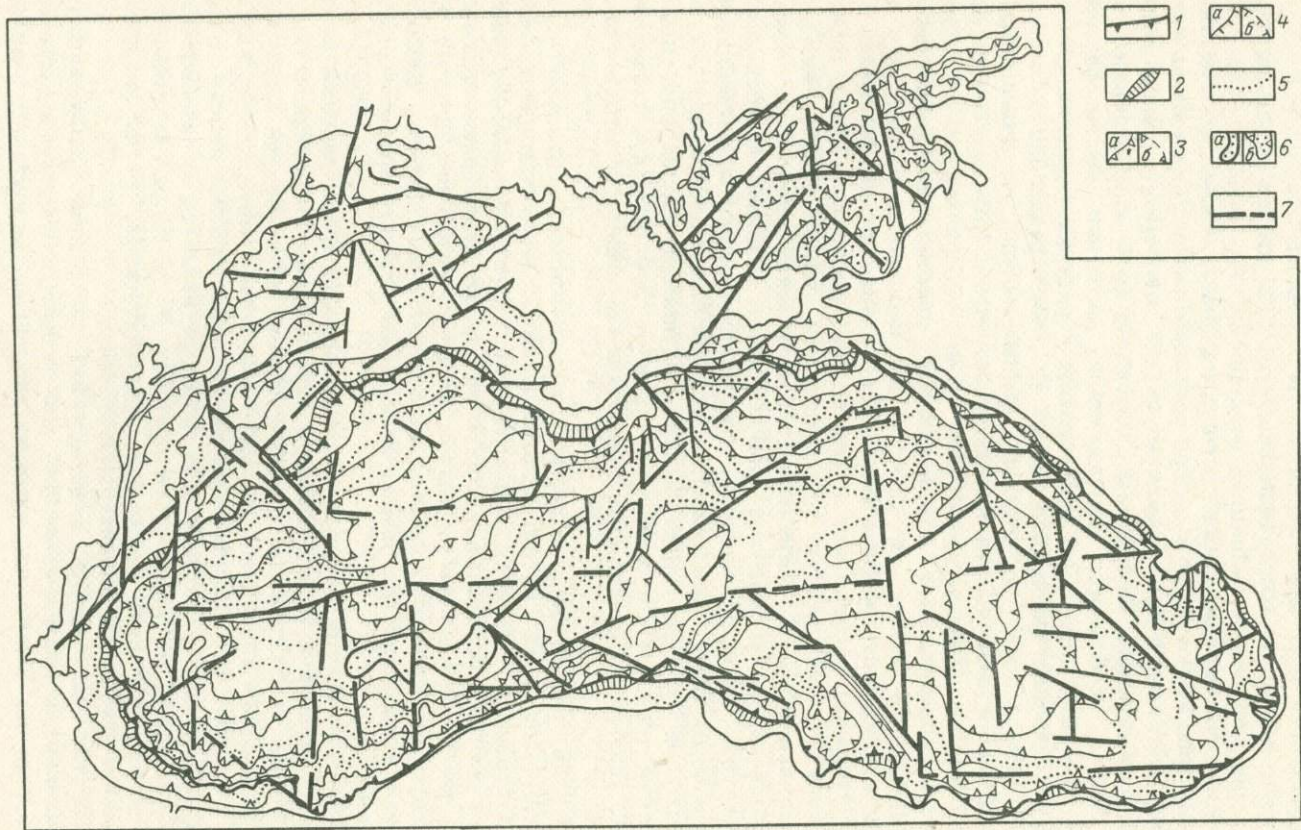
Третья особенность линеаментной тектоники Земли обусловлена *консервативностью* линеаментного рисунка, выявляемой при дешифрировании разномасштабных КС, заключающейся в сохранении первоосновы — сочетания ортогональных и диагональных простираний. Однако это не исключает, что в каждом конкретном регионе и на каждом конкретном уровне генерализации не наблюдаются определенные доминирующие простирания линеаментов. В противном случае не удалось бы наблюдать и выделять на общем линеаментном фоне зоны концентраций линеаментов.

Четвертую особенность линеаментной тектоники Земли можно назвать *сопоставимостью* линеаментов и линеаментных систем с равномасштабными элементами геологической структуры Земли: региональным линеаментом соответствуют разрывы геологической структуры, трансрегиональным — глубинные разломы земной коры, глобальным (транспланетным) — системы планетарных горно-складчатых поясов. Это свидетельствует о прямой корреляции линеаментной тектоники и элементов строения Земли, что, в свою очередь, указывает на единство процессов тектогенеза в истории планеты.

Пятая особенность линеаментной тектоники — *приоритетность* линеаментов и их систем по отношению к элементам геологического строения: элементы геологической структуры самого разного ранга всегда представляют собой отдельные части равномасштабного им линеаментного рисунка и никогда — наоборот. Это же обстоятельство позволяет делать выводы об очень древнем возрасте линеаментного каркаса Земли, относимого к концу архея — началу протерозоя.

Остановимся на вопросе о совместимости представлений о суперлинеаментах и горизонтальном перемещении литосферных плит. Некоторые исследователи считают наличие планетарных линеаментов решающим контрдоводом против тектоники плит. Другие, наоборот, полагают, что противоречие между планетарными линеаментами Земли и дрейфом литосферных плит не является неразрешимым. В этой связи интересны представления В. А. Буша, показавшего, что горизонтальные движения предопределены и регулируются системой глубинных планетарных структур.

Шестая особенность линеаментной тектоники подчеркивается *ритмичностью* (равномерностью) или *эквиливантностью* линеаментного рисунка Земли, что связано, во-первых, вероятно, с особен-



ностями поля напряжения планеты, а во-вторых, предопределяет столь же равномерный рисунок делимости (дробности) земной коры. Последнее не означает постоянства форм делимости, разнообразие их связано с конкретным сочетанием доминирующих в регионе направлений линеаментов.

Седьмая особенность линеаментной тектоники, которую условно можно назвать *кинематичностью*, связана с тем, что составляющие линеаментного рисунка Земли часто имеют кинематику, аналогичную кинематике разрывов сходных простираний: например, линеаменты северо-западных простираний имеют праводвиговую кинематику, северо-восточных — леводвиговую и т. д. Это обстоятельство позволяет применить результаты изучения линеаментной тектоники при построении глубинных геодинамических моделей земной коры.

Восьмая особенность линеаментной тектоники Земли обусловлена тем, что линеаменты и их системы, но особенно линеаментные узлы, образованные за счет сочленения или пересечения линеаментов и их зон, часто контролируют местоположение месторождений различных полезных ископаемых — твердых, жидких и газообразных, что позволяет назвать данную особенность линеаментной тектоники *«полезностью»*. Поскольку возраст месторождений колеблется в самых широких пределах — от самых древних (докембрийских) до самых молодых (неоген-четвертичных), можно предположить постоянную — на протяжении всей геологической истории планеты — связь между процессами линеаментогенеза и металлогенеза.

Девятая особенность линеаментной тектоники Земли условно названа авторами *«прогнозируемостью»*. Это связано с тем, что с помощью восстановления линеаментного рисунка того или иного региона, вероятно, можно прогнозировать наличие некоторых элементов глубинного строения земной коры, направленность современного развития геологической структуры и развитие современных геологических процессов — гравитационных, сейсмических, вулканических и пр., а также нахождение участков возможных концентраций различных полезных ископаемых.

Десятая особенность, как бы суммирующая описанные, заключается в том, что с помощью линеаментной тектоники имеется возможность независимого (от других методов геологии, геофизики и сейсмологии) *районирования* земной коры по степени и формам делимости (или дробности).

### *Вопросы для самопроверки*

1. Раскройте содержание понятий: линеамент; линеаментная тектоника.

Рис. 50. Линейные структуры Черноморской впадины. По Б. В. Сенину:

1 — бровка внешнего шельфа — достоверная, 2 — шельф с аномально крутым склоном, 3—4 — бровки ступеней: 3 — региональных, 4 — локальных (а — достоверные, б — предполагаемые); 5 — тыловые швы ступеней; 6 — конечные замкнутые бассейны стока: а — на глубоководном ложе, б — на шельфе; 7 — рельефообразующие линеаменты (наиболее значительные деформации геоморфологических поверхностей)

2. Дайте характеристику методам поиска, выявления и изучения линеаментов по МДЗ.

3. Укажите особенности морфологии, строения и классификации линеаментов.

4. Какие линеаментные сообщества существуют в природе? Дайте им краткую характеристику.

5. В чем суть методов интерпретации линеаментов и их систем?

6. Расскажите о сходстве и различиях линеаментной тектоники: а) платформенных областей; б) складчатых поясов.

7. Каковы основные особенности линеаментной тектоники Земли?

## Глава 10

### ИССЛЕДОВАНИЕ КОЛЬЦЕВЫХ СТРУКТУР С ПОМОЩЬЮ МАТЕРИАЛОВ КОСМИЧЕСКОГО ЗОНДИРОВАНИЯ

#### 10.1. Общие сведения о кольцевых структурах

Развитие космических методов способствовало выявлению большого количества кольцевых структур на поверхности Земли. Зондирование поверхности нашей планеты из космоса и наземные геологические исследования позволили обнаружить многочисленные кольцевые структуры размерами в поперечнике от сотен метров до первых тысяч километров. Было установлено, что 70—80% этих

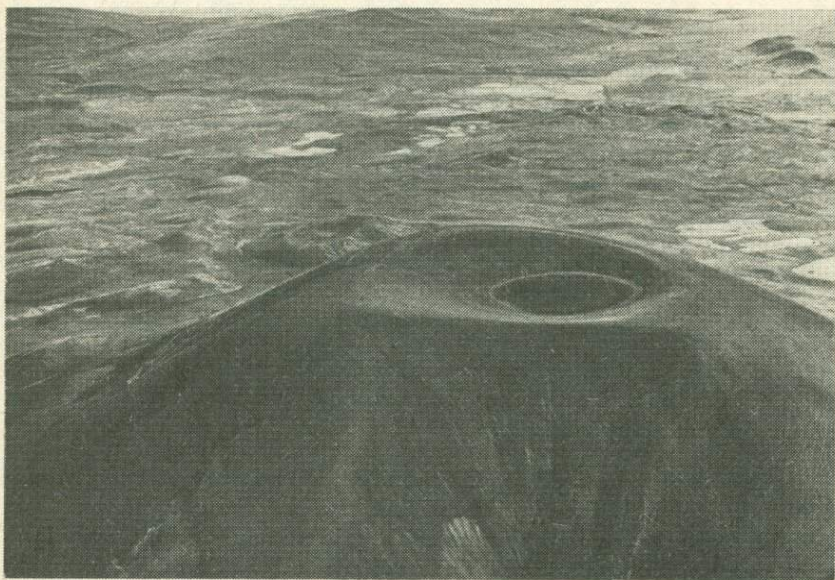


Рис. 51. Кольцевая структура — потухший кратер вулкана. Гегамское нагорье АрмССР











Структуры	Простые	Сложные			
		Концентрические	Сопряженные	Орбитальные	Комбинированные
Замкнутые					
Фрагментарные					

Рис. 52. Схема подразделения кольцевых структур. По О. Т. Кротковой.

образований связано с разнообразными геологическими процессами.

Существенный вклад в изучение кольцевых структур Земли внесли советские исследователи: В. А. Буш, М. З. Глуховский, В. В. Соловьев и др.

**Кольцевая структура** — геологическое тело, характеризующееся центром симметрии в сечении с земной поверхностью. На космических снимках она может быть выражена либо замкнутыми, либо фрагментарными (неполнокольцевыми) фигурами — кольцами или овалами. На земной поверхности располагаются или одиночно, или группами. По своему строению делятся на простые и сложные. Простые кольцевые структуры обычно представляют собой куполовидные или цилиндрические тела малого диаметра (рис. 51). Сложные кольцевые структуры подразделяются на концентрические, сопряженные, орбитальные и комбинированные (рис. 52).

Концентрические кольцевые структуры состоят из ядра и внешнего контура. Ядро кольцевой структуры — центральная ее часть, ограниченная концентрическим элементом наименьшего радиуса. Внешний контур — наиболее удаленный концентрический элемент, являющийся границей, за пределами которой находится рама кольцевой структуры. Между ядром и внешним контуром располагается основная, обычно состоящая из концентрических колец часть кольцевой структуры. Как правило, кольцевые структуры (особенно больших диаметров) бывают осложнены системами разломов. В. А. Буш выделяет радиальные разломы, совпадающие с радиусами кольцевых структур; сегментарные — пересекающие структуру по хорде, но не выходящие далеко за ее пределы; секущие — пересекающие структуру и выходящие далеко за ее пределы; концентрические — совпадающие с элементами кольцевой структуры.

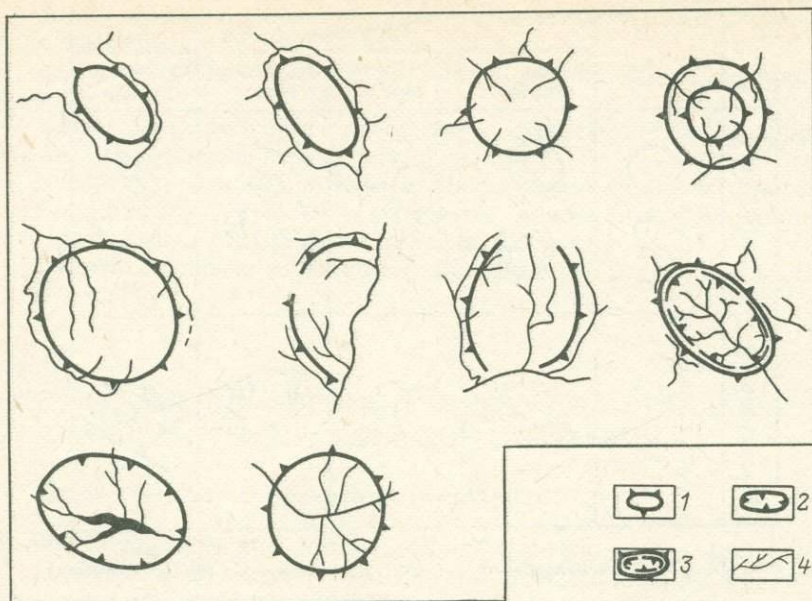


Рис. 53. Характер связи кольцевых структур с гидросетью закрытой территории.  
По О. Т. Кротковой.

1 — локальные поднятия, 2 — локальные депрессии, 3 — рельеф обращенный, 4 — гидросеть

Выраженность кольцевых структур на КС — самая различная. Она зависит от многих факторов, в том числе от размера объекта дешифрирования, геологического времени его заложения и развития, от тектонической активности региона и т. д. Например, кольцевые структуры небольших размеров дешифрируются увереннее, чем крупные кольцевые структуры, а связанные с процессами магматизма и метаморфизма — увереннее, чем обусловленные тектоническими процессами. В связи с этим при выявлении кольцевых структур на космических снимках необходимо владеть определенным навыком, особенно при работе со снимками закрытых территорий, где в качестве основных выступают ландшафтно-индикационные признаки. При дешифрировании КС с целью прослеживания кольцевых структур «Методические рекомендации» Мингео СССР (1986) предлагают следующие основные признаки.

1. Концентрический или радиально-концентрический характер рисунка изображения орографических, гидрографических, почвенных, растительных и прочих элементов ландшафта.

2. Круговая или овальная форма аномального фототона или рисунка изображения, обусловленная морфоструктурными особенностями ландшафта или вещественным составом геологического субстрата.

3. Сочетание обоих признаков.

Выявление кольцевых структур на закрытых территориях осуществляется при помощи ландшафтного дешифрирования, где ос-

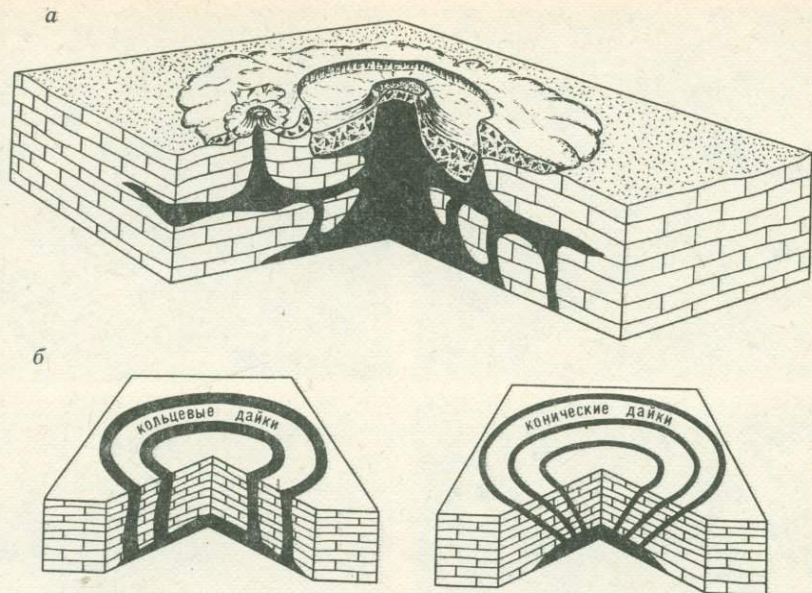


Рис. 54. Схема, иллюстрирующая формирование кольцевых структур:  
 а — вулканическими процессами, б — дайковыми комплексами

новым индикационным признаком может служить рисунок гидросети.

На рис. 53 показана тесная связь между характером гидросети и кольцевыми структурами, изученными на Курском аэрокосмическом полигоне. Анализ планового рисунка гидросети позволил здесь выделить три типа форм соотношений кольцевых структур с рельефом.

I. Прямое, когда кольцевая структура и рельеф имеют согласное соотношение. Речная сеть характеризуется радиально-центробежным или обтекающим рисунком.

II. Обращенное — кольцевая структура и рельеф характеризуются несогласным соотношением. Речная сеть имеет центростремительный или петельчатый рисунок.

III. Сложное, когда кольцевой структуре совместно соответствует прямой и обратный рельеф. Речная сеть образует сложный рисунок.

Помимо характера рисунка речной сети, при изучении кольцевых структур закрытых территорий следует рекомендовать анализировать и другие разнообразные ландшафтные и геоморфологические факторы.

Кольцевые структуры нельзя рассматривать как открытие, сделанное при помощи КС. Они были известны и раньше, задолго до применения ДЗ, и выделялись геологическими, геофизическими и

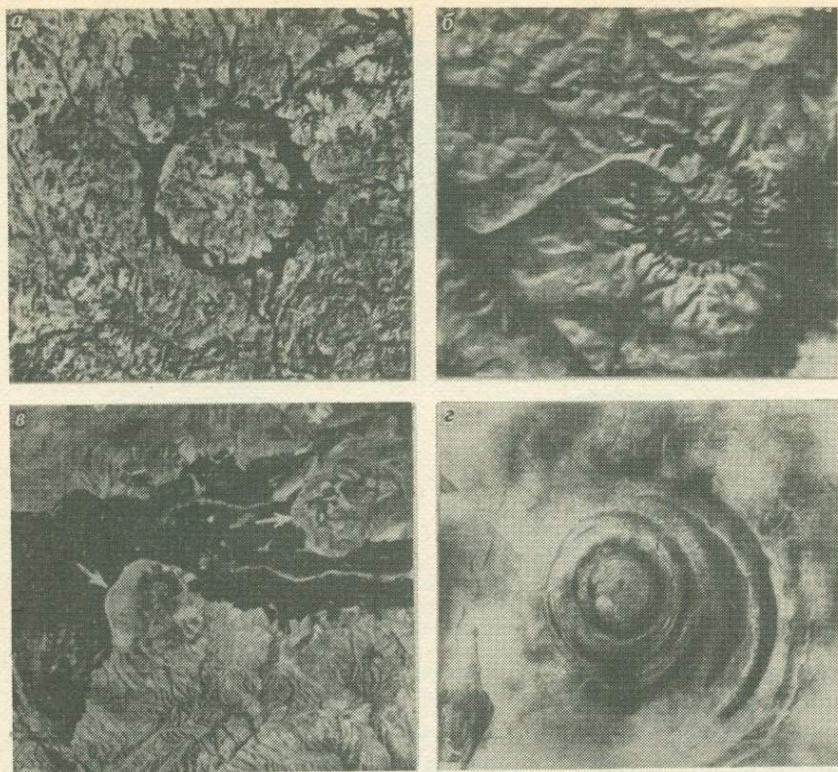


Рис. 55. Изображение кольцевых структур различного происхождения на КС:

*а* — импактная кольцевая структура диаметром 65 км в районе оз. Маникуаган, Канада; *б* — кольцевая структура Кондер в Сибири, связанная с внедрением интрузивного тела; *в* — кольцевая структура Ходжа-Мумын, в районе Кулябской впадины, обусловлена внедрением соляного купола; *г* — кольцевая структура Ришат в Мавритании тектонического происхождения

геоморфологическими методами. К ним относились конические интрузии, вулканотектонические депрессии, вулканические постройки, кольцевые разломы и дайки, гранитоидные купола и другие геологические образования (рис. 54).

Однако с развитием космических методов произошли революционные изменения в процессе выделения и изучения кольцевых структур. Количество обнаруженных структур резко возросло во всех изучаемых регионах, независимо от особенностей геологического строения последних. Они были установлены и в фундаменте, и в чехле древних и молодых платформ, в складчатых областях различного возраста, в краевых и передовых прогибах, на срединных массивах (рис. 55).

До сих пор в терминологии, применяемой к объектам изометричной формы, не существует единства. Наиболее прочно вошел в геологическую литературу термин «кольцевая структура», широко используемый советскими и зарубежными геологами.

## 10.2. Методы выявления, изучения и идентификации кольцевых структур

Процесс изучения кольцевых структур, как показывает опыт, должен осуществляться при определенной последовательности операций. В. А. Буш, обобщив результаты исследований многих советских геологов, предложил трехстадийную последовательность работы по изучению кольцевых структур: а) выявление, б) изучение, в) определение генезиса.

Опыт работы по изучению кольцевых структур, накопленный в лаборатории космической геологии МГУ, свидетельствует, что оптимальной является двухстадийная схема анализа, в которой выделяется: а) стадия выявления, б) стадия идентификации.

Стадия выявления заключается в дешифрировании материалов дистанционных съемок, анализе топографических карт, геологических и геофизических материалов.

Дешифрирование МДЗ — наиболее чувствительный метод обнаружения кольцевых структур. Известно, что на аэрокосмических снимках выявляются кольцевые аномалии изображения, обусловленные наличием концентрических окружностей, эллипсов, дуг, фототональных овалов, кругов и т. п.

Такие фотоаномалии необходимо проверить на устойчивость путем изучения снимков того же района, сделанных в другой сезон или год. Наибольшее доверия заслуживают аномалии, сохраняющиеся на разновременных снимках, на снимках разных масштабов, а также полученных в различных зонах спектра. РЛ-снимки по дешифрированию кольцевых структур не уступают снимкам оптического диапазона.

Ландшафтно-индикационный метод дешифрирования сводится к опознанию элементов ландшафта, служащих индикаторами кольцевых структур. В различных ландшафтно-структурных областях индикационные признаки разные. В пустынных областях можно использовать очертания границы смены динамических типов золотых песков — грядовых, барханных, бугристых. В горных областях — рисунок эрозионных долин и горных гребней. На сельскохозяйственно освоенных территориях — ориентировку границ угодий. В областях развития эрозионно-ледникового рельефа — очертания экзарационных ледниковых озер. Большое значение для выявления кольцевых структур имеют топографические карты. Для этого пригодны лишь точные карты преимущественно средних масштабов, составленные по данным детальных съемок. На этих картах можно различить дуговые, кольцевые и концентрические элементы гидросети, водоразделы, изометричные поднятия и депрессии, которые обычно совпадают с контурами кольцевых структур, выявленных на аэрокосмических снимках. Однако, как это удалось установить В. А. Бушу, разрешающая способность этого метода в два раза ниже аэрокосмического дешифрирования.

Кольцевые структуры могут выявляться также в результате анализа структурно-геоморфологических, неотектонических, геоло-

гических, геофизических, геохимических, гидрогеологических и прочих специальных карт.

Определенного навыка требует обнаружение гигантских кольцевых структур, достигающих в диаметре сотни и даже тысячи километров. Обычно их контуры бывают нечеткими, размытыми, проявляющимися фрагментарно и замаскированы наложенными более молодыми структурами. В современном рельефе такие структуры маркируются крупными орографическими системами — горными массивами или межгорными и предгорными впадинами. Опыт изучения этих огромных кольцевых структур показал, что поднятия, выраженный горными системами, обычно на снимках континентального уровня соответствует темный фототон, а понижениям — светлый.

**Стадия идентификации.** На этой стадии происходит выявление происхождения и возраста геологических тел и тектонических структур, формирующих кольцевые образования. На данной стадии применяются обычные геологические и геофизические методы исследования.

Основным способом выяснения генезиса кольцевых структур служит их сопоставление с данными, полученными в ходе наземных геологических работ.

В. А. Буш считает, что главным правилом подбора дистанционных, геологических и геофизических материалов для сопоставления является близость масштабов. Рекомендуемая разница в масштабах сопоставляемых материалов не может быть более двукратной. Необходима комплектность сравниваемых материалов и избирательность их подбора в зависимости от предполагаемого генезиса изучаемой кольцевой структуры. Например, для изучения тектонических кольцевых структур платформ диаметром в сотни километров прежде всего необходим сбор тектонических и геофизических материалов таких, как: структурные карты по кровле фундамента и горизонтов осадочного чехла; результаты глубинного сейсмозондирования и сейсмических исследований, освещающие структуру поверхности астеносферы, Мохоровичича, Конрада и т. д. Прямое сопоставление геолого-геофизических и дистанционных материалов не всегда позволяет прийти к однозначному заключению; в этом случае полезно составление специальных карт, схем или разрезов, помогающих уточнить генетические признаки кольцевой структуры. Наиболее полезными могут оказаться палеотектонические, палеогеографические, палеовулканологические, литолого-фациальные, петролого-структурные, формационные и др.

При анализе собранных данных необходимо прежде всего выявить степень и характер отличия геологического пространства, заключенного в контуре кольцевой структуры, от вмещающей ее рамы по возрасту геологических образований, их литолого-петрографическому и формационному составу, тектонической структуре, особенностям рельефа, геоморфологии, неотектонике, аномальным геофизическим полям, металлогеническим особенностям и иным показателям. Столь же важно установление связи отдельных концентрических

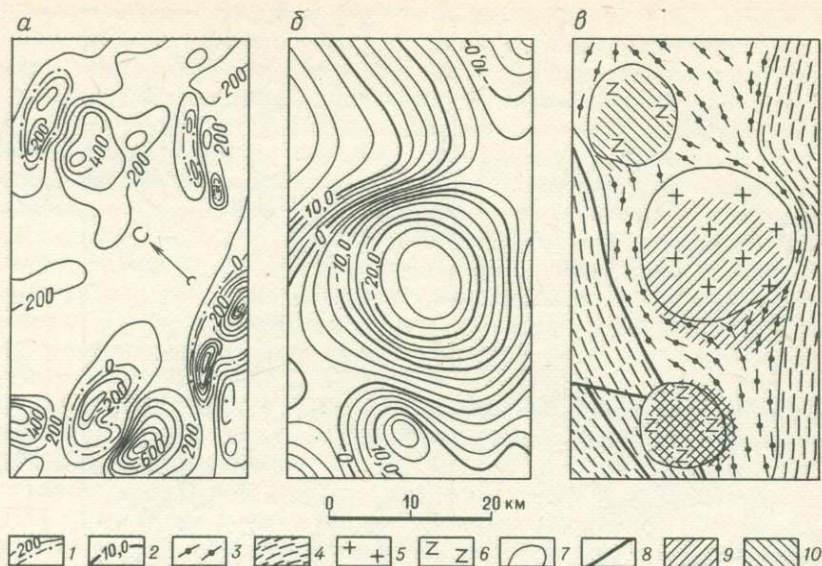


Рис. 56. Результаты интерпретации кольцевых структур, связанных с интрузивными массивами:

*a* — аномалии Буге, *б* — аномалии  $\Delta T$ , *в* — схема дешифрирования КС (по Е. Н. Исаеву и И. В. Исаевой). 1 — изолинии магнитного поля; 2 — изолинии гравитационного поля; 3 — гнейсы и гранитогнейсы; 4 — метаморфические сланцы; 5 — граниты; 6 — габбро; 7 — геологические границы; 8 — разломы; 9 — расчетные тела, образующие аномалии  $\Delta g$ ; 10 — расчетные тела, образующие магнитные аномалии.

и радиальных элементов кольцевых структур с теми или иными геологическими телами и тектоническими структурами. Если отдешифрированная на КС кольцевая структура целиком вмещает контур изометричного в плане гранитного массива, то в этом случае она относится к plutonic структурам. Если отдешифрированная кольцевая структура располагается в поле развития пород платформенного чехла, совпадает целиком с холмистой возвышенностью, совмещается с положительной аномалией силы тяжести, огибается крупными речными долинами, характеризуется радиальным рисунком мелких водотоков, то тогда ее следует относить к тектоногенным и связывать с положительной тектонической структурой платформенного чехла.

Крупные кольцевые структуры с поперечником многие сотни и тысячи километров сложены, за редкими исключениями, резко разнородными и разновозрастными геологическими образованиями, что свидетельствует о формировании их под влиянием различных факторов и в течение длительного геологического времени. В некоторых случаях из множества геологических факторов можно выбрать один ведущий, который, как цепочку, «вытягивает» за собой остальные.

Вместе с тем для целого ряда кольцевых структур установление их генезиса остается задачей будущего. В строении кольцевых мегаструктур участвуют вещественные комплексы и структурные элемен-

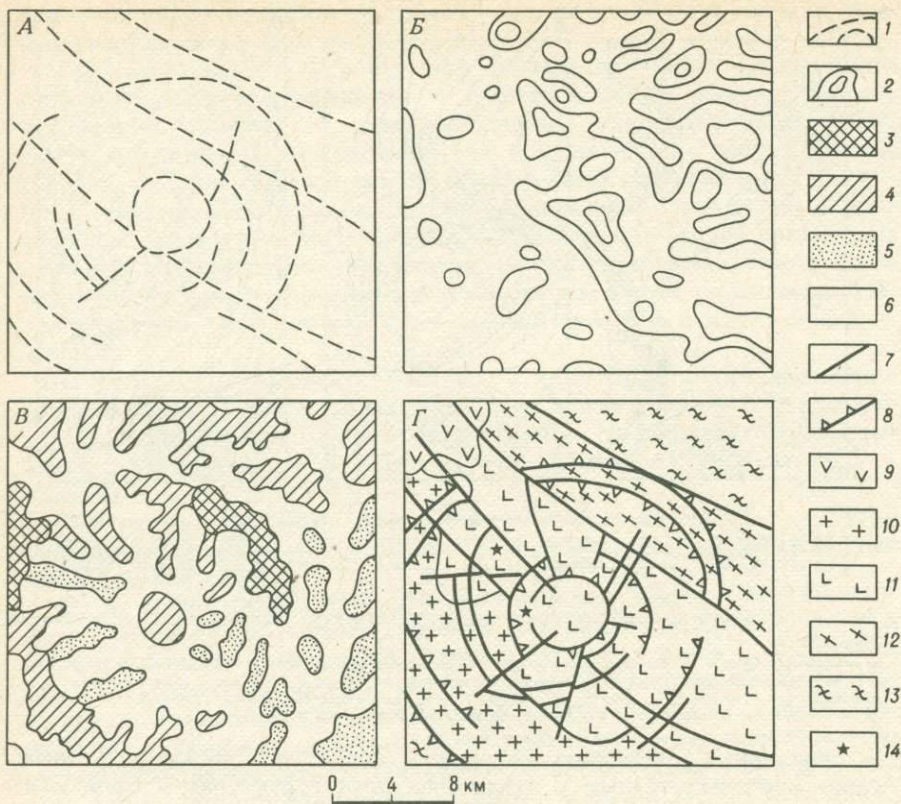


Рис. 57. Кольцевая структура Пакчи в Алдано-Становом регионе и ее выраженность в рельефе и геофизических полях (Космогеология СССР, 1987):

*А* — схема дешифрирования, *Б* — ориентировка магнитных полей, *В* — относительные превышения рельефа, *Г* — схема геологического строения.

1 — структурные линии, отдешифрированные на КС; 2 — изодинамы магнитного поля; 3–6 — энергия рельефа: 3 — 600–800 м, 4 — 400–600 м, 5 — 200–400 м, 6 — 0–200 м; 7 — зоны дробления; 8 — разломы; 9 — нижнемеловые андезиты; 10 — гранитоиды; 11–13 — докембрийские образования: 11 — габбро-амфиболиты, 12 — мраморы, 13 — кристаллические сланцы; 14 — жилы риолитов

ты, сформированные различными геологическими процессами: метаморфическими, плутоническими, вулканическими, тектоническими. Эти структуры, как правило, имеют длительную историю развития, охватывающую миллионы — миллиарды лет.

Малые же кольцевые структуры обычно моногенетичны и чаще всего порождены одноактными процессами.

Анализ карт геофизического содержания следует рассматривать в качестве важнейшего метода при выделении и изучении кольцевых структур земной коры (рис. 56, 57). Особенно ценную информацию содержат карты гравитационного и магнитного полей Земли и данные глубинного сейсмического зондирования. Для выяснения и изучения кольцевых структур можно использовать геофизические карты и схемы различных масштабов. Средне- и крупномасштабные — для

изучения единичных структур небольших диаметров, обзорные — для установления кольцевых объектов крупных размеров. К сожалению, еще совсем недавно построение геофизических карт велось без учета существования кольцевых объектов в земной коре. В этой связи интерпретация расчетных фактических геофизических данных осуществлялась таким образом, что многие кольцевые структуры пропадали, затушевывались линейными образованиями. Особо следует обратить внимание на выявление геохимических характеристик кольцевых структур и связей с ними полезных ископаемых. Для этого необходимо оценивать характер совпадения контура кольцевых структур или основных ее структурных элементов с расположением рудных месторождений. Для кольцевых структур небольшого диаметра (десятки километров) необходимо определить соответствие конкретных месторождений с кольцевой структурой в целом; для крупных кольцевых структур — расположение месторождений по отношению к их ядрам, внешним контурам, внутренним центрам или радиальным элементам.

Такое совпадение должно анализироваться дополнительно с целью изучения возможности установления генетической связи данных рудных месторождений с геологическими образованиями, порождающими кольцевые структуры. Например, пространственное совпадение колчеданных и золоторудных месторождений на Южном Урале с плутоническими кольцевыми структурами объяснялось для колчеданов территориальным совпадением, а для золота — генетической связью. Кроме генезиса учитывалось и совпадение возраста оруденения с возрастом кольцевых структур. Так, месторождения железистых кварцитов в центре некоторых положительных тектоногенных кольцевых структур Индии (выступы докембрийского фундамента среди мезозойского платформенного чехла) генетически с ними не связаны в отличие от месторождений бокситов в пределах этих же кольцевых структур.

Таким образом, только комплексное изучение аэрокосмических снимков различных типов и масштабов, анализ всех имеющихся геологических, геофизических данных, проработка топографических материалов и сравнительно-планетологический подход в совокупности могут обеспечить надежное выделение кольцевых структур в земной коре, определение закономерностей их пространственного распределения, связей с полезными ископаемыми и выявление особенностей их развития в процессе геологической истории.

Особого навыка требует изучение импактных структур, возникших в результате падения метеоритов. Некоторые метеоритные кратеры — астроблемы четко выделяются на КС в виде кольцевых структур, в то время как другие не видны. С помощью только дешифрирования материалов космических съемок уверенно идентифицировать ударный кратер удастся не всегда. Однако это достигается при наземной проверке выявленной структуры. Астроблемы характеризуются наличием фрагментов кольцевого вала, центральной горкой, интенсивной трещиноватостью пород внутри и вокруг кратера, иногда — наличием радиальных лучевых выбросов за кольцевым валом.

Эти признаки присущи большинству астроблем, однако их выраженность на снимках зависит от того, в каких (эффузивных или осадочных) породах они образовались, времени их формирования и строения перекрывающего комплекса пород. Однако ведущим признаком является наличие следов шок-метаморфизма в породах, слагающих днище кратера. Время играет существенную роль в сохранности структуры: чем она древнее, тем более разрушена и вследствие этого менее уверенно дешифрируется на космических снимках. В. В. Федьинский установил зависимость, согласно которой вероятность обнаружения импактного кратера прямо пропорциональна его площади и обратно пропорциональна его возрасту. Импактные структуры большого диаметра с возрастом более 10 млн. лет в подавляющем большинстве утратили морфологические очертания округлых впадин, окруженных валом выбросов.

В заключение отметим, что опыт изучения кольцевых структур свидетельствует о необходимости определенной «запрограммированности» дешифровщика на выделение именно данного класса структур и в этой связи вести исследования строго целенаправленно, временно не совмещая их с решением других задач.

### 10.3. Классификация кольцевых структур

Вопросами классификации кольцевых структур занимались многие советские исследователи: В. В. Соловьев, В. А. Буш и др.

В основу многочисленных классификаций кольцевых структур положены разнообразные принципы их систематики — по морфологическим особенностям, размерам, глубине, генетическим признакам, степени дешифрируемости, характеру выражения в рельефе и т. д. Наиболее удачная классификация кольцевых структур, учитывающая их структурно-генетические особенности, разработана группой исследователей лаборатории космической геологии МГУ совместно с сотрудниками ВНИИЗарубежгеологии и Аэрогеологии. Данная классификация успешно апробирована и может рекомендоваться как одна из наиболее совершенных. Основными параметрами классификации избраны класс размерности кольцевых структур и геологические процессы, обуславливающие выделение их генетических разновидностей, так как кольцевые структуры возникают в литосфере под влиянием эндогенных, космогенных и экзогенных процессов.

По размерам кольцевые структуры можно подразделить на пять классов (табл. 8):

- 1) мегаструктуры (многие сотни — первые тысячи километров);
- 2) макроструктуры (первые сотни километров);
- 3) мезоструктуры (многие десятки, до 150 км);
- 4) министроструктуры (первые десятки километров);
- 5) микроструктуры (до 10—15 км).

Среди генетических типов кольцевых структур выделены структуры *сложного генезиса (полигенные) и моногенные*. Последние разделяются на *тектоногенные, метаморфогенные и магматогенные*. Магматогенные структуры могут быть связаны с подкоровым и ко-

Классы размерности	Полигенные	Моногенные								
		Метаморфо- генные	Магматогенные				Тектогенные	Экзо- генные	Ксеноген- ные	
			Связанные с подкоровым магматизмом		Связанные с коровым магматизмом					
Мегаструк- туры	Нуклеарные мантийно- очаговые	—	—		—	Вулкано- плутониче- ские	—	—	—	
Макрострук- туры		Гнейсовые складчатые овалы	Плутонические габброанорто- зитовых, щел- очно-основных и щелочно-ульт- раосновных интрузий		Плутониче- ские — грани- тоидных ин- трузий					
Мезострук- туры	—	Гранито- гнейсовые купола								
Министрук- туры		—	Плутониче- ские — щелоч- ных, карбонат- ных, кимберли- товых	Вулкани- ческие — трапповых по- лей	—	Вулканиче- ские — кон- тиненталь- ных, крае- вых и остро- воздушных вулканиче- ских поясов	Отрица- тельные: синекли- зы, впа- дины, мульды	Положите- льные: сво- довые и ва- лообразные поднятия, брахиантик- линали		
Микрострук- туры								Диапиро- вые — со- ляных мас- сивов, соля- ных и гли- няных диа- пиров	Рота- цион- ные	Карсто- вые во- ронки, провалы и др.

ровым магматизмом, а по форме проявления магматизма — относиться к *вулканическим* (вулканоплутоническим) и *плутоническим*. Перечисленные генетические разновидности связаны с эндогенными внутренними процессами формирования и развития литосферы Земли. Внешними по отношению к планете явлениями — падениями метеоритов — порождаются *импактные* (космогенные или ксеногенные) кольцевые структуры и некоторые экзогенные микроструктуры, например, карстовые и др. В тех случаях, когда геологических материалов недостаточно для генетической интерпретации структур, предусматривается выделение кольцевых структур *неустановленного генезиса*.

При сопоставлении кольцевых структур с геологическими образованиями разных размеров, рангов и происхождения устанавливается, что мега- и макроструктуры имеют, как правило, сложное происхождение (полигенные) и формируются в течение длительного геологического времени (миллиарды лет) под влиянием тесно переплетающихся и взаимно обусловленных процессов метаморфизма, магматизма и тектоногенеза. Мезоструктуры (и некоторая часть макроструктур) преимущественно моногенные и их формирование может быть увязано с действием одного ведущего геологического фактора.

К мега- и макроструктурам *сложного генезиса* относятся структуры наиболее древней, нуклеарной стадии геологической истории Земли, начавшейся около 4 млрд. лет назад и следовавшей непосредственно за «лунной» (догеологической) стадией аккреции планеты. Крупнейшие кольцевые структуры Земли, начавшие в это время свое развитие в виде сложных овоидно-кольцевых систем, получили название «*нуклеаров*». Выделяются две основные структурные разновидности нуклеаров — *антиформная* и *синформная*. Первая характеризуется приближенным к поверхности положением границы Мохоровичича, преобладанием в составе литосферы тяжелых гипербазит-базитовых пород, тенденциями к тектоническим опусканиям и положительными глубинными аномалиями силы тяжести больших площадей. Синформная разновидность сопровождается погружениями поверхности Мохоровичича, значительными мощностями кислого гранитно-метаморфического слоя и глубинными отрицательными гравитационными аномалиями.

Другой разновидностью структур сложного генезиса являются мантийно-очаговые структуры — мантийные или астеносферные диапиры. Над диапирами формируется утоненная кора в мезозое и кайнозое, а по периферии — складчатые системы с дугообразными поворотами осей крупнейших складчатых структур. Примерами таких структур являются Паннонская впадина, дуги моря Банда, моря Скота и др.

**Метаморфогенные** кольцевые структуры представлены макро-, мезо- и микроструктурами. Метаморфогенные кольцевые структуры разделены на *гнейсовые складчатые овалы*, представленные макроструктурами, и *гранитогнейсовые купола*.

Гнейсовые складчатые овалы располагаются обычно в пределах

дофанерозойской гранитно-метаморфической коры. Центральные части сложены часто архейско-раннепротерозойскими толщами. Метаморфические толщи и рисунок гидросети имеют концентрические очертания. Во многих случаях установлено омоложение радиологического возраста метаморфических толщ от центра к периферии гнейсовых складчатых овалов, что позволяет трактовать их в качестве древних центров аккумуляции кислого гранитного материала в литосфере.

Гранитогнейсовые купола обычно имеют средне-позднепротерозойский возраст и связаны с процессами гранитизации и магматического диапиризма, наложенными на более древний субстрат протометаморфической коры и являющимися вещественным выражением созревания континентального гранитно-метаморфического слоя. Гранитогнейсовые купола часто располагаются в виде спутников вокруг гнейсовых складчатых овалов или нуклеаров, реже — хаотическими группами. Строение кольцевых структур характеризуется преобладанием в их контуре гнейсогранитов, гранитов, гранодиоритов и мигматитов как палингенного, так и собственно магматического происхождения.

Как гнейсовые складчатые овалы, так и гранитогнейсовые купола во многих случаях удается обнаружить и под чехлом на плитах древних платформ. Кольцевые структуры, дешифрирующиеся по материалам дистанционных съемок, сопровождаются дифференцированными гравитационными и магнитными полями с явными чертами концентрического плана; с кольцевыми структурами связаны преимущественно отрицательные гравитационные и магнитные аномальные поля, контуры которых конформны кольцевым структурам.

На участках древней континентальной коры, переработанной в фанерозойских складчатых поясах, как гнейсовые складчатые овалы, так и гранитогнейсовые купола часто сохраняются, особенно в пределах срединных массивов и крупных антиклинорий, и претерпевают постумное развитие как магматогенные и тектоногенные кольцевые структуры. Обычно такие структуры существенно влияют на тектонический план и характер структур палеозойских и мезозойско-кайнозойских образований. В других случаях метаморфогенные кольцевые структуры полностью разрушаются или от них остаются лишь незначительные сегментарные фрагменты.

Магматогенные кольцевые структуры могут быть генетически связаны как с *подкоровым*, так и с *коровым* магматизмом. Первые располагаются почти исключительно на древних платформах (особенно полно представлены они на Африкано-Аравийском кратоне). Вторые развиты преимущественно в фанерозойских складчатых поясах и часто характеризуются полосовым распространением, образуя цепи, вытянутые вдоль простирания складчатых систем.

Магматогенные кольцевые структуры делятся также на плутонические, вулканические и вулканоплутонические.

Плутонические кольцевые структуры, связанные с подкоровым магматизмом, известны преимущественно на Африкано-Аравийском кратоне. Наиболее крупные (до 200 км) мезо- и министруктуры свя-

заны с внедрением габброанортозитовых и щелочно-ультраосновных магм и сопровождаются такие образования, как Бушвельдский комплекс (три кольцевые структуры, расположенные цепочкой), массив Манама на Мадагаскаре, Хибинский и Ловозерский плутоны на Балтийском щите. Возраст их колеблется от раннепротерозойского до палеозойского.

С внедрением щелочных подкоровых магм, карбонатитов, а также кимберлитов палеозойского, мезозойского и кайнозойского возраста связаны преимущественно микроструктуры. Среди интрузий, обусловивших формирование этих кольцевых структур, присутствуют, наряду с небольшими штоками и диатремами, также кольцевые и конические интрузии, такие, как известные комплексы Салала в Судане, Мул на Британских островах, Кондёр в Сибири и др.

Коровый гранитоидный магматизм распространен на континентах очень широко и порождает около половины всех известных в настоящее время кольцевых структур. Он развивается как в пределах дофанерозойской континентальной коры древних платформ, так и в фанерозойских складчатых поясах.

Плутонические кольцевые структуры порождаются коровым гранитоидным плутонизмом как приповерхностным, так и скрытым в приповерхностных частях литосферы. Они сопровождаются очень широким спектром интрузий коровых магм от габбродииоритовых и диоритовых через плагиигранитовые, гранодиоритовые и нормально-гранитные вплоть до интрузий аляскитового и щелочно-гранитного состава. Форма интрузий, с которыми связаны плутонические кольцевые структуры, разнообразна: крупные батолиты, мощные трещинные интрузии, крупные изометричные штоки, кольцевые и конические интрузии.

По взаимоотношениям контуров кольцевых структур с контурами плутонов на их эрозионном срезе В. А. Буш выделяет три разновидности: *эндоплутонические* кольцевые структуры, лежащие целиком внутри эрозионного контура гранитного плутона; *периплутонические* — совпадающие с контуром выхода плутона за исключением мелких изгибов и *экзоплутонические* — с выходами гранитоидов в центральной части или когда интрузия вовсе не вскрыта эрозией, но ее присутствие устанавливается по косвенным геологическим данным или же геофизическим зондированием.

Вулканические и вулканоплутонические кольцевые структуры, связанные с подкоровым магматизмом, весьма характерны для трапповых полей древних платформ. Особенно полно представлены они в Деканском трапповом поле Индостана и Тунгусском трапповом поле Сибирской платформы. Обычно эти структуры небольшого (до 100—150 км) диаметра; иногда расположены в зонах глубинных разломов. К этим кольцевым структурам приурочены древние размытые щитовые вулканы и центры излияний, а также корневые зоны крупных трапповых силлов. Сложный полифациальный состав трапповой формации делает невозможным дифференциацию вулканических и вулканоплутонических кольцевых структур без специальных исследований.

Вторая группа кольцевых структур этого подтипа тяготеет к кайнозойским областям рифтогенеза и хорошо представлена в зоне Великих Африканских рифтов. Собственно вулканические базальтовые кальдеры неоген-четвертичного возраста лежат преимущественно в рифтовых долинах. Предрифтовый палеоген-неогеновый вулканизм порождает в основном кольцевые структуры, связанные с крупными стратовулканами смешанного (толеит-базальтового, андезитового до щелочно-риолитового) состава, обрамляющие сводовые поднятия и хорошо представленные в Эфиопской вулканической провинции. В поперечнике такие стратовулканы в окрестностях оз. Тана достигают 150 км: более крупных стратовулканов на других континентах пока не установлено. Для стратовулканов характерны концентрически-радиальное строение сопровождающих их кольцевых структур и слабая выраженность кольцевых элементов.

Вулканические кольцевые структуры, связанные с коровым магматизмом, представлены всеми структурными классами, кроме мегаструктур. Макроструктуры среди них достаточно редки. Преобладают здесь мезо- и министруктуры, типичны и микроструктуры, приуроченные преимущественно к фанерозойской континентальной коре в вулканических поясах мезозойского и кайнозойского возраста. Именно кольцевые структуры и формируют основные черты структурного плана этих поясов.

Меньшее количество аналогичных вулканических кольцевых структур обнаружено в позднепалеозойских и девонских вулканических поясах, служивших обрамлением океана Тетис и более древних океанических структур Урало-Монгольского складчатого пояса. По-видимому, это связано со степенью сохранности таких кольцевых структур.

Много вулканических кольцевых структур располагается и в современных вулканических островных дугах, хотя плотность их ниже. Это связано как с маскирующим влиянием современных вулканических накоплений, так и с иными структурно-тектоническими условиями.

Вулканические толщи складчатых поясов представлены чередующимися (часто ритмично) покровами лав, туфов, вулканогенно-осадочных накоплений базальтового, андезитового и дацит-риолитового до субщелочного состава, прорванными субвулканическими телами, экструзивными и интрузивными куполами и массивами комагматичных вулканитам гранитоидов. Внешние концентры вулканоструктур обычно совпадают с циркуобразными системами нормальных сбросов, по которым внутренние части структур испытывают пассивное проседание над опорожняющимися магматическими очагами.

Среди вулканических кольцевых структур, связанных с коровым магматизмом, наиболее крупные (до 150—200 км) — вулканические (частично, видимо, вулканотектонические) депрессии, представляющие собой обширные мультисегментные прогибы округлой или овальной формы, часто сопровождаемые радиальной системой разломов. В центральных частях таких прогибов располагается груп-

па стратовулканов или щитовых вулканов, обеспечивающих накопление вулканических толщ. Содержание лавовых фаций в центрах депрессий максимальное. В центральных частях наиболее эродированных вулканических депрессий обычно располагаются группы гранитоидных плутонов, комагматичных по составу эффузивным толщам. Видимо, эти интрузии представляют собой верхнюю вскрытую часть магматического очага. Таким образом, вулканические мезоструктуры в значительной мере полигенные (вулкано-тектонно-плутонические) образования, принадлежащие отрицательным структурным формам.

Положительные вулкано-плутонические структуры еще слабо изучены. Обычно они представляют собой обширные поднятия коренного ложа вулканических поясов, перекрыты относительно маломощным, преимущественно туфогенным плащом и сопровождаются массовыми интрузиями гранитоидов, комагматичных вулканическим толщам. Такого рода структуры известны в девонских и позднепалеозойских складчатых поясах Казахстана и Монголии. Они редко сопровождаются кольцевыми структурами и связаны, как правило, с плутонами.

Вулканические министрuctуры распространены в вулканических поясах очень широко. Они группируются в центральных частях вулканических депрессий либо образуют структуры-сателлиты вдоль их периферии. Часто такие кольцевые структуры приурочены к пересечениям радиальных или секущих разломов с внешними концентрациями вулканических мезоструктур. Обычно они связаны с вулканическими аппаратами, представляя собой кальдеры крупных вулканов (типа Монте-Сомсы на Везувии, Арагаца в Армении, Авачинской, Узона на Камчатке и др.) или же отдельные крупные стратовулканы — Этна (более 80 км в поперечнике), Арарат, Демавенд, Ключевская сопка. Наиболее крупные из стратовулканов достигают размеров мезоструктур. Подавляющее число министрuctур связано с моногенными вулканическими аппаратами и сопровождающими их системами конических и радиальных даек.

Вулканические микроструктуры в коровых вулканических поясах также распространены очень широко. Они совпадают, как правило, с небольшими вулканическими структурами (некками, моногенными аппаратами, шлаковыми конусами, мелкими щитовыми вулканами) или с вулкано-плутоническими образованиями.

Тектоногенные кольцевые структуры представлены всеми структурными классами за исключением мегаструктур. Они формируются преимущественно под влиянием вертикальных тектонических движений; вопрос о связи кольцевых структур с горизонтальными тектоническими движениями еще недостаточно изучен, но, видимо, кольцевые структуры, обусловленные последними, все же присутствуют на континентах, хотя достоверно выделены пока не могут быть.

К тектоническим относятся *диапировые* кольцевые структуры, присутствующие во многих солянокупольных бассейнах. Наиболее крупные диапировые кольцевые структуры могут соответствовать обширным поднятиям подсолевого ложа и соляным массивам, мел-

кие (моноструктуры) — отдельным, преимущественно прорванным соляным куполам.

В строении тектоногенных кольцевых структур ведущую роль могут играть как пликативные (складчатые), так и дизъюнктивные (разрывные) дислокации. В целом дизъюнктивные тектоногенные кольцевые структуры («ринг-блоки»), видимо, играют все же резко подчиненную роль. Некоторые из них принадлежат к числу так называемых «ротационных структур», порожденных горизонтальным поворотом блоков под действием пары тектонических горизонтальных сил. Однако такие структуры пока обнаружены лишь в единичных случаях.

Большинство тектоногенных кольцевых структур связано с процессами платформенного тектогенеза и составляет основное число положительных и отрицательных кольцевых структур плит древних и молодых платформ на всех материках (рис. 58). Вторую большую группу тектоногенных кольцевых структур составляют структуры, порожденные новейшим неоген-четвертичным орогеническим тектогенезом и располагающиеся в пределах как орогенических впадин, так и поднятий. Во впадинах установлены как положительные, так и отрицательные формы; на поднятиях выделяются пока только положительные структуры, совпадающие с контурами наиболее значительных по амплитуде и размерам неотектонических поднятий или с периклинальными погружениями складчатых систем, как, например, на южном окончании Аппалачей. Среди макроструктур преобладают отрицательные кольцевые структуры; мезоструктуры обеих морфологических разновидностей присутствуют примерно в одинаковых количествах; среди моноструктур преобладают положительные. Причины таких соотношений неясны.

**Импактные** кольцевые структуры — астроблемы, сохранившиеся в настоящее время на поверхности континентов, принадлежат к микроструктурам. Их количество и пространственное распределение являются функцией степени геологической изученности территории. Так, в Северной Америке и Европе импактных кольцевых структур несколько десятков, в Южной Америке и зарубежной Азии — единицы.

Кольцевые структуры неустоявшегося генезиса по особенностям морфологии аналогичны рассмотренным выше кольцевым структурам, но геологических материалов для уверенной их генетической интерпретации оказы-

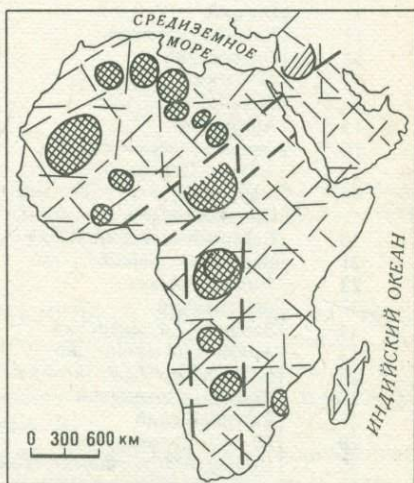


Рис. 58. Тектоногенные кольцевые структуры Африки, связанные с образованием молодых впадин. По Е. Д. Сулиди-Кондратьеву.

вается недостаточно. Таким образом, при дальнейшем изучении они могут быть отнесены к тем или иным из охарактеризованных генетическим типам.

#### 10.4. Древнейшие кольцевые структуры Земли — нуклеары

В результате дешифрирования МДЗ, последующего анализа геолого-геофизических данных и исследований морфологическими методами в пределах древних платформ выявлено большое число крупных овоидно-кольцевых систем, представляющих собой сложное сочетание концентрически-кольцевых структур и дуговых линеаментов большого диаметра (500—3800 км) с подобными же структурными формами меньших размеров (100—900 км), располагающихся преимущественно по периферии главного овоида в виде спутников. Сочетание их с радиальными линеаментами создает сложную, но закономерную

Таблица 9

Нуклеары континентов Земли

Номер на рис. 63	Наименование нуклеаров	Размеры по максимальной оси, км	Метод выявления *
1	Северо-Американский	3800	Г, М, КС
2	Колорадский	2000	М, Г
3	Свеконорвежский	900	КС, Г
4	Свекофеннокарельский	1300	КС, Г
5	Кольско-Лапландский	550	КС
6	Прибалтийский	500	КС, Г
7	Скифский (Днепровский)	1000	М, Г
8	Сарматский (Верхневолжский)	1000	М
9	Прикаспийский	750	КС, М, Г
10	Обский	1500	КС, М, Г
11	Хета-Оленёкский	1100	КС, Г, М
12	Оленёкский	500	КС, Г, М
13	Тюнгский	500	КС, Г
14	Вилуйский	750	КС, Г
15	Ангарский	900	М, КС
16	Витимо-Олёкминский	800	Г, КС
17	Алдано-Становой	1300	Г, М, КС
18	Амурский	1400	КС, Г
19	Синокорейский	600	Г, М
20	Северо-Китайский	800	Г, М
21	Южно-Китайский	1200	Г, М
22	Индокитайский	750	Г
23	Амазонский	3200	М
24	Западно-Африканский	3600	Г
25	Аравийско-Нубийский	2200	Г, КС
26	Центрально-Африканский	2800	Г, КС
27	Сомалийско-Аравийский	1700	КС, Г
28	Танзанийский	1400	КС, Г
29	Южно-Африканский	2400	КС, Г
30	Дарваро-Мозамбикско-Пилбарский (Пилбара)	1700	Г, КС
31	Индо-Австралийский (Северо-Австралийский)	2400	Г
32	Йилгарнский	1200	Г
33	Юклинский (Гоулер)	1200	Г

\* КС — космические снимки, Г — геолого-геофизические и М — геолого-морфологические данные.

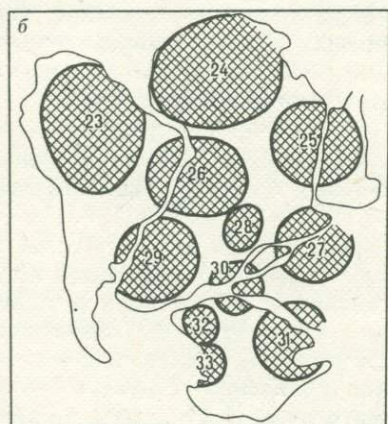
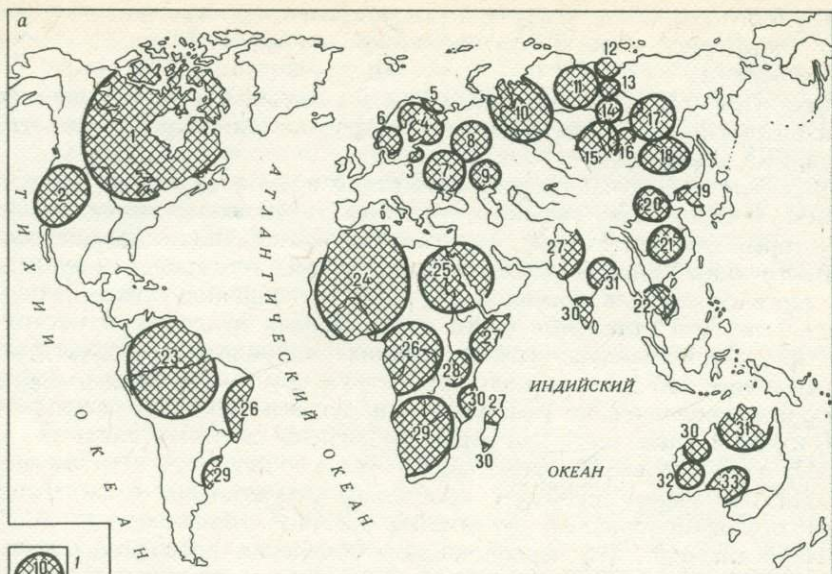


Рис. 59. Схема расположения нуклеаров Земли (а). Палинспастическая схема нуклеаров Гондваны (б).

1—33 — нуклеары см. в табл. 10.

картину. Обладающие центральной симметрией докембрийские структурно-вещественные комплексы, формирующие первые сиалические ядра материковой коры, были названы Е. В. Павловским и М. З. Глуховским нуклеарами. В настоящее время в пределах древних платформ выделяется 33 нуклеара (рис. 59, табл. 9).

Наиболее детально нуклеары изучены на Сибирской платформе, Балтийском щите и, частично, на Северо-Американской платформе.

На основании комплексной геолого-геофизической интерпретации материалов космических съемок, в пределах фундамента Сибирской платформы М. З. Глуховским выделено восемь нуклеаров. Часть из них была выделена ранее морфоструктурным методом и названа геоконами.

На Балтийском щите изучено три нуклеара, на Северо-Американской платформе — два, в том числе один из крупнейших — Северо-американский.

Все эти структуры, вероятно, являются древнейшими кольцевыми образованиями на Земле. Процессы их формирования носили много-стадийный характер.

Выявление и изучение нуклеаров стало возможным лишь с появлением космических снимков глобального уровня генерализации, на которых они достаточно отчетливо выражены. Палинспастическая реконструкция Гондваны позволила установить, что площадь нуклеаров здесь составляла примерно 70—75% от общей площади суперконтинента, что отдельные части ранее единых нуклеаров в настоящее время устанавливаются на соседних материках. Это свидетельствует о том, что древние кольцевые структуры — нуклеары — в фанерозое раскололись по радиальным и дуговым швам, в результате чего их отдельные части оказались на разных континентах.

Изучение нуклеаров имеет очень важное значение, так как позволяет по-новому подойти к проблемам структурного и минерагенического районирования фундамента древних платформ.

Не исключено, что первопричиной появления древнейших кольцевых структур-гигантов является интенсивная метеоритная бомбардировка поверхности Земли на рубеже около 4 млрд. лет, как это наблюдалось на остальных планетных телах земной группы.

## 10.5. Распространенность разных типов кольцевых структур

Статистическая обработка данных стала возможна лишь после составления специальной карты кольцевых структур континентов Земли.

Так, например, В. А. Бушем и Е. Д. Сулиди-Кондратьевым в южной и восточной Азии в пределах Урало-Монголо-Охотского складчатого пояса, пояса Тетис, Китайской и Индостанской платформ было установлено 983 кольцевые структуры; на Африкано-Аравийском кратоне — 752 кольцевых структуры. Оказалось, что из числа генетически интерпретированных кольцевых структур 58 и 53% соответственно относятся к магматогенным; 33 и 26% — принадлежат к тектоногенным. На территориях древних платформ около 25% кольцевых структур относится к метаморфогенным. Количество плутонических кольцевых структур на древних платформах меньше (13%) по сравнению с фанерозойскими складчатыми поясами (37%), зато количество метаморфогенных кольцевых структур в складчатых поясах (5%) сильно уступает таковым на древних платформах (24,5%). На докембрийской коре магматогенных подкоровых кольцевых структур — 30%, магматогенных коровых кольцевых структур — 22%, а на фанерозойской коре подкоровых кольцевых структур — 1%, коровых — 56%. Вулканические кольцевые структуры в целом уступают плутоническим: их доля колеблется от 23% в Африке и Аравии до 34% в фанерозойских поясах Азии от общего числа магматогенных структур. Заметно различное

соотношение положительных и отрицательных тектоногенных кольцевых структур в Африке и Аравии (29 : 71) и в Азии (65 : 35).

Наиболее достоверными данными статистического анализа следует признать количество магматогенных кольцевых структур, равное 50—60%, и тектоногенных кольцевых структур — 25—30%, видимо, характерное для континентальной коры вообще. Остальные выводы легко объясняются особенностями проявления геологических процессов на докембрийской и фанерозойской коре. Исключение представляет только устойчивый тренд в соотношении положительных и отрицательных тектоногенных кольцевых структур, требующий специального изучения.

## 10.6. Некоторые проблемы взаимосвязи кольцевых структур и линеаментов

Генетические и пространственные связи кольцевых структур с линеаментами сложны и многообразны. Первые шаги в области их изучения были предприняты О. М. Борисовым и А. К. Глухом, В. Н. Брюхановым и В. М. Моралевым, В. И. Макаровым и Л. И. Соловьевой, В. В. Соловьевым и др. К сожалению, эта проблема остается до конца не изученной. Кольцевые структуры и линеаменты, как правило, связаны между собой, но обычно разделены по времени формирования. Представляется возможным выделение трех видов связей между кольцевыми структурами и линеаментами:

1) линеаменты являются структурами первичными, а кольцевые структуры — вторичными;

2) кольцевые структуры и линеаменты образуются одновременно и тесно генетически взаимосвязаны;

3) кольцевые структуры — первичны, а линеаменты — вторичны.

1. Наиболее распространен в природе случай, когда одиночный линеамент или линеаментная зона, являясь первичными, возбуждают последующие геологические процессы, например образование вулканических аппаратов.

Анализ кольцевых структур вулканического генезиса наглядно свидетельствует, что все они тесно связаны с линеаментной тектоникой не только на Земле, но и на других планетах. Связь современных вулканических построек с линеаментами четко прослеживается на Камчатке и в других районах, где развита современная вулканическая деятельность. Эта же связь отмечается и на древних вулканических областях на всех континентах земного шара. На Марсе отдешифрировано несколько крупных линеаментов глобального порядка, также контролирующих расположение основных щитовых вулканов этой планеты — Олимпа, Арсии, Павлина, Аскрийского и др.

Вулканическая деятельность обычно связывается с линейными структурами глубинного заложения и активизированными на различных этапах развития Земли.

На Кавказе, в Средней Азии и в других регионах земного шара мелкие кольцевые структуры, представляющие собой грязевые вулканы, также непосредственно связаны с линеаментами. С ними, осо-

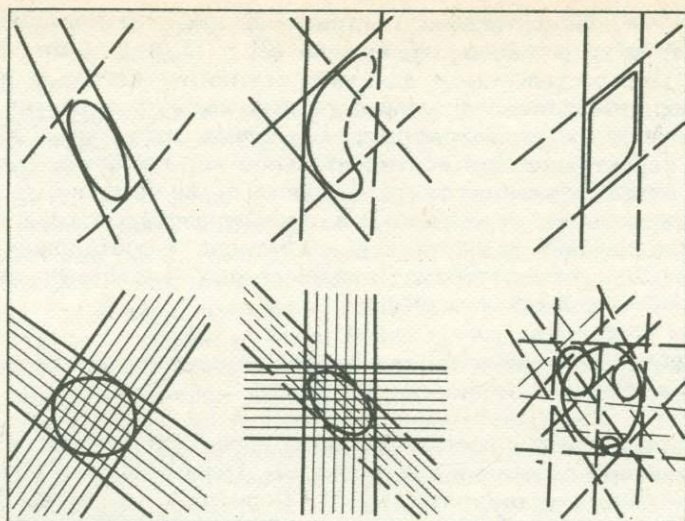


Рис. 60. Схема, иллюстрирующая зависимость конфигурации кольцевых структур от характера пересекающихся линеаментов. По В. И. Макарову и Л. И. Соловьевой.

бенно в районах развития соляно-купольной тектоники, связывается и диапиризм, также обуславливающий формирование кольцевых структур.

Распространен вариант, когда в узле пересечения трех и более линеаментов образуется кольцевая структура. В этом случае линеаменты также следует рассматривать в качестве первичных структур, а кольцевые образования — вторичными. Размеры кольцевой структуры, заложенной в линеаментном узле, прямо пропорциональны расстоянию между отдельными линеаментами, а ее форма зависит от числа линеаментов, образующих узел.

В. И. Макаров и Л. И. Соловьева, анализируя по КС перекрестный структурный план земной коры в районе Тянь-Шаня и на смежных с ним территориях, пришли к выводу, что конфигурация тектонических впадин и поднятий предопределена тем, что они как бы вписаны в решетку пересекающихся линеаментов, принадлежащих различным направлениям (рис. 60).

Некоторые исследователи на примере Дальнего Востока установили, что кольцевые структуры чаще располагаются у окончания линеаментов. Механизм этого явления пока не исследован.

2. Образование линеаментов и кольцевых структур может быть обусловлено процессами, когда оба типа этих структур образуются одновременно. Так, например, выявлено, что крупнейшие кольцевые структуры Памиро-Алая образованы в результате движений блоков, выколотых двумя парами пересекающихся сдвигов, чем объясняется образование кольцевых форм.

В другом случае линеаменты следует рассматривать как части кольцевых структур гигантских радиусов, например нуклеаров.

3. Третий тип связей между кольцевыми структурами и линеаментами обусловлен процессами рифтогенеза. Наиболее крупные рифты приурочены к осевым частям длительно развивающихся сводовых поднятий, отраженных на мелкомасштабных космических снимках как кольцевые структуры. Деформации, связанные с растягивающими усилиями, предопределяют разломы в земной коре и образование рифтов.

В качестве примера рассмотрим строение рифта Красного моря. Он расположен в осевой части кольцевой структуры, представляющей собой огромное сводовое поднятие, сложенное метаморфическими породами Африкано-Аравийской платформы. Рифтовая структура Красного моря, ограниченная продольными сбросами, расположена на расстоянии 100—200 км друг от друга, осложнена еще двумя системами сбросов, находящихся в 15—40 км друг от друга и ограничивающих осевой трог. Начало образования рифта относится к позднемеловой эпохе. Породы, выполняющие рифт, имеют позднеолигоценый — четвертичный возраст.

Все особенности строения Красноморского рифта свидетельствуют о том, что рифтогенез связан с явлениями растяжения земной коры и последующего ее обрушения, т. е. процесс линеаментогенеза следует рассматривать как вторичный, последующий за образованием поднятия, отраженного на КС в виде кольцевой структуры.

Линеаменты могут явиться вторичными образованиями по отношению к кольцевым структурам в ряде вулканических провинций. Так, например, на юго-востоке Камчатки детально изучена Калачевская вулканическая купольно-кольцевая структура, имеющая в поперечнике 200 км и, как показывают геофизические данные, достигающая 150—200 км глубины. В осевой части Калачевская структура осложнена термальным рифтом, а в пределах суши — линейными складчатыми структурами. Происхождение Калачевской структуры связывается с всплытием диапира (астенолита), обусловившим изометрично-концентрическую зональность с образованием последующих тектонических линейных блоков.

Изложенный материал наглядно свидетельствует о сложности взаимосвязей кольцевых структур и линеаментов и о необходимости дальнейших исследований для более тщательного изучения затронутой проблемы.

## 10.7. Сравнительный анализ кольцевых структур Земли и других планет

Кольцевые структуры играют первостепенную роль в строении литосферы некоторых планет Солнечной системы. Они установлены на Луне, Марсе, Меркурии, Венере, спутниках Юпитера и других небесных телах.

Изучение кольцевых структур Марса позволило выделить среди них два генетических класса, аналогичных установленным в литосфере Земли: импактный и магматогенный.

Если на Земле импактным кольцевым структурам принадлежит подчиненная роль, то на других планетах, в частности на Луне и на Марсе, они являются ведущими. Импактные кратеры здесь распространены чрезвычайно широко. Большое значение для установления относительного возраста различных частей поверхности планеты играет плотность кратерирования: чем древнее поверхность, тем большее количество соударений с метеоритными телами она должна была испытать. Этим способом на некоторых планетах земной группы удалось выделить разновозрастные поверхности. Так, например, по плотности кратерирования Марс делится на две части: северную, относительно более позднюю, слабо кратерированную и южную, древнюю, интенсивно кратерированную. Кратеры Марса, так же как и Луны, различаются по размерам, строению и степени разрушенности. Их морфология зависит от размеров, варьирующих в очень широких пределах. При малых диаметрах (3—5 км) кратеры имеют простое строение, при диаметрах 5—15 км их форма усложняется: появляется кольцевой вал и центральная горка. Кратеры диаметром 50—80 км обрамляются кольцевым валом сложного строения и усложняются одной или несколькими центральными горками. По периферии кратеров на КС видны обширные выбросы материала при взрыве.

Кратеры малых диаметров имеют простой плоскодонный профиль; форма профиля крупных кратеров усложняется за счет террасирования склонов, появления центральных горок.

По степени сохранности кратеров Марса выделяют различные их возрастные генерации. Агентами разрушения кратеров являются экзогенные процессы — гравитационные, криогенные, эоловые, флювиальные и пр. — и эндогенные процессы — лавовая эрозия и тектонические движения.

По степени разрушенности кратеров Марса выделяются четыре возрастных генерации: королевская (самая поздняя), ломоносовская, кеплеровская и ньютонская.

На Луне выделяется три группы импактных кратеров: коперниковская (самая поздняя), птолемеяевская и доптолемеяевская.

В настоящее время составлены специальные карты плотностей кратерирования планет, на которых выделены разновозрастные структуры. Таким образом, изучение кольцевых структур планет, в частности Луны и Марса, имеет большое значение для относительной датировки их главнейших структур.

В отличие от импактных структур магматогенные кольцевые структуры на Марсе немногочисленны. Они представлены огромными по размерам щитовыми вулканами: Олимп, Арсия, Альба, Аскрийский и др.

Наиболее ярким представителем является вулкан Олимп, образующий кольцевую структуру диаметром свыше 600 км. Его вулканический кратер достигает размеров 60 км, а относительная высота этого вулканического сооружения достигает 24—25 км. Другие вулканические аппараты на Марсе имеют меньшие размеры, и тем не менее они во много раз превышают размеры земных вулканов.

Наиболее крупные вулканические сооружения Марса расположены в центре огромного сводового поднятия и вытянуты в цепочку северо-восточного простираения вдоль линеамента протяженностью около 1800 км. У многих из щитовых вулканов Марса, как и на Земле, дешифрируются дуговые разломы.

Изложенные сведения о кольцевых структурах Луны и Марса наглядно показывают, что они по своим характеристикам укладываются в принятую схему классификации кольцевых структур Земли и отличаются от них только в количественном отношении. Выявляется их большая роль при относительной датировке структурных поверхностей планетных тел.

### *Вопросы для самопроверки*

1. Назовите методы выявления и изучения кольцевых структур.
2. Какие принципы положены в основу классификации кольцевых структур?
3. Чем отличаются нуклеары от других кольцевых структур Земли?
4. Существует ли взаимосвязь между кольцевыми структурами Земли и линеаментами?

## Глава 11

### ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МАТЕРИАЛОВ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ В ТЕКТОНИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЯХ

#### 11.1. Применение космической информации в тектонических исследованиях Земли

Вопросам использования КС в тектонических построениях посвящены работы многих исследователей — В. А. Буша, В. В. Козлова, В. И. Макарова, Л. М. Расцветаева, В. Г. Трифонова и др.

Обзорность и генерализация космических изображений позволяют использовать их при решении современных тектонических проблем:

- 1) исследования глубинной тектоники земной коры в целом;
- 2) выяснения тектонического плана основных геотектонических элементов платформ, щитов, складчатых и вулканических поясов и т. д.;
- 3) изучения разрывных нарушений земной коры разного ранга;
- 4) анализа складчатых структур и их соотношений с разрывными нарушениями, т. е. разрывно-складчатых ансамблей.

Изучение глубинного строения земной коры с помощью космической информации основано на уникальном свойстве КС — «рентгеноскопичности», т. е. своеобразного просвечивания глубинных тектонических структур сквозь покров более молодых недислоцированных или слабодислоцированных отложений. При этом, как показали

многократные сопоставления космических изображений с различными данными о глубинном строении земной коры, чем с большей дистанции ведется наблюдение, или чем меньше разрешение КС и, следовательно, больше его обзорность и сильнее генерализации, тем более глубокие деформации отражаются в ландшафтных особенностях земной поверхности. По сути, дешифрирование разномасштабных КС дает примерно такой же эффект, какой получается при пересчете геофизических полей на различные высотные уровни верхнего полупространства с целью выделения в наблюдаемых полях различных категорий региональных и частных (местных) составляющих.

«Рентгеноскопичность» КС позволила во многих областях Земли не только уточнить размеры и местоположение уже известных глубинных структур, но и выделить новые элементы глубинного строения. Это тем более важно, что с помощью КС можно исследовать глубинное строение земной коры вплоть до верхней мантии. Особенно важны такие работы в зонах сочленения крупных геотектонических областей, например древних платформ, замаскированных мощными дислоцированными складчатыми комплексами орогенных поясов.

Убедительным подтверждением данного положения может служить линейamentный рисунок альпийского горно-складчатого обрамления Восточно-Европейской платформы (см. рис. 44), прослеживающийся на всю толщу земной коры вплоть до поверхности Мохорoviчича и обусловленный, вероятно, каркасом глубинных неоднородностей так как: контролирует глубинное районирование земной коры, разделяя блоки, с различной глубиной залегания; трассирует границы блоков с разной глубиной залегания кристаллического фундамента (Северо-Западный и Юго-Восточный Кавказ); определяет основные границы Восточно-Европейской платформы и альпийского горно-складчатого обрамления; оконтуривает основные структурные элементы обрамления: мегантиклинории, синклинории, срединные массивы, межгорные прогибы и впадины; ограничивает зоны с различной сейсмической активностью и разными сейсмическими параметрами.

В целом линейamentный рисунок, установленный по данным КС и проверенный по комплексу геолого-геофизических данных, дает угловатые очертания границы между платформой и ее горно-складчатым обрамлением, в то время как поверхностная структура сочленения определяется субширотными границами альпийского пояса.

КС тектонических областей разного типа и возраста складчатости содержат различную геологическую информацию, отражая специфику геологического развития исследуемых областей, включая характер и интенсивность проявления новейших тектонических движений. Более того, для каждой конкретной тектонической области характерен определенный набор геологических объектов, наиболее полно и четко отображающихся на КС того или иного уровня генерализации.

При дешифрировании геологических объектов в условиях плит древних и молодых платформ требуются всесторонний анализ внеш-

них компонентов ландшафта и установление их корреляционных связей с литогенной основой.

На КС континентального уровня генерализации выделяются:

линейные структуры, отражающие, как правило, скрытые разломы разного ранга: трансконтинентальные и трансрегиональные, пересекающие как платформы, так и смежные складчатые области платформенного обрамления;

региональные — обнаруживающие связь со структурой поверхности фундамента плит и ограничивающие их основные структурные элементы, выступающие в роли тектонических блоков;

локальные — достаточно интенсивно проявляются в платформенном чехле;

площадные объекты, выделяющиеся по фотопоям и отвечающие в основном воздымающимся или погружающимся неотектоническим блокам;

кольцевые структуры, соответствующие крупным сводам фундамента;

системы крупных дуг длиной до 200—300 км, обычно не замкнутых в кольцо, параллельных друг другу и опирающихся одним из своих флангов на крупнейшие разломы, хотя соответствия их каким-либо структурным элементам платформенного чехла или фундамента пока не найдено.

На региональных КС наиболее четко дешифрируются кольцевые структуры диаметром в несколько десятков километров. Данные дешифрирования разномасштабных КС плит могут служить основой для тектонического районирования — трассирования и изучения геологической природы линеаментов, изучения площадных, кольцевых и дуговых структур, отдельных блоков фундамента, выявления региональных и локальных поднятий и прогибов.

**Щиты древних платформ.** Линейные объекты, как отмечалось в гл. 8, на континентальных КС представлены, во-первых, линеаментами, входящими в состав трансрегиональных линейных структур платформ, т. е. пересекающими территории щитов, имеющими относительно молодой возраст и слабо связанными с внутренним строением щитов; во-вторых, протяженными, узкими линейными структурами или зонами сближенных линеаментов, интерпретируемых, как глубинные разломы; в-третьих, частым чередованием субпараллельных, иногда кулисообразно расположенных полос различного фототона («след граблей»).

Среди площадных объектов дешифрируются крупные, в поперечнике до нескольких сотен километров, овалы, отличающиеся обычно более светлым фототонем и тесно связанные с крупнейшими кольцевыми системами древних щитов — нуклеарами.

Кольцевые структуры, являющиеся характерными элементами древних щитов, выражены обычно группами концентрически расположенных дуговых, реже овально-замкнутых линейных элементов.

Региональные и локальные КС позволяют детализировать строение глубинных разрывных структур, выделять составляющие их отдельные линейные элементы. Площадные объекты на снимках

данных уровней генерализации обычно связаны с кольцевыми структурами. На региональных КС крупнейшие кольцевые структуры распадаются на составляющие их линейные и дугообразные элементы.

Локальные и детальные КС содержат сведения о внутренней структуре складчато-метаморфических толщ и магматических тел щитов. В виде площадных объектов на них часто выделяются области развития наиболее контрастно различающихся по составу и степени метаморфизма структурно-вещественных комплексов, например граниты рапакиви, щелочные интрузии центрального типа и пр. Линейные структуры представлены диаклазами, т. е. трещинами без смещений, и относительно короткими (не более 20 км) малоамплитудными разрывными нарушениями — неотектоническими обновленными сбросами и сдвигами, группирующимися в зоны, соответствующие линейным структурам регионального ранга. Кольцевые структуры диаметром более 40—50 км на детальных снимках обычно дешифрируются фрагментарно: хорошо дешифрируются структуры с диаметром в первые километры, отвечающие магматическим телам различного состава.

Основные геологические объекты, изучаемые на древних щитах с помощью КС:

мегакольцевые системы как структуры первичной делимости земной коры, имеющие принципиально важное значение для тектонического районирования щитов;

площадная линейная полосчатость, с которой часто связаны гнейсогранитные структуры, некоторые грабены и т. д.;

разломы, и особенно узлы пересечения и сочленения радиальных нарушений с дугowymi элементами кольцевых структур, характеризующихся повышенной тектонической активностью и проницаемостью;

скрытые зоны тектонической активизации и унаследованно развивающиеся дуговые разломы, входящие в мегакольцевые системы, к которым могут быть приурочены интрузии щелочных и ультраосновных пород, в том числе и кимберлитов.

Кольцевые объекты на континентальных КС щитов молодых платформ обычно связаны с выходами глубокометаморфизованных пород кристаллического основания палеозойских складчатых систем или гранитоидных плутонов, а также с нескрытыми на современном срезе магматическими телами.

Линейные структуры на региональных КС обусловлены прямолинейными или слабо изогнутыми в плане разломами и зонами разломов, а также границами полей с различным фотоизображением.

Площадные объекты, выделяемые по фототону и фоторисунку, интерпретируются как крупные структурные формы, например антиклинории Полярного Урала, Урал-Тау и т. д.

Среди кольцевых структур дешифрируются наиболее типичные диаметром от 20 до 80 км, связанные с телами гранитоидов.

Линейные объекты на локальных КС интерпретируются обычно как разломы и зоны разломов с достаточно уверенной кинематической диагностикой сбросов, взбросов, сдвигов, а иногда и надвигов.

Кольцевые структуры соответствуют массивам гранитоидов или субвулканическим телам.

На КС детального уровня генерализации четко выделяются конкретные геологические тела со свойственной им внутренней структурой.

К основным тектоническим задачам, решение которых определяется информативностью разномасштабных КС щитов молодых платформ, относятся:

изучение особенностей региональной тектонической структуры складчатых поясов (например, Урала и Казахстана);

исследование глубинных и нескрытых геологических объектов;

выделение структурно-вещественных комплексов, преимущественно по КС регионального и локального уровней генерализации;

расчленение интрузивных образований (по материалам локальных и детальных съемок).

Значительная расчлененность рельефа орогенных областей существенно затрудняет применение КС. С другой стороны, интенсивные неотектонические движения горно-складчатых областей обусловили четкое отражение основных элементов новейшей тектоники.

Среди линейных структур на континентальных КС четко проявлены разрывы, разделяющие горные хребты и предгорные прогибы или межгорные депрессии. Некоторые разрывные нарушения известны по данным геологических съемок, другие дешифрируются впервые. Особый интерес представляют трансконтинентальные и трансрегиональные линеаменты, пересекающие горно-складчатые (трансорогенные) и равнинно-платформенные области. Площадные объекты, и особенно кольцевые структуры, из-за интенсивного эрозионного расчленения горно-складчатых областей дешифрируются и выделяются значительно труднее линейных.

На региональных КС линейные структуры отражают обновленные в новейшее время разрывы, площадные объекты — орографические и неотектонические элементы, а кольцевые структуры диаметром от 50 до 150 км совпадают с положительными или отрицательными орографическими элементами.

На КС локального уровня генерализации в качестве самостоятельно дешифрируемых объектов выступают вещественные комплексы и характерные структурные ассоциации, полнота выделения которых во многом зависит от степени расчлененности рельефа: в условиях среднегорья объекты дешифрирования выделяются на значительной части территории, а в районах альпинотипного рельефа — лишь на отдельных участках.

Линейные структуры хорошо распознаются и картируются в складчатых областях благодаря тому, что они выделяются по смещению границ вещественных комплексов и резкой смене фототона и рисунка изображений. Внутри вещественных и структурных комплексов линейные структуры, образующие разрывы и трещины, распознаются по приуроченности к ним уступов и борозд в рельефе, прямолинейных отрезков гидросети и резких границ смены растительности.

Кольцевые структуры, выделяющиеся на локальных КС, интерпретируются или как сводовые неотектонические поднятия, или как отражение нескрытых близповерхностных интрузий, или как вулканотектонические структуры в орогенных областях.

Таким образом, дешифрирование разномасштабных КС орогенных областей позволяет решить следующие основные задачи:

определить общие черты и особенности региональной структуры орогенических областей с выделением ранее не расшифрованных зон сочленения основных структурных элементов и крупных поперечных или диагональных (трансорогенных) линейных структур, не установленных традиционными методами съемки;

расшифровать элементы глубинного геологического строения с выявлением участков поднятого или опущенного фундамента, установлением закономерностей в размещении магматических тел и трассированием зон глубинных разломов;

выявить разрывные структуры — региональные надвиги и шарьяжи, связанные с крупными горизонтальными перемещениями масс горных пород;

изучить прикладное значение структурных факторов, контролирующих размещение оруденения и предопределяющих развитие современных эндогенных (сейсмичность, вулканизм) и экзогенных (оползни, обвалы, сели) геологических процессов в зонах сооружений объектов повышенной ответственности — высокогорных плотин и водохранилищ, трасс, дорог, трубо- и газопроводов и т. д.

Вулканические пояса на КС континентального и регионального уровней генерализации четко оконтуриваются по особенностям фотозображения, причем наиболее уверенно в тех случаях, когда их границы совпадают с разломами.

Линейные структуры на КС континентального и регионального уровней генерализации обычно отвечают глубинным разломам двух типов: параллельным простираанию вулканических поясов и поперечным к нему.

Площадные объекты на континентальных и региональных КС могут отражать поднятия древнего основания.

Наиболее крупные кольцевые структуры диаметром до 100 км и более четко дешифрируются по КС континентального и регионального уровней генерализации и часто выходят за пределы вулканических поясов.

На локальных КС дешифрируется большое количество линейных структур, связанных с общей сетью разломов и с кольцевыми структурами, вулканического происхождения.

В виде площадных объектов на локальных КС выделяются отдельные вулканотектонические депрессии, грабены, наложенные впадины, а также субвулканические тела, имеющие белесый фототон — участки, сложенные вулканогенно-осадочным комплексом с характерным тонкополосчатым рисунком, отдельные поля молодых плато базальтов и депрессии, выполненные игнимбритами.

Важнейшими тектоническими задачами при изучении вулканических поясов с помощью КС являются интерпретация продольных,

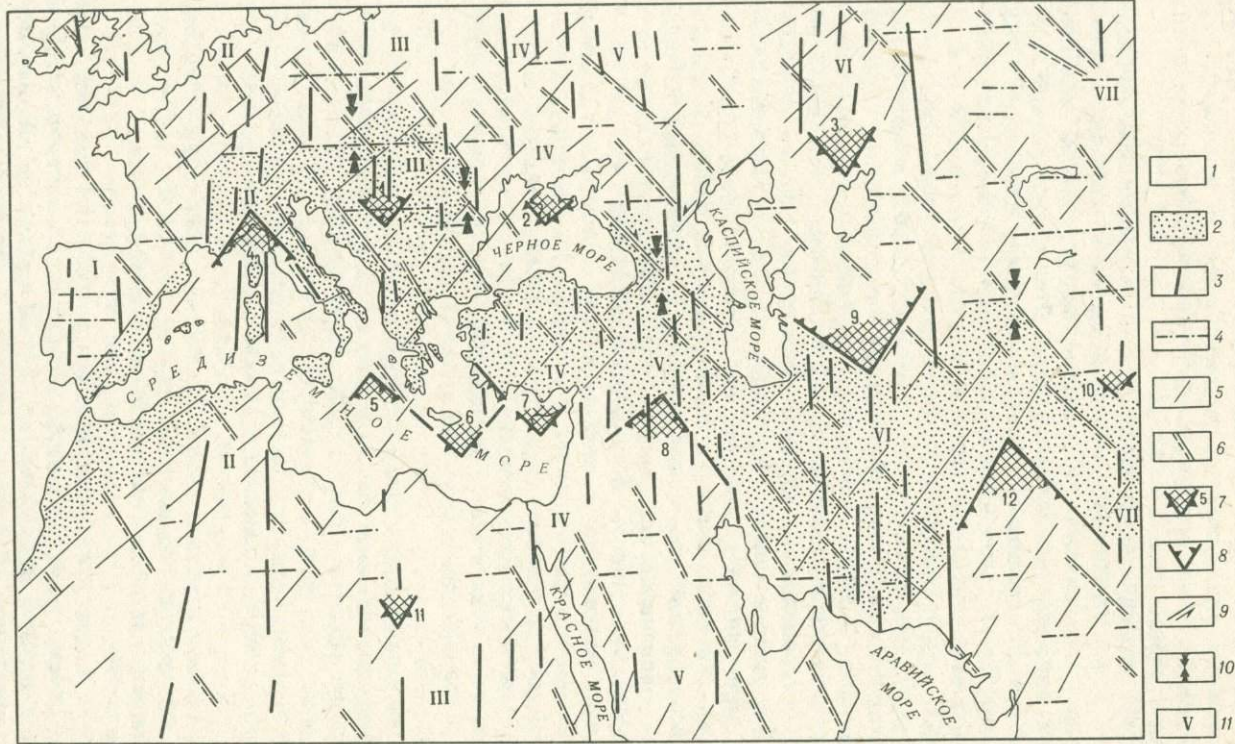


Рис. 61. Реконструкция зоны сочленения платформ Евразии и Гондваны:

1 — платформы; 2 — Средиземноморский складчатый пояс; 3—6 — линейменты и их простирания: 3 — субмеридиональные, 4 — субширотные, 5 — северо-восточные, 6 — северо-западные; 7 — клинья, образованные линейментами: 1 — Южно-Паннонский, 2 — Крымский, 3 — Южно-Уральский, 4 — Генуэзский, 5 — Северо-Ионический, 6 — Критский, 7 — Кипрский, 8 — Северо-Аравийский, 9 — Кушкийский, 10 — Таримский, 11 — Ливийский, 12 — Северо-Индостанский; 8—9 — направления смещений крыльев: 8 — вертикальное (сбросовое), 9 — горизонтальное (сдвиговое); 10 — направления сжимающих усилий; 11 — субмеридиональные линейментные зоны: I — Пиренейская, II — Альпийская, III — Балканская, IV — Крымская (Анатолийская), V — Кавказская, VI — Копетдагская, VII — Гималайская

поперечных и диагональных линейных структур; выявление и изучение разномасштабных кольцевых структур; установление пространственных и генетических связей линеаментов и кольцевых структур; выделение главных зон магмоподводящих каналов и оценка на тектонической основе закономерностей пространственного размещения магматических очагов.

Применение космической информации в изучении зон сочленения крупных геотектонических областей имеет в настоящее время принципиальное значение, т. е. получаемые результаты довольно резко меняют сложившиеся представления. В качестве примера можно привести реконструкцию сочленения платформ Евразии и Гондваны на отрезке Средиземноморского горно-складчатого пояса (рис. 61). Схема сочленения, составленная по результатам дешифрирования КС, в целом характеризуется закономерным сочетанием диагональных (северо-западных и северо-восточных) и ортогональных (субмеридиональных и субширотных) линеаментов. Ориентировка линеаментов и их динамическая реализация достаточно тесно взаимосвязаны: диагональные — отражают преимущественно зоны скалывания, ортогональные — зоны сжатия (субширотные) и растяжения (субмеридиональные). Диагональные сколы подчеркивают (или даже ограничивают) клиновидные контуры зоны сочленения платформ Евразии и Гондваны, причем некоторые клинья обладают очаговой сейсмичностью, связанной с мантией; субширотные взбросы и надвиги обуславливают продольную (субширотную) складчатость Средиземноморского пояса, а субмеридиональные «раздвиги» — его поперечную тектоническую зональность. В целом линеаментный рисунок изученной зоны выявляет ромбовидную глубинную делимость земной коры, прямым структурно-морфологическим следствием которой являются клиновидные ограничения зоны с образованием вдающихся в «тела» платформ клиньев типа Кипрского, Куштинского, Северо-Аравийского, Северо-Индостанского и др. (см. рис. 61).

Особая геодинамическая роль принадлежит линеаментам и их зонам субмеридионального и северо-восточного простираний — Кипро-Южноуральскому, Пальмиро-Апшеронскому, Урало-Оманскому и др. (см. рис. 61), которые как бы «сшивают» платформы Евразии и Гондваны, четко прослеживаясь под структурами альпийского Средиземноморского пояса, и уходят в смежные пространства платформ.

Таким образом, изучение зоны сочленения платформ Евразии и Гондваны с помощью КС выявляет глубинную ромбовидную делимость земной коры и тесные геодинамические связи между названными платформами.

Применение космической информации в изучении зон перехода континент — океан, геолого-геоморфологическое строение и история формирования которых во многом еще неясны и до настоящего времени являются предметом оживленных дискуссий, чрезвычайно важно со всех точек зрения: методической, теоретической, региональной и прикладной. Использование КС разных масштабов и качества выяви-

ло основные структурные элементы, влияющие на морфологию и развитие береговой (материковой) зоны: а) дуговые глубинные разломы и их зоны; б) разрывы, поперечные к дуговым разломам; в) кольцевые и полукольцевые структуры различного типа.

В более общем плане анализ результатов дешифрирования КС континентального уровня генерализации показывает, что планетарные линеаменты, их зоны или пояса играют роль регуляторов в распределении тех или иных форм мега- и макрорельефа, в том числе и границ раздела континент — океан. Достаточно взглянуть на рисунок 45, чтобы убедиться, что прямолинейные ограничения многих континентов, например Тихоокеанского (Чилийское) побережья Южной Америки, Юго-Восточного (Индоокеаническое) побережья Африки и т. д., контролируются линеаментами или их системами соответствующих простираний. Округлые же ограничения континентов, например, в районе Мексиканского залива или Северо-Западной Африки обусловлены очертаниями кольцевых структур.

Большого внимания исследователей требует изучение зоны близкого схождения континентов, где большую роль в развитии современного структурного плана земной коры континентов и дна океана играют не только линейные структуры продольного ограничения континентальных окраин, но и линеаменты, поперечные или диагональные простиранию этих окраин. Такие линеаменты трассируются в зоне перехода континент — океан на широте Чукотка — Аляска, где линеаменты северо-восточного и северо-западного простираний ограничивают зону перехода, а субширотные — простираются поперек.

Использование космической информации при изучении **разрывных нарушений** позволяет установить нарушения различных геотектонических областей Земли: древних и молодых платформ, орогенных и вулканических поясов и т. д. Первые же сравнения результатов дешифрирования и интерпретации КС с имеющимися геологическими картами, составленными традиционными методами, дали огромный прирост информации, выраженный прежде всего в количестве вновь выявленных линейных нарушений. Анализ выделенных на КС систем линеаментов позволил установить новые, не зафиксированные в процессе геологической съемки отдельные нарушения и даже их системы, которые, как правило, относятся к категории новейших и в большинстве случаев отвечают системам активизированных разрывов, выраженных в структуре древних комплексов. Соответствие части линеаментов ранее установленным разрывным нарушениям позволяет предположить, что и прочие, подобные им линеаменты могут отражать разрывные нарушения различного ранга и морфологии — от глубинных планетарных разломов до конкретных локальных разрывов.

Изучение линеаментов, отдешифрированных по КС, и их геолого-геофизическая интерпретация позволили показать В. И. Макарову, Л. И. Соловьевой наличие перекрестного структурного плана земной коры; В. И. Макарову, В. Г. Трифонову, Ю. К. Щукину — дисгармонию структурных планов приповерхностного и глубинного горизонтов земной коры; А. Е. Федорову — установить локсодромный характер линейных нарушений, сходящихся к географическим полюсам



горизонты; в) достаточная для образования четких пластовых фигур глубина расчленения; г) достаточно крупный размер складок и слабая нарушенность их продольными разрывами.

По мере детализации масштабов геологических и тектонических исследований с помощью КС и в связи с приобретением опыта в выделении и изучении не только разрывных дислокаций, но и складчатых деформаций, возникла возможность комплексного исследования разрывно-складчатых ассоциаций или ансамблей (рис. 62). Вследствие широкого применения космической информации в тектонических исследованиях потребовалось многоплановое комплексирование и коррелирование полученных результатов дешифрирования практически со всем объемом накопленного к настоящему времени геолого-геофизического материала.

Таким образом, космическая информация находит широкое применение и в практике решения задач «тектоники сегодняшнего дня», и в поисках ответов на вопросы «большой тектоники», что в перспективе требует еще большего расширения и углубления применения КС в тектонических исследованиях.

## 11.2 Сравнительный тектонический анализ планет земной группы

Такой анализ стал возможен благодаря космическим съемкам планет. Космическая съемка планет — Марса, Венеры, Меркурия, Луны и др. с помощью АМС предоставила большие возможности для изучения их тектоники. В настоящее время с помощью АМС получено достаточное число фактов, позволяющих приступить к составлению первых тектонических карт некоторых планет земной группы. Советскими геологами составлены и изданы мелкомасштабные тектонические карты Луны и Марса, ведутся работы по составлению тектонической карты Венеры. Анализ собранного с помощью АМС материала позволил установить некоторые общие важнейшие закономерности тектоники планетных тел (рис. 63). Установлено, что всем им свойственна асимметрия, обусловленная различиями строения, мощности и состава коры. На всех планетах фиксируются разрывные нарушения разной кинематики и рангов, на большинстве из них доказаны процессы рифтогенеза, а на некоторых — признаки сейсмичности.

Материалы космических съемок планет дали возможность осуществить их тектоническое районирование, которое основано на выделении кор различного строения. Почти на всех планетах земной группы выделяются области континентального, океанического и переходного тектогенеза.

**Области континентального тектогенеза** планет выделяются на КС как сложнопостроенные приподнятые участки коры планет, осложненные разломами, гребнями, холмами и впадинами. Здесь выделяются талассоиды и субталассоиды, сводовые поднятия, а на Венере — складчатые пояса.

Талассоиды — крупные внутриматериковые или краевые впадины, обрамленные кордильерами. Примером талассоидов на Марсе яв-

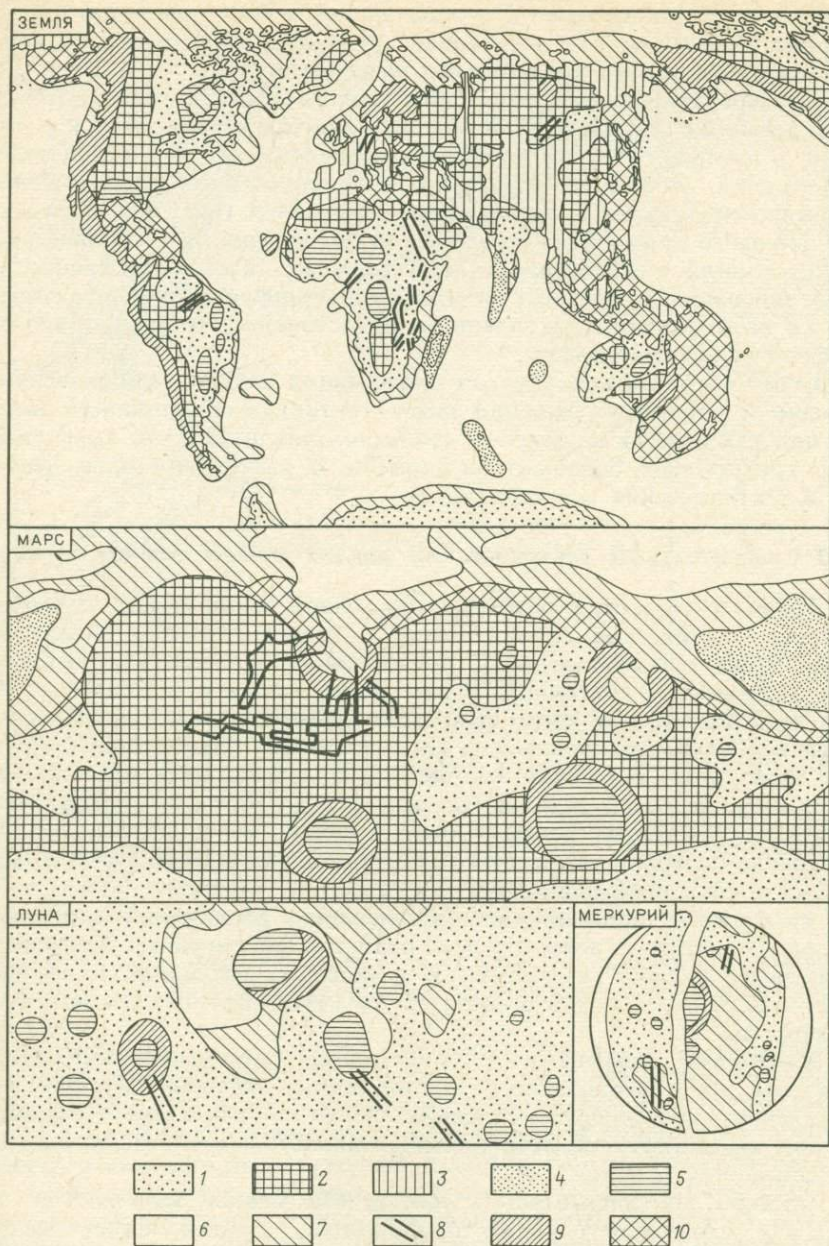


Рис. 63. Тектонические карты планет земной группы и Луны. По Я. Г. Кацу, В. В. Козлову, Е. Д. Сулиди-Кондратьеву.

Континенты: 1 — древние ядра, 2 — плиты, 3 — орогенные пояса, 4 — микроконтиненты, 5 — талассоиды и субталассоиды; океаны: 6 — океанические плиты, 7 — внешние части океанов, 8 — рифты; переходные области: 9 — кордильеры, 10 — окраины континентов и морей

ляются крупные (до 1600 км) структуры типа впадины Эллада. Днище этой впадины опущено ниже нулевого уровня поверхности Марса на 3—4 км. По гравиметрическим данным в пределах этой впадины отмечается аномалия силы тяжести и устанавливается сокращение мощности коры планеты.

Субталассоиды по своему строению близки к талассоидам, но отличаются от них меньшими размерами (до 400—500 км), правильной кольцевой формой, иногда отсутствием кордильеры. Вопрос о происхождении талассоидов и субталассоидов дискуссионный. Некоторые исследователи связывают их образование с падениями метеоритов астероидных размеров — планетозималей.

Сводовые поднятия — важная особенность тектонического строения Марса. В ряде регионов планеты они, как более поздние образования, привели к перестройке древних структур. Со сводовыми поднятиями Фарсида и Элизий на Марсе связано развитие крупнейших щитовых вулканов — Олимпа, Аскрийского и др.

Складчатые дислокации пока установлены только на Венере (см. рис. 4). Здесь по РЛ-изображениям советскими исследователями выделены следующие тектонические формы: пояса линейных дислокаций, складчато-разрывные дислокации, площадные пластические деформации, вулкано-тектонические кольцевые структуры (овоиды).

Области океанического тектогенеза планет представляют собой крупные относительно ровные депрессии в рельефе, опущенные на несколько километров по отношению к примыкающим материкам. Как поверхности более молодые, они кратерированы значительно слабее, чем окружающие их материки. Среди океанических равнин некоторых планет, например Марса или Луны, выделяются микроконтиненты — приподнятые интенсивно кратерированные всхолмленные участки. Они являются приподнятыми блоками, ограниченными со всех сторон разрывными нарушениями. Разрывные нарушения разных направлений пересекают базальтовые поверхности планет в различных направлениях.

Области переходного тектогенеза представляют собой участки кор планет, вовлеченные в океанообразование и расположенные на границе материк — океан. Они тектонически наиболее нарушенные. Здесь отмечается повышенная концентрация разломов вдоль края континентальной области, дешифрируются многочисленные сбросовые уступы.

К числу структур переходного типа относятся кордильеры — блоковые поднятия, расположенные по периметру внутри материковых впадин. Сопряжение кордильер со впадинами происходит по разломам.

Разрывные нарушения на планетах представлены разнообразными структурными формами различной кинематики и протяженности. Особенно подробно они изучены на Марсе. На поверхности этой планеты В. В. Козловым изучены и описаны несколько систем разломов, среди которых отмечаются сбросы, взбросы, раздвиги и структуры с неустановленным характером смещения. Анализ КС показал, что рифтогенез на некоторых планетах — Марсе, Венере, Луне доста-

точно широко распространен. Рифты — глубокие грабенообразные впадины, ограниченные резкими уступами. Наиболее хорошо изученной является рифтовая система Марса — долина Маринер, расположенная на восточном склоне поднятия Фарсида. Она протягивается в широтном направлении почти на 4000 км. Ширина системы достигает 500 км, а глубина 4—5 км. Анализ строения этой рифтовой системы указывает на ее родство с земными рифтами.

**Тектоническая асимметрия** — характерная особенность Земли и планет земной группы. Земле тектоническую асимметрию придает Тихий океан — впадина со средней глубиной около 4 км, обрамленная складчатыми системами Северной и Южной Америк, Азии, Австралии, Антарктиды. Существование Тихоокеанского кольца придает Земле структурную неоднородность. Подобная структурная неоднородность отмечается на Марсе — Великая северная равнина, на Луне — Океан Бурь, на Меркурии — впадина Калорис, составляющая 1/3 поверхности планеты. Существует несколько гипотез относительно проблемы асимметрии планет. Одна из них связывает это явление с ротационным движением.

Изучение тектоники планет необходимо для изучения общих закономерностей развития Солнечной системы и установления ранних этапов развития Земли.

### *Вопросы для самопроверки*

1. При решении каких тектонических проблем используются МДЗ?
2. Каковы возможности применения МДЗ при изучении планет земной группы?

## **Глава 12**

### **ПРИМЕНЕНИЕ КОСМИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ ПРИ ИССЛЕДОВАНИИ СОВРЕМЕННЫХ ГЕОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ**

#### **12.1. Изучение землетрясений**

Результаты применения космической информации при изучении различных аспектов сейсмичности Земли рассмотрены в работах И. В. Ананьина, Ек. Бончева, А. С. Караханяна, В. В. Козлова, В. И. Макарова, Е. Д. Сулиды-Кондратьева, В. Г. Трифонова, С. Шанова и многих других исследователей.

При изучении сейсмических процессов с помощью КС широкое применение нашел линеаментный подход, заключающийся в установлении пространственных связей между отдешифрованными на КС линеаментами и сейсмичностью.

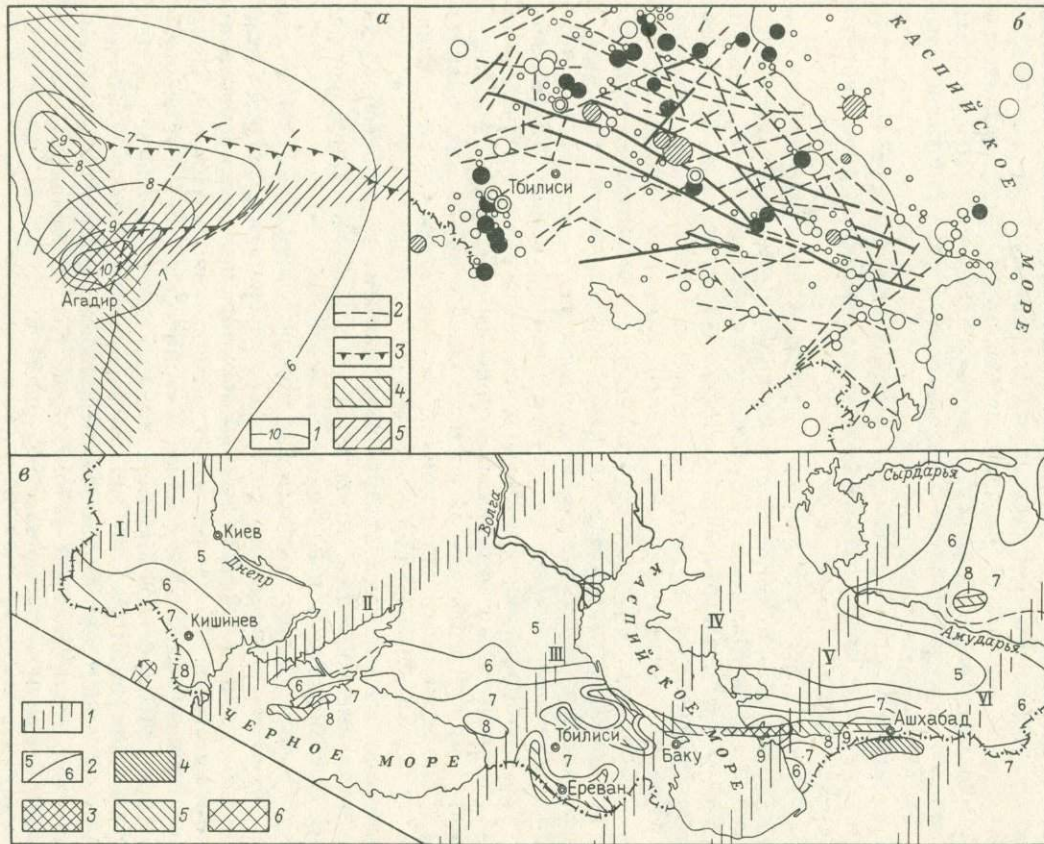


Рис. 64. Варианты использования КС в сеймотектонических исследованиях:

**а** — при уточнении строения плейстоценовых областей землетрясений (на примере Агадирского землетрясения 29 февраля 1960 г. По В. В. Козлову и др.

1 — изосейсты Агадирского землетрясения в баллах; 2 — разрывные нарушения, прослеженные на поверхности при геологическом картировании; 3 — флексуры, отчетливо выраженные в поверхностной структуре; 4 — зона Пернатлантического разлома; 5 — зона Южноатласского разлома;

**б** — при выявлении зависимости между расположением эпицентров землетрясений (круги разного диаметра) и линейментов (сплошные и прерывистые линии), отшифрованных на КС. По И. В. Аняншину и В. Г. Трифонову;

**в** — при выделении и трассировании сейсмоконтролирующих структур: 1 — сейсмоконтролирующие линейментные зоны, 2 — граница между зонами нормативной интенсивности землетрясений в баллах, 3—5 — зоны возможного возникновения очагов землетрясений при глубинах до 40 км: 3 —  $M \geq 8,1$ ; 4 —  $M$  от 7,1 до 8,5; 5 —  $M$  от 6,1 до 7,0; 6 — то же, при глубине до 200 км ( $M \geq 7,1$ ).

Сейсмоконтролирующие линейментные зоны: I — Будапешт-Львовская, II — Азово-Южноуральская, III — Понтийско-Кизлярская, IV — Пальмиро-Апшеронская — Западно-Уральская, V — Решт-Восточно-Аральская, VI — Мешед-Ташкентская

С помощью комплексного анализа КС, геолого-геофизических и сейсмологических материалов можно решать самые различные задачи в области сеймотектоники, сейсмического районирования и прогнозирования землетрясений.

1. Диагностировать морфологию и кинематику молодых (позднеплейстоцен-голоценовых) тектонических нарушений и деформаций — сейсмодислокаций. Устанавливать различия в морфологии и кинематике молодых нарушений, связанные с различиями сейсмического режима: известно, что сильные землетрясения, как правило, приурочены к зонам активных надвигов, реже они происходят в зонах активных сдвигов, еще реже — в зонах раздвигов и сбросов.

2. Уточнить размеры, морфологию и строение плейстосейстовых областей отдельных землетрясений. Например, плейстосейстовая область Агадирского землетрясения 29 февраля 1960 г. ( $M-5,75$ ;  $E-10^{13}$  Дж;  $H-2-3$  км) по результатам наземного обследования связывалась с подвижками вдоль субширотного Южноатласского разлома. Анализ КС выявил развитие двух обособленных плейстосейстовых зон землетрясения, связанного с узлом повышенной тектонической активности, расположенного на пересечении субширотной Южноатласской и субмеридиональной Периатлантической линеаментных зон (рис. 64, а).

3. Выявлять зависимость между расположением эпицентров землетрясений и линеаментами, отдешифрованными на КС. Например, на южном склоне Восточного Кавказа где эпицентры слабых, неглубоких (5—10 км) землетрясений тяготеют к выделенным на КС линеаментам, образующим структуру «метелок» и пересекающим полосчатую структуру региона в разных направлениях (рис. 64, б).

4. Определять динамические условия сейсмоактивных зон (за счет определения направления и кинематики преимущественных — горизонтальных, вертикальных и комплексных — движений в них) и изучать различные типы механизмов очагов сильных землетрясений. Так, сопоставление зон сильных землетрясений, отображенных на КС, с различными механизмами привело к выводу, что сильные землетрясения, с вертикальной составляющей в очагах, проявляются на крупномасштабных фотоснимках тонкой полосчатостью вдоль зоны, а на мелкомасштабных сканерных изображениях — в виде протяженного линеамента. Если в очагах землетрясений преобладают горизонтальные подвижки, то на КС и того и другого типов изображения сейсмических зон не имеют различий.

5. Выделять и трассировать сейсмоконтролирующие структуры (рис. 64, в) и устанавливать их связи с глубинным строением земной коры сейсмоопасного региона. Например, при дешифрировании мелкомасштабных КС Газлийского сейсмоактивного района в Центральных Кызылкумах обнаружены тектонические зоны субмеридионального и субширотного простираний, а на более крупномасштабных изображениях отчетливо проявлены линеаменты северо-восточного и северо-западного простирания, испещряющие эпицентральною зону Газлийских землетрясений 1976 г. (рис. 65). Имеющиеся геологические и геофизические данные позволили В. Г. Трифонову и В. И.

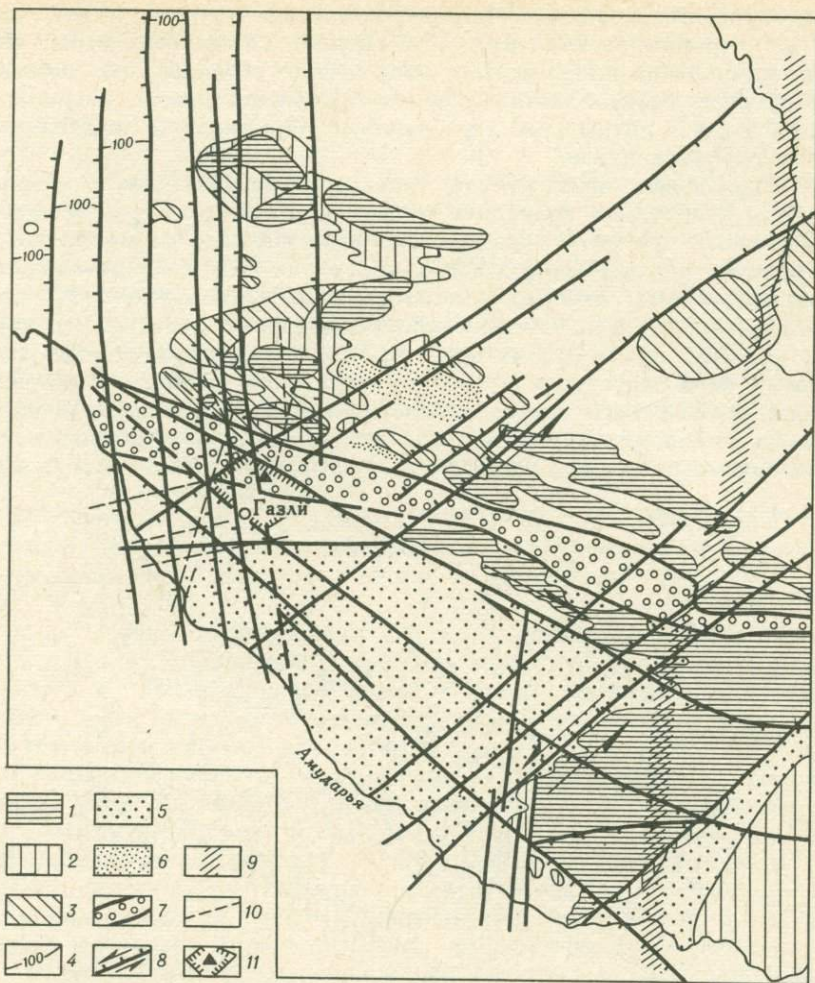


Рис. 65. Положение Газлийского сейсмоактивного района в новейшей структуре и системе линейментов Центральных Кызылкумов. По В. И. Макарову и В. Г. Трифонову: 1-3 — антиклинальные поднятия (складки основания), дифференцированные по степени относительного воздымания; 4 — положение изогипсы 100 м в междуречье Амударьи и Сырдарьи; 5 — зоны наиболее активных прогибаний и накопления неоген-четвертичных отложений; 6 — наиболее глубокие частные впадины; 7 — обобщенные контуры Зеравшанской синклинальной зоны; 8 — зоны флексурно-разрывных нарушений (штрихи обращены в сторону опущенных крыльев, стрелками обозначены направления возможных сдвиговых смещений); 9 — Туркестан-Алайский линеймент (разрывно-флексурная зона); 10 — разрывные нарушения, выявленные на КС; 11 — плейстоценовая область Газлийских землетрясений 1976 г.

Макарову интерпретировать субмеридиональные направления как отражение деформаций, активно проявленных в самых глубоких слоях земной коры и верхней мантии; северо-восточные — как отражение нарушений кристаллического основания Центральных Кызылкумов, северо-западные — самых верхних слоев коры.

6. Создавать геологическую основу долгосрочного сейсмического прогноза за счет обнаружения тектонически активных зон, скрытых

на глубине. Они возникают при дисгармоничном (друг относительно друга) деформировании двух (или более) слоев литосферы. При этом наибольшая концентрация напряжений возникает на границах литосферных слоев, особенно в зонах сочленения блоков (сегментов) земной коры и литосферы, характеризующихся разнонаправленными молодыми движениями.

7. Определять возможности текущего прогноза землетрясений, для чего необходимо проводить зондирование типовых участков сейсмоактивных областей комплексом, включающим многозональную фотосъемку камерой типа МКФ-6, лидарную, ИК- и РЛ-съемки. Это объясняется тем, что если многозональная фотосъемка и РЛ применяются в основном для изучения морфологии молодых структур, то с помощью ИК и других видов съемок и измерений можно улавливать в этих структурах изменения влажности, вариации теплового потока, химического состава подземных вод и связанных с ними газовых эманаций. В сочетании с воздушными гравиметрическими и магнитометрическими наблюдениями эти исследования могут выя-

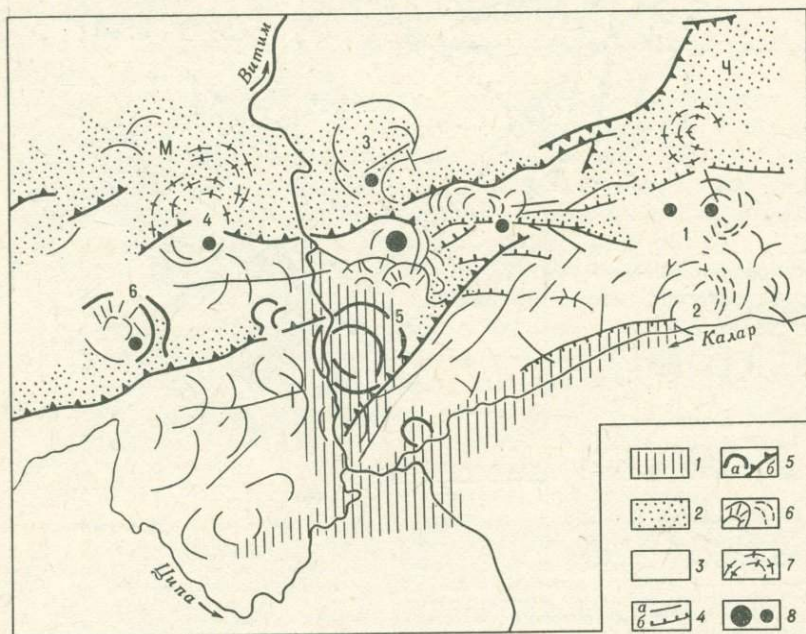


Рис. 66. Пример пространственной корреляции кольцевых структур и эпицентров землетрясений Муйско-Куандинского района зоны БАМ. По А. Ф. Петрову:

1 — эрозионные долины и склоны неотектонических поднятий; 2 — днища неотектонических грабенов; 3 — неотектонические горсты-хребты; 4 — узкие ландшафтные линеаменты, отвечающие голоценовым разломам и макротрещинам: а — щелеобразные нарушения без видимых на КС смещений, б — уступы рельефа с амплитудой десятки-сотни метров; 5 — широкие линейные и дуговые элементы ландшафта, отвечающие древним сильно денудированным нарушениям: а — без уступов, выраженных на КС, б — с уступами амплитудой в сотни метров; 6 — голоценовые кольцевые структуры, выраженные узкими эрозионными врезами; 7 — голоценовые кольцевые структуры, выраженные узкими аномалиями почвенно-растительного покрова; 8 — эпицентры землетрясений с  $M \geq 6,9$  и  $5,8-6,4$ . Рифтовые впадины: М — Муйско-Куандинская, Ч — Чарская. Кольцевые структуры: 1 — Верхне-Лурбунская, 2 — Чукчудинская, 3 — Мало-Кудинская, 4 — Му-дарийская, 5 — Шаманская, 6 — Верхне-Бамбукаинская

вить набор дистанционных предвестников сильных землетрясений, что, в свою очередь, поставит вопрос о создании системы аэрокосмического мониторинга (патрулирования) сейсмоопасных областей.

Сейсмопрогностические работы с помощью космических средств находятся в настоящее время в стадии становления, но уже сейчас, оценивая роль космической информации в системе текущего прогноза землетрясений, следует иметь в виду возможность использования ИСЗ как средств оперативного сбора и передачи данных наземных сейсмических и геофизических станций, в том числе автоматических, в центры обработки и предупреждения.

Исследования пространственных соотношений линеаментов и их систем с особенностями расположения очагов землетрясений показали, что большинство эпицентров землетрясений: а) располагается вдоль линеаментов или их зон; б) локализуется в пределах блоков, ограниченных двумя или более линеаментами; в) приурочено к участкам пересечения (или сочленения) линеаментов между собой или с геологически установленными разрывами, т. е. к узлам пересечения тектонических нарушений.

В последнее время появились данные о пространственной связи между неотектонически выраженными кольцевыми структурами и инструментально установленными эпицентрами землетрясений (рис. 66).

Многолетние исследования сейсмоактивных районов СССР и сопредельных территорий с помощью аэро- и космических методов приводят к выводу о целесообразности широкого применения и развития именно разномасштабных дистанционных методов при решении различных сейсмотектонических задач.

Крупномасштабные дистанционные материалы — аэрофотоснимки могут применяться при полевом картировании современных разрывных дислокаций, в том числе и сейсмодислокаций. Среднемасштабные дистанционные материалы — КС — при поиске и выделении скрытых зон тектонических нарушений, не отраженных еще ни в геологической, ни в геофизической информации, т. е. для поиска, выделения и трассирования зарождающихся разрывов.

Мелкомасштабные дистанционные материалы — КС применяют при сейсмическом районировании, обеспечивая поиск и выделение сейсмоконтролирующих линеаментов, разграничивающих блоки земной коры, резко отличающиеся значениями различных сейсмических параметров (см. рис. 64, в). Примерами служат Вена — Варшавский линеамент и линеамент Скутари — Печ — Вранча на Балканах, Понтийско-Кизлярская и Пальмиро-Апшеронская линеаментные зоны на Кавказе, Межбалхан-Узбойская линеаментная зона Туркмении и Дарвазский линеамент в Таджикистане.

Сочетание разномасштабных дистанционных материалов должно быть неперенным условием комплексных сейсмотектонических исследований. Применение КС дает огромную экономию сил и времени работников, избавляя их от трудо- и времяемкого площадного просмотра десятков тысяч аэрофотоснимков при рекогносцировочной оценке потенциальной сейсмичности изучаемых террито-

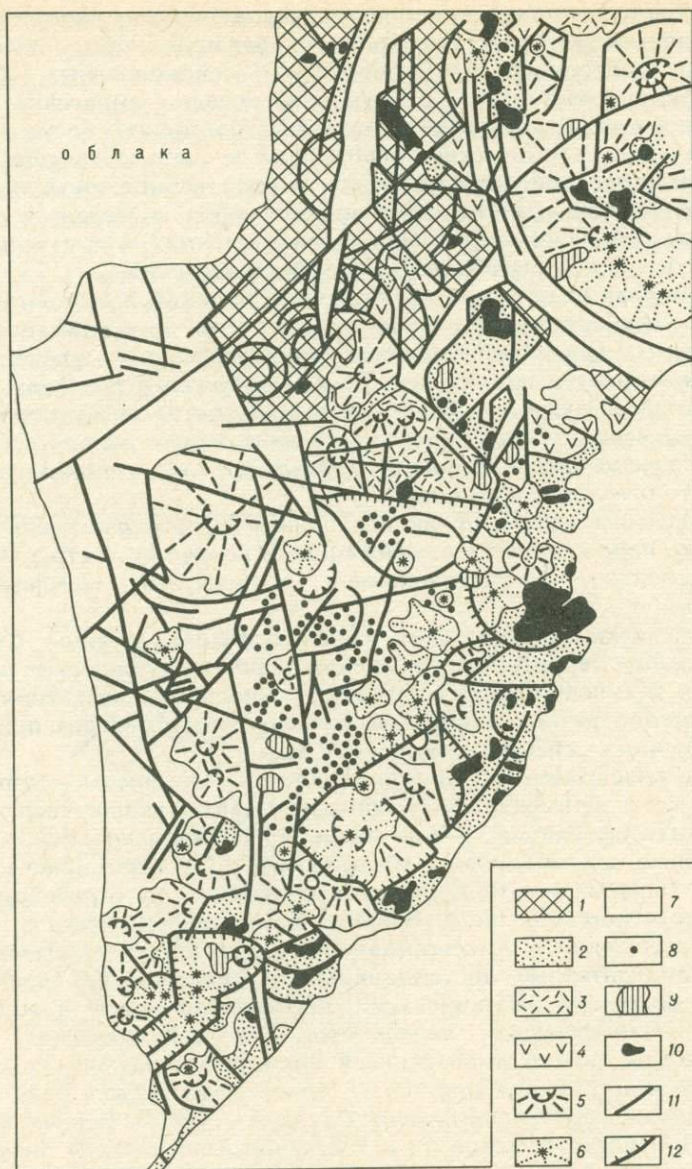


Рис. 67. Схема вулканотектонических структур Южной Камчатки по результатам дешифрирования среднемасштабных КС. По Б. В. Ежову, С. Е. Апрескову.

Отложения: 1 — мезозойские, 2 — вулканыты и вулканогенно-осадочные ( $P_3$ ), 3 — вулканыты ( $N_1$ ), 4 — вулканыты ( $N_1-N_2$ ); 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 — границы четвертичных вулканотектонических депрессий

рий. В целом дешифрирование КС должно быть первым этапом любых сейсмогеологических и сейсмотектонических исследований.

## 12.2. Изучение вулканических явлений и структур

Применение КС при изучении вулканических регионов (рис. 67) позволяет не только изучать сам процесс извержения или картировать вулканические структуры и площади распространения вулканических продуктов, но и получать информацию о характере связей вулканических проявлений с глубинными и поверхностными геологическими структурами, проследить развитие конкретного очага во времени и даже прогнозировать его дальнейшую эволюцию. Кроме того, в периоды активизации вулканической деятельности некоторые процессы структурообразования и изменения тектоники земной коры можно наблюдать, фиксировать и изучать непосредственно, получая при этом не только качественно новые представления о процессе, но и некоторые его количественные характеристики.

Одной из важнейших особенностей вулканизма как объекта исследования космическими методами является его динамичность, изменение различных параметров (морфология и размеры очага, температурный режим и газовый спектр, физические поля и сейсмическая активность и др.) во временном интервале от нескольких лет до часов и минут. В масштабе локальных вулканов или отдельных вулканоопасных районов такие материалы необходимы при изучении динамики формирования вулканических структур и прогнозировании периодов активизации отдельных очагов, их групп или целых вулканических районов. В глобальном масштабе они представляют уникальный материал для изучения роли вулканизма в формировании структуры и вещественного состава земной коры и физико-географических особенностей поверхности земного шара на протяжении его геологической истории, с одной стороны, и для поиска и выделения глобальных поясов современной тектонической активности Земли — с другой.

Исследования процессов активного вулканизма Земли приобрели в последние годы еще большую актуальность в связи с интенсивным развитием новой отрасли естествознания — сравнительной планетологии: многочисленные материалы, полученные космическими средствами, показали наличие на многих планетах Солнечной системы, например, на Марсе, Луне, Венере, следов вулканических процессов, сходных с земными, или, как на спутнике Юпитера — Ио, современной вулканической деятельности.

В настоящее время для изучения современных вулканических явлений и структур используются космические изображения, получаемые с различных метеорологических спутниковых систем, данные специальных ИСЗ для исследования природных ресурсов — «Лэндсат» и «Метеор», а также КС, получаемые с помощью аппаратуры, установленной на пилотируемых космических кораблях и орбитальных станциях. Кроме того, используются и космовизуальные наблюдения космонавтов, ведущиеся по специально разработанным программам.

### 12.3. Инженерно-геологические и гидрогеологические исследования

Нарастающее значение использования космической информации при инженерно-геологических исследованиях подчеркнуто в многочисленных работах советских и зарубежных исследователей — В. К. Кучая, А. Л. Ревзона, А. В. Садова, В. С. Федоренко и др.

По результатам накопленного материала становится очевидным и необходимым применение КС при решении следующих инженерно-геологических задач.

1. Оценка и прогноз инженерно-геологических условий создающихся территориально-промышленных комплексов в районах активного народнохозяйственного освоения территории.

2. Охрана окружающей среды, прежде всего в связи с инженерной защитой и рациональным использованием территорий.

3. Систематическое (режимное) и экстренное наблюдение за метеогидрогеологической обстановкой в районах, где она становится экстремальной, с целью своевременного прогноза активизации оползней, обвалов, селей, подмыва берегов и т. п.

Поскольку объектами инженерно-геологического картирования служат инженерно-геологические условия, получающие на КС специфическое отражение, постольку дешифрирование КС позволяет получать данные о границах распространения инженерно-геологических формаций горных пород и их структурно-тектонической обусловленности, выявлять и оконтуривать площади распространения литолого-стратиграфических комплексов покровных отложений и пород коренной основы и выяснять характер их взаимоотношений, устанавливать пространственные закономерности в развитии экзогенных геологических процессов и значительно глубже, по сравнению с другими методами, оценивать роль структурно-тектонических факторов в формировании инженерно-геологических условий.

Рассмотрим применение КС при изучении экзогенных геологических процессов, которые являются одним из наиболее динамичных элементов инженерно-геологической обстановки, существенно влияющих на природную среду и хозяйственную деятельность человека.

Основные задачи изучения экзогенных геологических процессов заключаются в выявлении их зональных и региональных закономерностей; изучении активности, интенсивности и их динамики, а также в оценке их влияния на объекты инженерно-хозяйственной деятельности человека. При решении этих задач важную роль приобретают именно дистанционные методы (ДМ), обеспечивающие получение объективной и оперативной информации об экзогенных процессах с различной степенью детализации и генерализации — от узлокальной до региональной и даже глобальной, что невозможно сделать другими средствами.

На глобальном уровне генерализации КС выделяются крупные области с преобладающим развитием основных групп экзогенных процессов — аккумулятивных, денудационных и гравитационных — и парагенетических ассоциаций. Здесь в качестве основного дешифровочного признака выступает фототон изображения.

На региональном уровне выделяются морфоструктуры разных порядков (плато, хребты, межгорные впадины, увалы, гряды, котловины и т. д.) и их элементы (своды, крылья, перегибы) и устанавливается их связь с генетическими типами экзогенных процессов, являющихся их своеобразными индикаторами. Информация, получаемая на данном уровне генерализации, используется при типизации экзогенных процессов и составлении обзорных карт их распространения; в роли основного дешифровочного признака выступает рисунок фотоизображения.

Локальный уровень генерализации позволяет выявлять все основные типы морфоскульптуры (эрозионные, оползневые, обвальнo-осыпные и др.), получать необходимую информацию для изучения особенностей распространения генетических типов экзогенных процессов, определять возрастные генерации различных форм, дешифровать геологические комплексы пород и их литологический состав. Результаты дешифрирования используются для составления специализированных обзорных карт современного состояния и условий развития экзогенных процессов, районирования территории по интенсивности их проявления на основе количественных показателей.

На данном уровне уменьшается роль конфигурации объектов как дешифровочного признака, но зато увеличивается роль рисунка фотоизображения, так как многие формы рельефа — бугры, просадочные блюдца, воронки, русла водных потоков и т. д. — получают на снимках интегральное выражение, образуя различного рода полосчатость, пятнистость и зернистость рисунка фотоизображения. В связи с увеличением обзорности повышается и роль фототона изображений.

Следует помнить, что при распознавании экзогенных форм рельефа по рисунку и фототону изображения, как правило, возникает значительно большее количество ошибок, чем при использовании стереоскопических снимков. С целью избежания ошибок и для повышения достоверности геоморфологического дешифрирования рекомендуется более широкое использование комплексных ландшафтных индикаторов и составление на их основе ландшафтно-индикационных схем.

По КС детального уровня генерализации выявляются особенности морфологии и морфометрии формы рельефа и их элементов, что позволяет не только детально изучать и закартировать отдельные очаги экзогенных процессов, но и выяснить их связи с отдельными элементами геоморфологической, геолого-литологической и гидрогеологической обстановок. Это, в свою очередь, дает возможность установить стадии развития экзогенных процессов, построить эволюционные ряды их развития, количественно оценить степень их активности. Информация дистанционных материалов данного уровня генерализации используется для составления детальных инженерно-геологических карт, отражающих динамику развития экзогенных, например склоновых, процессов и позволяющих осуществить пространственный прогноз.

Основными дешифровочными признаками служат конфигурация

экзогенных форм рельефа и их размеры, определяемые при стереоскопическом дешифрировании. Рисунок фотоизображения играет незначительную роль, в связи с тем что большая часть распознаваемых объектов находит дифференцированное отображение. Сравнительно неустойчивым признаком считается фототон, так как он определяется в значительной степени техническими условиями, а также сезонными, временными и метеорологическими факторами фотосъемки.

Получаемая при обработке КС разных уровней генерализации информация о современном состоянии экзогенных геологических процессов находит применение в решении основных инженерно-геологических задач.

Например, прогнозирование оползневых процессов различной срочности осуществляется различными методами, в связи с чем и способы применения и набор методов дистанционного зондирования зависят от масштаба и срочности конкретных исследований.

В задачу бессрочного прогноза входит ранжирование геологических условий и конкретных территорий по их предрасположенности к оползневым явлениям различных типов и масштабов (временной аспект прогноза здесь отсутствует).

Долговременное прогнозирование предполагает не только предсказание места и типа оползневых явлений в будущем, но и определение долговременной средней повторяемости оползней.

Краткосрочный прогноз призван определить и место, и размеры, и время активизации оползневых процессов за необходимый временной интервал — часы, сутки, недели, месяц, а может быть, и годы до их начала.

Элементы указанных видов прогнозирования оползневых процессов могут содержаться в работах различного масштаба. Использование материалов дистанционных съемок при долгосрочном среднemasштабном оползневом прогнозировании можно показать на примере изучения оползневых явлений в Горном Дагестане. Здесь по результатам комплексного дешифрирования установлены многочисленные оползни-срывы сейсмогенного происхождения, приуроченные к линеаментам антикавказского простираения — Андийскому, Самур-Аргунскому, Аваро-Сулакскому — и субкавказского простираения — Пограничному линеamentу, разделяющему области Известнякового и Сланцевого Дагестана.

В задачу детального оползневого прогнозирования входит определение оползневой опасности конкретных склонов. Наиболее широко МДЗ используют на первой стадии прогнозных работ, когда на достаточно обширной площади необходимо получить информацию об особенностях инженерно-геологической обстановки.

Если методика среднemasштабного и детального оползневого прогнозирования с помощью МДЗ достаточно хорошо разработана и внедрена в практику, то о краткосрочном прогнозировании оползней можно говорить лишь с точки зрения перспектив и возможностей применения космической информации в этой области.

Важное значение при оценке и прогнозе инженерно-геологичес-

ких условий имеет определение роли структурно-тектонических факторов, определяемых при анализе разномасштабных КС. В результате этого выявляются скрытые продолжения известных разрывов (линеаменты) или складок, устанавливаются активизированные разломы, дешифрируются трудно распознаваемые при наземных исследованиях поперечные или диагональные разрывы (линеаменты), намечаются древние и современные участки сжатия и растяжения земной коры, полнее вскрывается связь эндогенных и экзогенных процессов, уточняется влияние сейсмического фактора на развитие оползней и обвалов, определяются глубины и рельеф подводной части континентальных склонов. Полученные результаты становятся основой для обобщения данных глубинных геофизических и сейсмологических исследований, что придает инженерно-геологическому картированию и районированию новые качества.

Показательной иллюстрацией может служить изучение влияния структурно-тектонического фактора на развитие инженерно-геологических условий склонов долины р. Ардон на Северном Кавказе. Предпринятое здесь комплексное дешифрирование разномасштабных МДЗ выявило линеаменты ортогональной и диагональной систем.

Чрезвычайно четко просматривается дисгармоничное соотношение разрывов, имеющих преимущественно субширотное простирание, и линеаментов, большая часть которых простирается по отношению к разрывам под углом, образуя узлы пересечения или сочленения. Именно на участках, образованных пересечением разрывов и линеаментов, развиты различные проявления экзогенных геологических процессов на склонах долины р. Ардон — оползневые массивы (Даллагкауский), обвально-осыпные накопления (в районе пос. Тиб), контуры крупных селеопасных бассейнов (Касайкомдонского). Отдельные линеаменты и их сочетания как между собой, так и с разрывами контролируют, кроме того, стенки отрыва и элементы внутреннего строения крупных оползневых массивов, например Цейского (рис. 68).

Установленные соотношения свидетельствуют о современной геологической активности, отраженной в виде линеаментов, глубинных нарушений земной коры, и подтверждают имеющиеся данные о приуроченности обвалов и оползней к зонам отдешифрированных на КС линеаментов территории северо-западной части Арканзаса и Присеванского района.

С целью повышения эффективности и целенаправленности инженерно-геологической интерпретации линеamentного рисунка земной коры было предложено рассматривать структурно-тектоническую роль линеamentов в формировании инженерно-геологических условий в рамках нового геологического направления на стыке инженерной геодинамики и линеamentной тектоники — *инженерной линеamentологии*, изучающей пространственные закономерности развития геологических процессов на основе анализа роли и значения линеamentов и их систем в эволюции земной коры.

Большое значение космическая информация имеет для охраны окружающей среды, и особенно в связи с инженерной защитой и

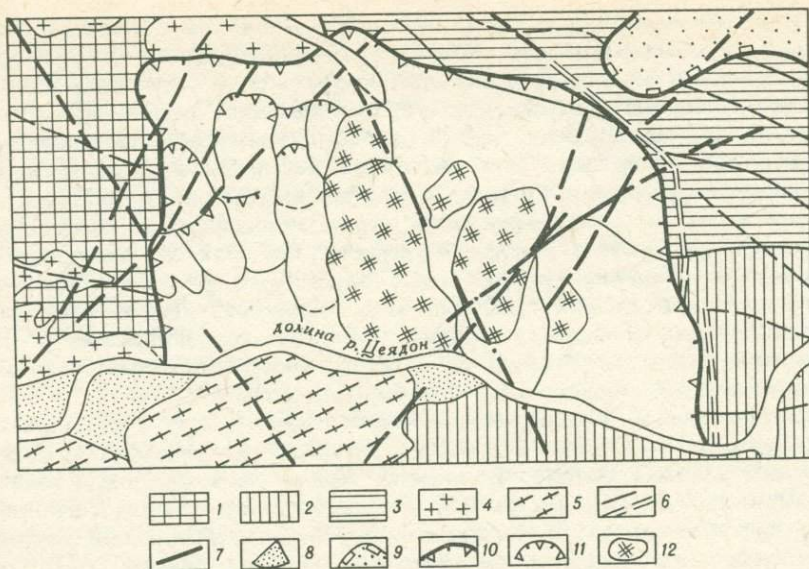


Рис. 68. Разрывно-линеamentный контроль стенки отрыва и элементов внутреннего строения Цейского оползневого массива (Северный Кавказ).

Отложения: 1 — протерозойские, 2 — палеозойские, 3 — мезозойские; породы: 4 — граниты, 5 — гранодиориты; элементы структуры и строения склонов: 6 — разрывы, 7 — линеamentы, 8 — конусы выноса, 9 — обвално-осыпные накопления, 10—11 — стенки отрыва оползней (10 — основная, 11 — дополнительная), 12 — отдельные блоковые оползни

рациональным использованием хозяйственно осваиваемых территорий при изучении участков смыва и засоления, формирования запрудных озер, при исследовании заболоченных, лавиноопасных и седелопасных районов, при документации и анализе изменений природной среды, вызванных строительством таких крупных объектов, как, например, Байкало-Амурская магистраль, Главный Каракумский канал, или возникших в результате переброски стока рек, создания крупных водохранилищ, миграции «смоговой» облачности, опустынивания территорий и т. д.

Систематическое наблюдение за метеогидрогеологической обстановкой в районах, где она становится экстремальной, представляет собой третью сферу применения космической информации в инженерно-геологических исследованиях. Гидрометеорологические прогнозы, основанные на данных космических съемок районов снегонакопления и снеготаяния или сокращения площади ледников, дают возможность полнее, разнообразнее и оперативнее учитывать гидрометеорологический фактор при изучении и прогнозах оползней, обвалов, и особенно селевых потоков, т. е. осуществлять инженерно-геологический контроль за состоянием и развитием экзогенных геологических процессов, тем более что сведения о последних могут быть получены одновременно для больших территорий и сопоставлены с гидрометеорологическими данными за то же время.

Одной из актуальнейших и важнейших задач в деле охраны геологической среды и слежения за метеогидрогеологической обстановкой является организация аэрокосмического мониторинга (АКМГС), под которым понимается система регламентированных периодических дистанционных наблюдений за состоянием геологической среды и ее пространственно-временными изменениями под влиянием природных и техногенных факторов. Цель АКМГС — оперативное слежение и контроль за состоянием геологической среды, использование дистанционной информации для локальных и региональных прогнозов ее изменений под влиянием природных и антропогенных факторов. Объектом АКМГС является изменяющаяся часть геологической среды, прямо или косвенно отражающаяся на материалах дистанционного зондирования: физико-механические и прочностные свойства горных пород; минерализация и глубина залегания грунтовых вод; закономерности развития современных геологических процессов как природных (оползни, обвалы, сели, карст, сейсмичность, вулканизм и пр.), так и техногенных (переработка берегов водохранилищ, заболачивание, проседание и т. д.). Информация АКМГС должна использоваться при составлении схем рационального размещения производительных сил и отраслей народного хозяйства, территориальных комплексных программ охраны природы, отраслевых схем охраны и использования минеральных ресурсов, при перспективной разработке экологических разделов государственных планов и т. д.

Космическая информация в настоящее время широко используется при изучении всего комплекса экзогенных геологических процессов: склоновых — оползневых, обвальных, осыпных, селевых; ледниковых, карстовых, эоловых, эрозионных, абразионных и пр.

Например, применение КС помогает правильно оценить геолого-геоморфологические условия формирования *селей*. Наиболее эффективно применение КС при мелко- и среднемасштабном картографировании селевых явлений, когда основной задачей работы является именно анализ условий развития. Дешифрирование КС мелкого масштаба позволяет: а) уточнить границы геоморфологических районов или типов рельефа; б) оконтурить площади сгущения тектонических трещин, разрывов или линеаментов; в) оценить степень эродированности или обнаженности территории. Космические снимки среднего масштаба в сочетании с наземными и аэровизуальными работами могут быть использованы на ключевых участках для типизации селевых бассейнов при составлении среднемасштабных селевых карт.

Материалы дистанционного зондирования могут применяться и при изучении областей *современного оледенения*: крупные ледники и ледниковые массивы опознаются на МДЗ разного масштаба, особенно если снимки получены в конце лета, когда снег в горах в основном уже стаял. На таких снимках хорошо различимы область питания ледника и область абляции; устанавливается положение ледопадов, боковых и конечных морен; определяется морфологический

тип ледников (долинные, котловинные, каровые и др.). Особо следует подчеркнуть значение КС для мониторинга пульсирующих ледников.

Применение ДМ позволяет получить ценную информацию при изучении лавин — внезапных смещений или обрушений снежных масс с горных склонов, так как на КС могут быть выделены и контуры крупные снегосборные бассейны, где может происходить зарождение лавин, — кары, трог, эрозионные долины, денудационные котловины и др., а также получены необходимые данные об их форме, размерах, глубине, уклонах поверхности, характеристике растительного покрова и пр.

В результате использования космической информации наземные и аэрогеологические работы, характеризующиеся исследованиями от частного к общему, дополняются приемом от общего к частному, характерным при обработке КС, что приносит положительные результаты и уменьшает возможность различных ошибок, но не исключает из современных инженерно-геологических исследований традиционного комплекса аэрофотосъемочных, аэровизуальных и полевых наземных работ.

Изучение и картирование *геокриологических условий* территории с применением МДЗ основано на ландшафтном методе и состоит из собственно дешифрирования снимков и интерпретации результатов дешифрирования. Опыт исследования мерзлотных явлений и процессов в северных районах СССР, Канады и других регионов показал, что в геокриологии применимы различные виды МДЗ, но особенно эффективны многозональные космические фотоснимки. Многозональные КС, полученные камерой МКФ-2, обладают высокими информационными возможностями и пригодны для составления мелко- и среднемасштабных мерзлотных карт. Необходимо отметить, что специфика геокриологической интерпретации КС связана с совместным применением дешифрирования и расчетных методов. Результаты ландшафтного дешифрирования при этом используются как для получения исходных данных при расчете, так и для оценки и коррекции его результатов.

Ценность применения космической информации в *гидрогеологических исследованиях* заключается в том, что обработка МДЗ помогает исследователю устанавливать местоположение структурных (пликативных и дизъюнктивных) форм, которые могут влиять на динамику подземных вод.

При гидрогеологических исследованиях материалы космических съемок могут найти применение при решении следующих задач: изучении региональных закономерностей распространения подземных вод; мелко- и среднемасштабном гидрогеологическом картировании и районировании; исследовании условий формирования поверхностного и подземного стока и оценке взаимосвязи поверхностных и подземных вод.

В настоящее время КС широко используются как при общих, так и детальных поисках подземных вод речных долин, песчаных массивов, обводненных зон разрывных нарушений и повышенной

трещиноватости горных пород, конусов выноса и областей развития карста.

Использование МДЗ при общих поисках включает в себя составление: 1) ландшафтно-индикационной карты; 2) специализированной карты гидрогеологического районирования; 3) карты площадей, перспективных для поисков подземных вод; 4) рекомендаций для детальных поисков подземных вод.

Дешифрирование МДЗ является обязательным элементом детальных поисковых работ, так как получаемая в результате дешифрирования информация повышает общую информативность гидрогеологических карт, используемых при поиске, позволяет связать точечные и профильные наземные наблюдения в единую картину гидрогеологических условий территорий и более эффективно планировать проведение наземных работ.

В решении этих задач особенно важную роль играет предполевое дешифрирование МДЗ, позволяющее рационально разместить на изучаемой территории ключевые участки и региональные профили.

Гидроиндикация неглубоко залегающих подземных вод, активно влияющих на формирование свойств физиономических компонентов ландшафта, определяется чаще всего глубиной проникновения корневой системы растений-гидроиндикаторов. Дешифрирование здесь будет основываться на относительно хорошо разработанных системах геоботанических, геоморфологических и комплексных ландшафтных индикаторов.

Гидроиндикация подземных вод, располагающихся ниже границы корневых систем и практически не влияющих на растительность и рельеф территории, основана на оценке инфильтрации атмосферных осадков, влияющих на минерализацию и водный баланс подземных вод. Такая оценка производится за счет выявления отрицательных форм рельефа, способствующих инфильтрации, и густоты сети временных водопотоков, увеличивающей значение поверхностного стока.

Гидроиндикация напорных вод, отделенных от поверхности водоупором, производится не прямо, а косвенно — по результатам воздействия выделенных на МДЗ тектонических структур на инфильтрацию осадков и фильтрацию подземного стока.

Особое значение для движения подземных вод как платформенных, так и горно-складчатых областей имеют дизъюнктивные элементы геологической структуры, достаточно надежно выделяемые на МДЗ в виде линеаментов или их систем. Гидрогеологическая роль разрывных нарушений устанавливается по приуроченности к ним крупных концентрированных выходов подземных вод, высокодебитных скважин и наличию поверхностного стока, обусловленного подземным питанием. Комплексный анализ геометрических (протяженность, ширина, азимут простираения), структурных (кинематика, амплитуда), ландшафтных (распределение растительного покрова и рисунка гидросети) и дешифровочных (фототон) признаков позволяет получить данные для гидрогеологических целей.

В ряде случаев анализ пространственного распределения разрывов и линеаментов по данным МДЗ позволяет выявлять участки

перехвата потоков подземных вод и отвода их в другом направлении и уточнять границы распространения глубокозалегающих водоносных комплексов (артезианских бассейнов).

Оценка гидрогеологической роли дизъюнктивных нарушений является важной общетеоретической проблемой и практической задачей современной геологии. В ее решении большую роль должен сыграть корректно примененный линеаментный подход, эффективность которого доказана для многих отраслей современной геологии. Использование МДЗ в комплексе с имеющимися геолого-геофизическими и прочими данными поможет в поиске путей совершенствования методики оценки обводненности разрывных нарушений, тем более что и экономическая эффективность гидрогеологических работ с применением МДЗ возрастает примерно на 10—25% в зависимости от природных условий и типа месторождений подземных вод.

#### 12.4. Изучение шельфа

Космическую информацию о новейших и современных геологических процессах в пределах шельфа морских и океанических акваторий получают путем визуальных наблюдений с ПКК или в результате анализа изображения морского дна и поверхности воды на материалах различных космических съемок — сканерной, ТВ, ИК, РЛ и др.

Космовизуальные наблюдения морских акваторий проводятся регулярно во время полетов ПКК. Они дают возможность проводить наблюдения в разное время года при разных условиях освещенности поверхности моря и метеорологической обстановки.

Предполагается, что при фотосъемке из космического пространства можно получить изображение морского дна при глубинах больших, чем при аэрофотосъемках (более или менее достоверные изображения морского дна на КС получены при глубинах моря не более 90 м).

ТВ-съемка позволяет производить многочисленные повторные снимки через необходимые промежутки времени в различных природных условиях и при разном стоянии моря, сравнивать их между собой и, таким образом, получать информацию о динамике процессов, протекающих на поверхности моря. Представление информации с телекамер в цифровом виде облегчает ее обработку с помощью ЭВМ.

Возможности сканерной съемки, позволяющей регистрировать изображения в разных спектральных зонах, широко используются для получения изображения морского дна при глубинах моря, превышающих 20—25 м и для увеличения достоверности дешифрирования подводных геологических объектов, снятых в разных спектральных зонах.

Кроме того, сканерные снимки оказывают помощь при исследовании прибрежных частей суши, без чего нельзя обойтись при изучении геологического строения акваторий шельфа; а возможность

повторной съемки обширных территорий за сравнительно короткий (несколько часов, дней, недель) срок и в определенных (заданных) природных условиях позволяет изучить динамику процессов и отобрать снимки, полученные в безоблачную погоду, в наиболее благоприятных условиях.

Опыт использования ИК-съемки для геолого-геоморфологического изучения акваторий морских шельфов весьма ограничен; эти исследования находятся в стадии выявления возможностей ИК-метода и отработки методики получения соответствующей информации.

Использование материалов РЛ-съемки для изучения акваторий также ограничено: информация о геологических особенностях морского дна может быть получена только по косвенным признакам дешифрирования, т. е. по изображениям объектов и явлений на поверхности моря, которые взаимосвязаны со строением дна или процессами, протекающими в его недрах.

К перспективным дистанционным съемкам, находящимся в стадии разработки или апробации, относятся лазерная, люминесцентная, ультрафиолетовая, аэрогеохимическая и голографическая.

В заключение отметим, что фотографическая, ТВ- и сканерные съемки дают материалы, которые могут служить картографической основой, а ИК- и РЛ-съемки для этой цели пригодны меньше, так как на материалах этих съемок изображаются только поверхность моря и особенности ее строения: на ИК-снимках — температурные аномалии, на РЛ-снимках — поверхность воды или вспененные участки.

Представляется рациональной технологическая схема дешифрирования многозональных КС прибрежных акваторий, рекомендуемая Ю. Ф. Книжниковым, В. И. Кравцовой и др.

1. Определение наиболее информативного (для решения поставленной задачи) канала за счет просмотра изображений всех каналов.

2. Сбор максимума данных за счет дешифрирования наиболее информативных снимков с квантованием по выбранным уровням.

3. Извлечение дополнительной информации в результате последовательного дешифрирования снимков во всех зонах — от длинноволновых к коротковолновым.

4. Получение дополнительных данных в ходе просмотра негативов для выбора вариантов синтеза.

5. Дешифрирование цветных синтезированных снимков.

6. Составление сводной схемы дешифрирования КС.

Несмотря на небольшую глубину, для которой можно получать изображения дна с помощью съемок из космоса, последние имеют важное научное и практическое значение при геологическом изучении шельфа, так как на КС отображается дно прибрежного мелководья (внутреннего шельфа), недоступное для судов, выполняющих морские геологические исследования, и считавшееся до применения космических методов «мертвой зоной». В то же время без знания геологического строения этой зоны невозможно увязать данные о строении внешнего шельфа с данными о строении суши.

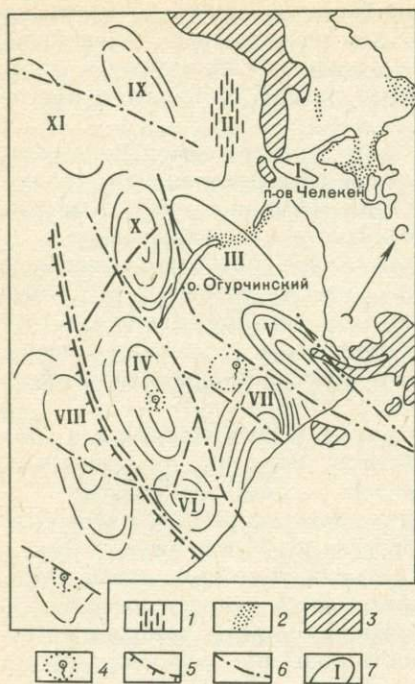


Рис. 69. Схема дешифрирования КС юго-восточной прибрежной акватории Каспийского моря, полученного с орбитальной станции «Салют-4». По В. В. Шаркову:

1 — мутная вода; 2 — песчаные мели; 3 — облака; 4 — газовые вулканы; 5 — границы мелко- и глубоководного шельфа; 6 — предполагаемые разрывные нарушения; 7 — антиклинальные структуры: I — Челекская, II — банка Джанова, III — Огурчинская, IV — Южно-Огурчинская, V — Западно-Эрдеклинская, VI — Новая (Западно-Кардашлинская), VII — Прибрежная (Восточно-Эрдеклинская), VIII — банки Ульского, IX — антиклиналь ЛАЭМ, X — Северо-Огурчинская, XI — антиклиналь Обручева

Данные геологического дешифрирования отображенных на КС мелководных банок и поверхностей островов могут быть экстраполированы на остальные части шельфа или же могут способствовать более рациональному планированию полевых геологических исследований.

Особое значение геологическое дешифрирование изображений дна на КС имеет для изучения новейших и современных дифференцированных тектонических движений, так как гидродинамические процессы (волны, течения) по-разному воздействуют на участки дна, приуроченные к растущим антиклинальным или синклинальным структурам, а также к дизъюнктивным нарушениям дна. Например, в пределах растущих антиклинальных структур (рис. 69) морское дно испытывает энергичное воздействие гидродинамических процессов, вызывающих интенсивную абразию и снос рыхлого материала за пределы структур, в результате чего на таких участках дна нередко наблюдаются положительные формы рельефа, подводные гряды, сложенные древними сцементированными породами; в пределах синклинальных структур, испытывающих погружение, наблюдаются преобладание аккумуляции и выравнивание рельефа дна; вдоль линий дизъюнктивных нарушений, проявляющихся часто в виде тектонических уступов, происходит скопление песчано-ракушечных отложений, дающих на снимках однородный светлый тон; изгиб пластов или интенсивные выходы газов четко изображаются на снимках в виде прерывистых белых (пенных) полос. Геологическая информа-

ция о дне шельфа может быть получена по косвенным признакам (индикаторам) дешифрирования (табл. 10).

Таблица 10

Косвенные индикаторы дна шельфа, по данным КС.

Составлена по материалам В. В. Шаркова, З. И. Гурьевой, Е. И. Кильдюшевского

Объекты индикации	Наименование индикаторов	Характеристика индикации	
Рельеф	<i>Типы волн</i>		
	1. Поверхностные волны	Изменение параметров волны наблюдается при глубинах моря, меньших $1/2$ длины волны	
	2. Внутренние волны	Образуются над подводными хребтами	
	3. Разрушение волн	Наблюдается при уменьшении глубины моря до $3/4$ высоты волны	
	4. Рефракция волн	По данным о глубине и скорости волн определяется глубина моря. По изгибам рефракционных волн выявляются элементы рельефа подводного берегового склона: ложбины, повышения и т. д.	
	5. Цунами	По возрастанию высоты волны устанавливается наличие подводных возвышенностей, образующих мелководные банки	
	<i>Состояние поверхности воды</i>		
	1. Топография поверхности океана	Зависит от рельефа дна	
	<i>Линейные тектонические нарушения</i>		
Структуры	Разрывы	Уступы в рельефе дна или асимметричные подводные хребты	
		Повышенные тепловые потоки, гидротермы и следы недавних вулканических извержений	
		Линейные газовыделения	
		Удлиненные пятна прозрачной воды среди мутных вод	
		Протяженные зоны апвеллингов	
		Трещины в ледовом покрове морей	
		Польны и пропарины в ледовом покрове морей	
		Удлиненные зоны разрежения или, наоборот, удлиненные зоны сгущивания облачного покрова	
		<i>Площадные тектонические нарушения</i>	
		Кольцевые структуры	Кольцевое расположение островов
	Кольцевые контуры островов или подводных впадин		
	Кольцевое расположение газовыделений, апвеллингов, облаков, теплового потока (предположительно)		

Объекты индикации	Наименование индикаторов	Характеристика индикации
Процессы	<i>Вулканизм</i>	<p>Изменения оптических свойств воды Локальное изменение параметров волн, выделение паров, появление участков бурлящей воды, изменение окраски воды — над действующими вулканами Выбросы воды, дыма, пепла, пемзового материала, извержение лавы — над действующими вулканами, конуса которых находятся относительно близко от поверхности воды Образование временных или постоянно существующих островов Помутнение воды за счет выброса пелитового материала Небольшие фонтаны воды или образование газовых грифонов Горящие факелы углеводородных газов Образование временных или постоянно действующих островов</p>
	<i>Образование полезных ископаемых</i>	<p>1. Разгрузка подземных вод (пресных термальных, ювенильных) 2. Нефтегазообразование</p> <p>Участки бурлящей воды — при спокойной поверхности моря Участки относительно гладкой воды — при волнении Пятна нефти, постоянно появляющейся в одних и тех же местах на поверхности моря Извержение газа, обычно вспенивающее воду</p>

### Вопросы для самопроверки

1. Перечислите задачи в области сейсмотектоники, сейсмического районирования и прогнозирования землетрясений, решаемые с помощью комплексного анализа КС, геолого-геофизических и сейсмологических материалов.
2. Расскажите об особенностях применения космической информации при изучении современного вулканизма.
3. При решении каких инженерно-геологических задач необходимо применение КС?
4. Дайте определение понятиям: инженерная линеаментология; аэрокосмический мониторинг.
5. При решении каких гидрогеологических задач могут применяться МДЗ?
6. Материалы каких космических съемок могут применяться при изучении шельфа?
7. Каков порядок рациональной технологической схемы дешифрирования КС прибрежных территорий?

# ПРИМЕНЕНИЕ КОСМИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ ПРИ ИССЛЕДОВАНИИ МИНЕРАЛЬНЫХ РЕСУРСОВ

---

## Глава 13

### НЕФТЕГАЗОГЕОЛОГИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

В настоящее время анализ материалов дистанционного зондирования стал неотъемлемой частью комплекса теоретических исследований нефтегазопроисковых работ. Во многих случаях космические изображения позволяют создать «общую картину» нефтегазоаккумуляции изучаемых регионов, в которой увязано в единое целое большое количество разнородных и разномасштабных факторов, каждый из которых при наземных исследованиях изучается по отдельности.

К важнейшим направлениям использования космической информации в нефтегазовой геологии следует отнести следующие: уточнение геологического (тектонического) строения чехла нефтегазоносных бассейнов; анализ их глубинного строения; геодинамический анализ областей нефтегазоаккумуляции; поиск потенциальных ловушек и путей миграции углеводородов; прямой поиск скоплений углеводородов, нефтегеологическое и нефтепрогнозное районирование.

#### 13.1. Уточнение геологического и тектонического строения бассейнов нефтегазоаккумуляции

Для проведения комплекса нефтегазопроисковых работ требуется хорошая геологическая изученность («подготовленность») территорий, а дешифрирование материалов дистанционного зондирования может внести существенный вклад в понимание геолого-геоморфологического строения. Это в меньшей степени относится к геологическим объектам, фиксируемым наземной съемкой, хотя и в этом случае иногда возможны значительные уточнения геологических карт. Однако максимальный эффект дает информация, основным или единственным источником которой являются КС: 1) особенности геологической структуры, как правило, сглаженные на равномасштабных геологических картах (малоамплитудные разрывы, угловатые очертания геологических тел, складчатые формы в наиболее деформированных толщах, субпараллельные системы трещиноватости и т. д.); 2) особенности и характерные рисунки эрозионного расчленения рельефа; 3) пространственные и генетические соотношения эрозионных и аккумулятивных форм рельефа; 4) пространственная форма

выходов геологических тел и трассировка разрывов, замаскированных маломощным четвертичным чехлом; 5) распространенность систем протяжения линейных элементов рельефа и геологической структуры (линеаментов); 6) наличие площадных изометричных образований ландшафта радиально-концентрического сложения (кольцевых структур); 7) особенности соотношения линеаментов и кольцевых структур с иными элементами геологического строения. Важность выявления этих данных связана с тем, что все они могут характеризовать разномасштабную и разноглубинную блоковость изучаемой территории и определенным образом соотноситься с распределением углеводородных скоплений. Например, линейные объекты дешифрирования оказываются важны при оценке перспектив локальных структур, обнаруженных наземными методами исследований. Так, развитую на локальных складках Керченского полуострова поперечную линейность интерпретировали как систему малоамплитудных сбросов, не обнаруживаемых при геологической съемке. Однако такие сбросы в толщах частого переслаивания проницаемых и непроницаемых пород могут служить тектоническими экранами и разбивать антиклинальные ловушки на блоки, представляющие независимые поисковые объекты. Это важно учитывать на структурах, которые, по данным наземной съемки, представляются едиными и в которых единичное бурение сводовых частей складок не дало практических результатов.

Анализ малоамплитудных деформаций, как линейных, так и площадных, широко применяется на всех стадиях нефтегазопромысловых и разведочных работ, а в последнее время и при обосновании методов освоения нефтяных и газовых месторождений. На основе уточнения геологического строения поддаются прогнозу размеры зон сероводородного заражения, локализации очагов обводнения залежей и др., что позволяет обоснованно определять места и условия закачки в пласт газа с целью повышения отдачи конденсатора и выбора места сооружения подземных газохранилищ.

Уточненные таким образом карты несут уже не только геологическую, но и геоморфологическую нагрузку, что существенно расширяет их возможности для постановки нефтегазопрогнозных исследований. Пример такой карты показан на рис. 70.

### 13.2. Анализ глубинного строения нефтегазоносных бассейнов

Необходимость изучения глубинного строения нефтегазоносных бассейнов (НГБ) диктуется несколькими обстоятельствами. Региональный анализ глубинного строения направлен на выявление структуры фундамента бассейна, во многом определяющей как строение чехла, так и закономерности миграции углеводородных флюидов, что оказывается важным при оценке распределения потенциальных залежей нефти и газа. Изучение глубинного строения отдельных поисковых площадей связано с тем, что очень часто структурные (и иные) ловушки перекрываются слабodeформированными осадками и плохо проявлены на поверхности или погребены в районах со сложным строением под надвигами, или, что характерно для

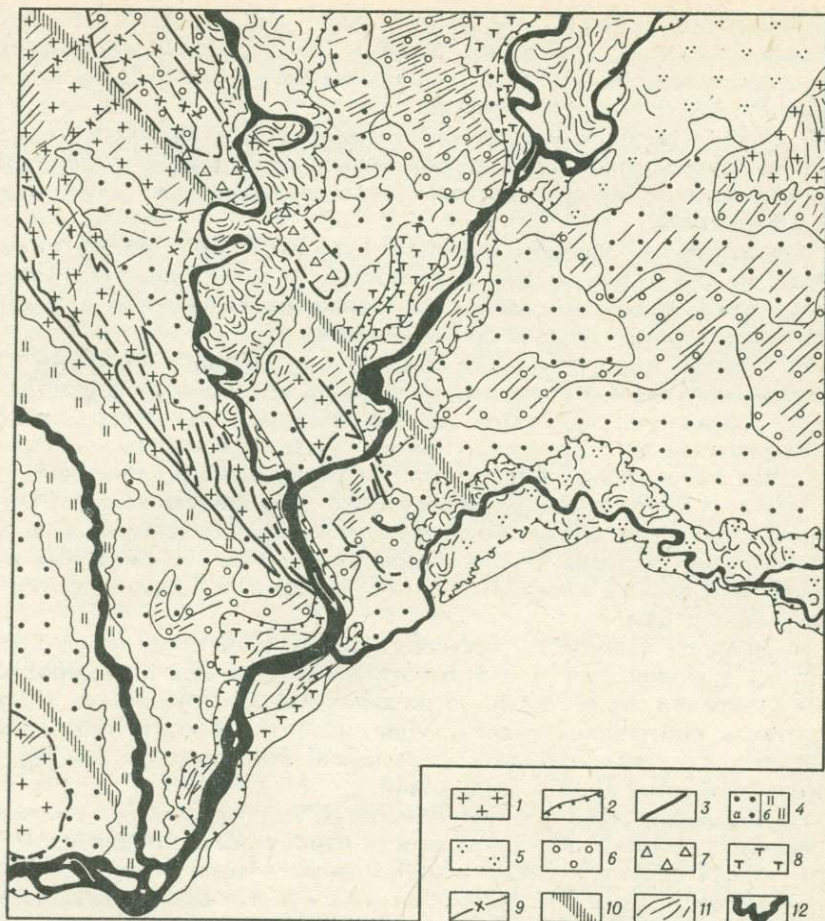


Рис. 70. Схема геолого-геоморфологического дешифрирования южной части Таджикской депрессии:

1 — антиклинальные хребты; 2 — молодые впадины; 3 — структурные хребты и гряды; 4 — слабобрасчлененные низкие поверхности: *a* — необработываемые, *b* — распаханные; 5—7 — высокие поверхности: 5 — слабобрасчлененные, 6 — умереннорасчлененные, 7 — расчлененные, предположительно отвечающие коннедационным молодым поднятиям; 8 — отчетливо выраженные аккумулятивные террасы; 9—10 — линейменты: 9 — короткие, отчетливо выраженные, 10 — расплывчатые протяженные; 11 — линии эрозионного расчленения; 12 — голоценовые отложения

многих НГБ юга СССР и других регионов, отделены от сложно-дислоцированных верхних частей осадочного чехла горизонтами дисгармонии и общего срыва; роль таких горизонтов обычно выполняют пластичные эвапориты или глинистые толщи.

Информацию о региональном глубинном строении получают, как правило, при изучении крупных линейментных зон, в той или иной форме отражающих региональную тектоническую и неотектоническую зональность. В СССР подобными исследованиями охвачены практически все нефтедобывающие регионы. Так, в Волго-Уральской

провинции прослежены субмеридиональные линеаменты от Прикаспийской впадины до Южного Тимана, обусловившие чередование узких протяженных прогибов и поднятий, вдоль которых выявлены и приразломные структуры-ловушки.

В Тимано-Печорской нефтегазоносной провинции подтверждено наличие закономерной сети региональных линеаментов; в зоне передовых складок Урала установлены не отмечавшиеся ранее сдвиговые структуры.

Прикаспийская впадина субширотной зоной линеаментов разделяется на два крупных блока: северный, с более мощной толщей протерозоя — палеозоя и южный, с сокращенным разрезом палеозоя и системой крупных сводов по подсоловому этажу.

На молодых платформах, где структуры фундамента погребены под мощным осадочным чехлом, дистанционные методы особенно эффективны. Среди тектонических элементов Туранской плиты, ранее не отраженных на структурных картах, выделены крупные поперечные зоны относительных поднятий. В Амударьинской синеклизе по КС изучены территории, не вовлеченные в активную четвертичную седиментацию; при этом в предпарапамизской и предгиссарской зонах выявлены системы крупных линеаментов, как подчиненных основной зональности соседних горно-складчатых сооружений, так и поперечных к ним.

В Западной Сибири по космическим снимкам прослежена перекрестная субширотная и субдолготная зональность. Субширотные зоны контролируют все крупные положительные структуры, а к субдолготным приурочены разделяющие их перемычки и седловины. Выяснено, что зоны новейших воздыманий и погружений наследуют структурный план юрских отложений.

Региональная структура фундамента НГБ изучается, как правило, на мелкомасштабных КС. Особенности отражения в ландшафте НГБ погребенных структур чехла обнаруживаются при анализе средне- и крупномасштабных КС. Задача решается двумя взаимосвязанными методами — аналоговым индикационным дешифрированием и выявлением внутренних, причинных зависимостей развития наблюдаемых ландшафтных элементов и механизмов глубинного структурообразования.

Первый метод заключается в изучении особенностей ландшафтного проявления известных (например, разбуренных) погребенных структур и составлении списка индикаторов, который потом используется как своего рода «обучающая выборка данных». В качестве примера приведем признаки отражения локальных положительных структур в рельефе юго-запада Туркмении.

Для аккумулятивно-абразивной равнины: увеличение абсолютной высоты локальных водоразделов по сравнению с фоном (ТК\*); деформации продольных русел временных водотоков (ТК); редкие транзитные русла временных водотоков (АС, РЛС); короткие (до 5 км) рассекающие уступы террас рек (АС, РЛС, ТК); дефляционные шоры (АС, РЛС, ТК); отсутствие эрозионных форм (АС, РЛС, ТК); увеличен-

\* В скобках указан источник информации: АС — аэрофотоснимки, КС — космические снимки, РЛС — радиолокационные снимки, ТК — топографические карты.

ное число береговых валов по сравнению с фоном (АС, РЛС, ТК); песчаные массивы среди глинистой пустыни (АС, КС, РЛС, ТК).

Для аккумулятивно-пролювиальной равнины: увеличение абсолютной высоты локальных водоразделов по сравнению с фоном (ТК); деформации продольных русел временных водотоков (ТК); увеличенные по сравнению с фоном врезы (АС, РЛС, ТК); дополнительные террасы в руслах временных водотоков (АС, ТК); дугообразная в плане форма русел высокого порядка (АС, РЛС, КС, ТК); «висячие» и «умирающие» русла временных водотоков (АС, РЛС); прямолинейные в плане русла временных водотоков (АС, КС, РЛС, ТК); мелкобугорчатый рельеф поверхности такыра (дефляционные эрозионные останцы) (АС); молодая упорядоченная овражная сеть (АС); песчаные массивы среди глинистой пустыни (АС, КС, РЛС, ТК).

Для песчаных массивов: увеличение абсолютной высоты водоразделов по сравнению с фоном (ТК); короткие (до 5 км) «слепые» крутоврезанные русла (АС, РЛС); крупные гряды (чаще всего меридиональные) песчаные (АС, ТК); увеличенная амплитуда расчленения по сравнению с фоном (ТК); «раздуваемые» пески — зарождающиеся дефляционные шоры (АС, ТК); повышенная обарханенность песчаного рельефа по сравнению с фоном (АС); резкие изменения в ориентировке генетически различных форм рельефа (АС, РЛС, ТК); дефляционные обращенные формы рельефа с выходами более древних отложений (АС, РЛС, ТК).

Сведения, полученные при дешифрировании КС, сопоставляются с данными обучающей выборки и, по аналогии с ними, определяют характер глубинного строения территории. Метод аналогово-индикационного дешифрирования применим для районов однородного геологического строения, в которых глубинная структура по всей площади в ландшафте следится одинаково и требует детальных исследований. Нельзя ограничиться выделением какого-либо одного индикационного признака глубинных структур (например, изометричной формы ландшафтных объектов); как правило, такое упрощенное дешифрирование практических результатов не дает.

Аналоговое индикационное дешифрирование — метод статистический. «Осредненные» данные обучающей выборки не могут учитывать всего разнообразия механизмов глубинного структурообразования, связанного с различным поведением горизонтов в разных тектонических условиях. Это заставляет включать в комплект работ по выявлению глубинных структур с помощью МДЗ структурно-тектонические данные и теоретические модели глубинного структурообразования.

### 13.3. Геодинамический анализ областей нефтегазоаккумуляции

Геодинамический режим территорий времени образования нефте-вмещающих толщ, а также геодинамические особенности их последующего деформирования — важные факторы пространственного распределения залежей углеводородов. Линейный в основном характер деформаций земной коры вызывает интерес геологов-нефтяников к обнаруживаемым на космических изображениях региональным линейным зонам и динамике их развития. По мнению С. В. Биджиева и Л. М. Натапова, для прогнозирования нефтегазоносности оказывается важным изучение крупных линейных зон. Во-первых, в отрицательных линейных структурах могут накапливаться наибольшие массы осадочных пород, содержащих органическое вещество; во-вторых, повышенный тепловой поток в мобильных линейных зонах

способствует преобразованию органического вещества в летучие углеводороды; в-третьих, растяжение земной коры поперек линейных зон может вести к образованию высокочемких коллекторов, а сопряженные с ними крупные положительные деформации могут служить ловушками. Наиболее перспективными признаются узлы пересечения региональных зон, в которых их положительные (в смысле нефтегазонакопления) качества суммируются.

Региональные линейные зоны нефтегазоносных бассейнов, расположенных в пределах мобильных областей, имеют, как правило, индивидуальные кинематические особенности, обусловленные внутренним полем напряжений этих областей. Данные о кинематических особенностях и геодинамических условиях зон крупных и крупнейших линеаментов являются важным источником информации для прогноза нефтегазоносности.

Как было показано Б. А. Соколовым и несколько ранее Абдель-Гавадом, наиболее благоприятной деформационной обстановкой для нефтегазонакопления является обстановка растяжения. Региональные линейные зоны растяжения, как рифтового, так и иных типов, служат своеобразными каналами, в которые вытесняются углеводородные флюиды из вмещающих пространств и по которым с наибольшей легкостью может происходить их латеральная и вертикальная миграция. В молодых горно-складчатых областях это обстоятельство может приводить к своеобразному пространственному распределению залежей углеводородов. Поскольку в этих областях линейные зоны растяжения расположены вкрест основной тектонической зональности, то естественно ожидать, что и скопления углеводородов будут располагаться цепочками поперек выделяемых обычно антиклинальных линий, приурочиваясь, главным образом, к узлам пересечения зон растяжения и структур памяти; играющих роль ловушек. Изучение космических снимков Памяти-Алая показало (рис. 71), что рассмотренная модель хорошо соответствует пространственному распределению залежей углеводородов в этом регионе. Области наиболее активного нефтегазонакопления юго-западного Гиссара и Таджикской депрессии расположены поперек складчатой структуры и приспособлены к крупнейшим региональным линеаментам северо-западного простирания, которые развиваются в обстановке относительного растяжения. В полосе, тяготеющей к так называемому Алакутанскому линеamentу, находится половина известных месторождений региона, а в зонах других крупных линеаментов этой системы известны отдельные месторождения и проявления нефти и газа. Это позволило в качестве наиболее перспективных рекомендовать районы, контролируемые региональными (и крупными локальными) линейными зонами северо-западного простирания, в которых и должен быть сосредоточен поиск потенциальных ловушек.

#### 13.4. Поиск потенциальных ловушек нефти и газа

Эта разновидность нефтегазогеологических исследований направлена на выявление с помощью дистанционных методов геологических

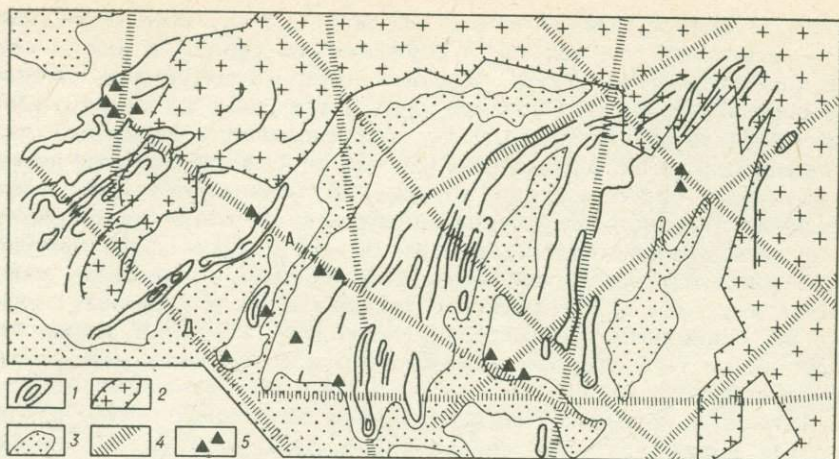


Рис. 71. Структурно-геологическая схема Памиро-Алая:

1 — отчетливо дешифрируемые геологические тела; 2 — области интенсивных молодых (позднеплейстоцен-голоценовых) поднятий; 3 — области молодых опусканий; 4 — региональные линейменты (А — Алакутанский, Д — Дарьинский); 5 — промышленные скопления углеводородов

объектов, которые могли бы при благоприятных условиях концентрировать нефть и газ. Это либо вторичные структурные формы (антиклинальные складки, валы и своды; экранированные разрывами участки моноклиналей и т. д.), либо первичные (осадочные) структуры, связанные с условиями седиментации комплексов, вмещающих нефть и газ (биогермные образования, зоны выклинивания продуктивных толщ и пр.). Вторичные структурные формы (называемые также структурными ловушками) могут быть раскрытыми и погребенными в рельефе, могут находиться в режиме активного развития и быть пассивными по отношению к современным движениям. Все это накладывает отпечаток на методику поиска и идентификации соответствующих объектов.

Наиболее просто обнаруживаются раскрытые в рельефе антиклинальные складки. Поскольку нефтемещающие структуры имеют, как правило, значительные размеры (первые километры в длину, иногда значительно больше), при благоприятных условиях они выявляются даже на мелкомасштабных КС. Обычно геологическое строение нефтегазоносных бассейнов хорошо изучено, поэтому шанс выявить этим способом новые структуры очень невелик; однако уточнение строения известных складок (на снимках детального уровня) может привести к обнаружению новых поисковых объектов.

Методика поиска погребенных пассивных структурных ловушек в целом соответствует описанной методике изучения локальной глубинной структуры и сводится к целенаправленному поиску ландшафтных форм-индикаторов погребенных антиклиналей (или иных структурных форм). Как показывают многочисленные исследования, погребенные пассивные антиклинали сильно влияют на гидрогеологический режим территорий, причем в зависимости от конкретной

геологической обстановки может наблюдаться как обводнение надантиклинальных грунтов, так и осушение их. Однако в любом случае погребенная структура «выдает» себя изометричным пятном аномальной влажности, которое опознается либо по спектрально-яркостным характеристикам, либо опосредованно, в вариациях растительного покрова. В некоторых работах описываются многие десятки подобных «фотоаномалий, которые рассматриваются как прямые поисковые признаки погребенных ловушек». Несмотря на то что по некоторым оптимистичным оценкам 80—90% таких фотоаномалий подтверждается наземными географическими и буровыми работами, следует все же остерегаться распознавания погребенных структур по единичным индикаторам, поскольку аномалии влажности могут вызываться самыми разнообразными, в том числе и не структурными причинами.

Актуальна проблема поиска активных локальных структур. Поисковые объекты в этом случае называются «локальными поднятиями», поскольку их конкретная геологическая природа дистанционными методами зачастую не определяется. Набор признаков-индикаторов локальных поднятий во многом зависит от того, в какой геоморфологической фазе развития они находятся. Поднятия в конседиментационной фазе развития индицируются теми же ландшафтными признаками, что и пассивные погребенные структуры, но здесь, кроме того, становится возможным общий анализ глубинной и поверхностной блоковости территорий, связанный с изучением линейментных систем.

Локальные поднятия очень часто оказываются просто одним из элементов этой блоковости. Изучение линейментов и «кольцевых структур» (в данном случае изометричных аномалий разной ландшафтной природы) позволяет наметить перспективные объекты даже в однообразных по геологическому строению областях современных опусканий.

Локальные поднятия, находящиеся в конденудационной фазе и на ранних этапах конэрозионной фазы развития, могут индицироваться очень широким спектром ландшафтных, в том числе геоморфологических, особенностей. Так, для межгорных впадин описан следующий набор индикаторов локальных поднятий: резкое сужение долин рек; локальное увеличение вреза эрозионной сети; спрямление русел транзитных водотоков; коленообразные изгибы рек и обтекание гидросетью изометричных площадей; аномальное меандрирование рек; аномальная форма конусов выноса и латеральная миграция конусов и сухих дельт; латеральная миграция русел рек; изометричные площади локального осушения или увлажнения; концентрическое расположение зон увлажнения и осушения; изометричные группы эрозионных останцов; площади аномального мозаичного расчленения; реликты древних поверхностей в областях позднейшей переработки; концентрическое расположение замкнутых линейных фотоаномалий неясной природы и обтекание их гидросетью. Здесь не названы признаки, которые могли бы прямо индицировать раскрытые в рельефе антиклинальные структуры. Понятно, что в областях с

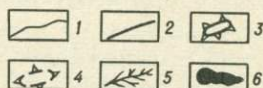
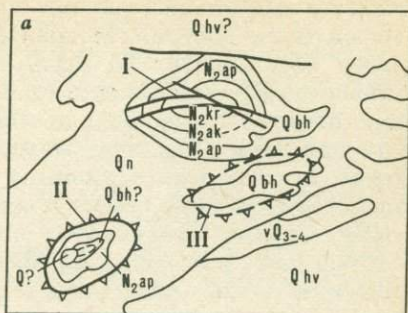


Рис. 72. Геологическая схема Южно-Монжуклинского локального поднятия по данным дешифрирования КС (а) и схема рельефа его сводовой части по данным аэровизуальных наблюдений (б). По М. Л. Конну:

1 — геологические границы; 2 — разрывные нарушения; 3—4 — локальные поднятия: 3 — установленные, 4 — предполагаемые; 5 — временные водотоки; 6 — дендритовидные потоки солей (сальзы). Поднятия: I — Монжуклинское, II — Южно-Монжуклинское, III — Беркелинское

другим геологическим строением список индикаторов может быть иным.

На рис. 72 показаны схема дешифрирования среднемасштабных КС и схема строения рельефа Южно-Монжуклинского локального поднятия, расположенного в Западно-Туркменской впадине. На мелкомасштабных КС предполагаемое поднятие дешифрируется в виде правильного, четко ограниченного овала светло-серого фототона среди темно-серых голоценовых отложений. Поскольку темный фототон последних обусловлен обводненностью, можно предполагать, что рассматриваемый светлый участок более осушен, т. е. может представлять собой возвышенность, однако по данным дешифрирования мелкомасштабных КС каково-либо определенное заключение о ландшафтной природе фотоаномалии сделать нельзя.

На среднемасштабных КС исследуемая площадь также имеет светлый фототон, но при этом видно ее концентрическое строение: более темное ядро окружено светлой оторочкой, заметны дугообразные темные полосы (возможно маркирующие горизонты), расположенные параллельно контуру овала, обозначающему внешнюю границу поднятия. Кроме того, заметна разветвленная радиально-центробежная эрозионная сеть; на черно-белых КС она лучше видна на светлой оторочке овала, на спектрзональных — и в его ядре. Среднемасштабные КС позволяют уточнить конфигурацию исследуемого объекта. Правильное овальное замыкание отмечается только в северо-восточной части, юго-западное окончание перекрыто современными отложениями, возможно грязевулканическими.

В результате аэровизуальной и наземной проверок схем дешифрирования выяснилось, что рассматриваемая фотоаномалия в рельефе

представлена очень пологой возвышенностью высотой несколько метров. Более светлая, по сравнению с окружающим фоном, окраска холма обусловлена его осушенностью. Возвышенность расчленена хорошо разработанной эрозионной сетью, отмечается три, иногда четыре порядка эрозионных ложбин. Интересная особенность локального поднятия — наличие многочисленных восходящих соленых источников; от многих источников остались лишь следы в виде дендритовых потеков соли, выделяющихся ярко-белой окраской. В центре холма выходят красноватые породы (глины и алевролиты), соответствующие темному ядру фотоаномалии. Эти породы, вероятно, являются ниже- или среднечетвертичными отложениями, окруженными полем голоценовых осадков.

Рассмотренные факты доказывают соответствие фотоаномалии конденсационному локальному поднятию с возможной амплитудой не менее нескольких десятков метров. Высокоточная гравиразведка, поставленная здесь для идентификации данных дистанционного зондирования, показала положительную граваномалию.

Такого рода детальный геолого-геоморфологический анализ предполагаемых локальных поднятий по данным дешифрирования является желательным, но возможен далеко не всегда, т. е. очень часто собственно геологические индикаторы в пределах исследуемых площадей не наблюдаются и индикация носит косвенный характер.

В пределах Днепровско-Донецкой впадины индикаторами глубинных структур служат древние ледниковые формы рельефа. Геоморфологическое дешифрирование МДЗ позволило изучить распределение и морфологию проходных долин (являющихся древними долинами стока талых вод Днепровского ледника), заложенных по зонам повышенной трещиноватости. В результате получена информация для выделения глубинных локальных поднятий, перспективных для поисков нефти и газа, которые расположены внутри ячей, образованных слившимися проходными долинами (т. е. внутри блоков, разграниченных крупными линеаментами).

Рассмотренные примеры показывают большие возможности МДЗ для появления в различных нефтегазоносных провинциях ландшафтных аномалий, соответствующих с большей или меньшей определенностью локальным структурам. На многих из них открыты промышленные залежи. Поиск предполагаемых локальных поднятий идет на разных уровнях понимания геологической ситуации, отраженной на космических изображениях: в рамках геологических моделей изображения локальные структуры определяются с наибольшей достоверностью, но ввиду обычно хорошей изученности территорий НГБ прирост новой информации невелик; в рамках ландшафтных моделей количество вновь открываемых поисковых объектов увеличивается, но достоверность их несколько уменьшается; если ограничиться тонально-геометрическими моделями, то число новых потенциальных ловушек, открываемых в НГБ, исчисляется десятками, однако их подтверждаемость, как правило, невелика.

Поэтому не случайно во всем мире признается большое значение МДЗ для поисков нефти и газа. Опубликованные космические

изображения 15 крупнейших нефтегазоносных месторождений-гигантов позволили заключить, что эти месторождения могли бы быть открыты раньше, если бы космическая информация была ранее доступна. Эти исследования особенно эффективны в слабоизученных НГБ, а также в областях равнинного малоcontrastного рельефа.

### 13.5. Прямые поиски залежей нефти и газа

Обнаружение потенциальных ловушек нефти и газа не гарантирует того, что они будут содержать скопления углеводородов. Поэтому в последнее время развернуты широкие работы по выявлению ландшафтных и иных признаков, связанных непосредственно с наличием газонефтяных залежей.

Для прямого выявления углеводородов сейчас намечается возможность использования тепловой съемки, главным образом, с самолетных носителей. Возможность распознавания залежей обусловлена тем, что в связи с окислением углеводородов, мигрирующих из скоплений нефти и газа в вышележащие пласты, где наблюдается свободный обмен и аэрация, происходит выделение тепла. В пределах акваторий поиски нефти и газа выполняются путем идентификации нефтяных пленок и газопроявлений.

Примеры успешного применения ИК-съемки для нахождения нефтегазовых залежей есть на территории Украины и Западного Казахстана. В последнем случае установлено, что поле повышенных радиационных температур совпадает с контуром газовой шапки, расположенной в своде нефтяной залежи. Необходимо отметить, что, в связи с малой амплитудой тепловых аномалий и высоким уровнем тепловых помех, применение тепловой съемки для поисков углеводородных скоплений на суше затруднено. Лучше обстоит дело со съемкой водных поверхностей в этих же целях, весьма распространенной в последнее время благодаря расширению нефтегазопроисковых работ на шельфах окраинных и внутренних морей. Это связано с тем, что водная поверхность является уникальной по однородности средой и здесь удается фиксировать малоамплитудные тепловые аномалии. Хорошим примером такого рода может служить использование тепловой съемки для поисков газопроявлений в северной части Адриатического моря.

Морские газопроявления здесь были известны давно, однако распознавание их по материалам тепловой съемки установлено лишь в результате специальных работ. Предполагалось, что на поверхности моря должны обнаруживаться отрицательные термальные аномалии, связанные с газопроявлениями. Летом температура воды на морском дне значительно ниже, чем на поверхности. Газ, выделяясь с температурой, близкой к температуре воды на дне, поглощает тепло из окружающей среды и охлаждает слои воды на своем пути к поверхности. Другая гипотеза предполагает, что газ должен обнаруживаться в тепловых аномалиях на поверхности благодаря расширению, поскольку на глубинах более 40—60 м он находится под давлением в 0,4—0,6 МПа, при подъеме газ увеличивается в объеме и значи-

тельно охлаждается. По третьей гипотезе, газовые пузырьки, двигаясь вверх, вызывают слабую циркуляцию и перенос холодной воды на поверхность моря.

Для тепловой съемки был использован ИК-сканер, имеющий два канала (3—6 и 8—14 мкм) и точность определения температур в  $0,2^{\circ}\text{C}$ . Залеты выполнялись после полудня при минимальном волнении и ветре; таким образом достигалось соблюдение требований о желательности проведения тепловой съемки в период максимально высоких температур морской поверхности, когда фиксация отрицательных тепловых аномалий наиболее вероятна.

При анализе термограмм было выявлено 28 мест с тепловым режимом, не соответствующим нормальному распределению температур на морской поверхности. Все выявленные аномалии были связаны с уменьшением температуры в зонах круговой формы. Иногда это был более или менее правильный круг, но часто круги пересекались между собой. Снижение температур составляло обычно  $0,2$ — $0,3^{\circ}\text{C}$ , поэтому газопроявления идентифицировались, скорее, по правильной форме аномалий, чем по температурным различиям.

После анализа термограмм выполнялась проверка выделенных тепловых аномалий на месте. Для этой цели использовался корабль, оборудованный эхолотирующей аппаратурой. Анализ полученных результатов показывает, что из 28 выявленных аномалий 14 определенно соответствуют газопроявлениям, 4 близки к ним, 4 отвечают нефтяным пятнам на поверхности моря (неизвестного происхождения) и для 6 причины неясны. В целом полученные результаты показали, что использованная методика поисков природных газопоявлений на морской поверхности с помощью тепловой съемки достаточно эффективна и может быть рекомендована для сходных условий.

В некоторых случаях прямые поиски ловушек нефти и газа могут выполняться путем поисков участков выщелачивания в осадочных породах. Такие участки, например, были обнаружены в песчаниках Уиндейт штата Юта (США), обнажающихся на крыле антиклинали, вмещающей залежи углеводородов. Здесь установлено, что вблизи путей просачивания битумов наблюдаются скопления урановых минералов и признаки выщелачивания, проявляющиеся в замещении полевых шпатов глинистыми минералами. Экспериментальные данные показали четкую приуроченность участков измененных пород к известным залежам углеводородов, а по многозональным снимкам весьма эффективно осуществлено распознавание участков измененных пород. Продемонстрирована принципиальная возможность прямого нахождения залежей углеводородов методами дистанционного зондирования — в тех случаях, когда они сообщаются с поверхностью зонами просачивания.

Разрабатываются методики прямого поиска нефтегазовых залежей с помощью выявления участков растительности с аномальными яркостными свойствами (геоботанических аномалий). Одна из рабочих гипотез основывается на предположении, что зоны проникновения углеводородов на поверхность будут выражаться на сканерном

изображении линеаментами, которые становятся заметными благодаря влиянию нефтегазовых аномалий на состав или состояние растительного покрова. Для наземной проверки проявлений углеводородов использовался метод газовой съемки с отбором проб почвенного воздуха из неглубоких (до 1,2 м) скважин и определением содержания пропана в пробах. Наблюдалась приуроченность участков кленового леса к газовым аномалиям, маркирующим промежуточные резервуары углеводородов, т. е. подтвердилась принципиальная возможность использования данной методики. Интересны также результаты специальных геохимических исследований по изучению природы геоботанических аномалий, выявляемых самолетным сканером. Установлено, что аномалии соответствуют зонам угнетенной растительности, которая существует на участках наиболее высоких содержаний газообразных углеводородов в почвенном воздухе. В пределах тестового участка в округе Свитуотер в Вайоминге, США, были выполнены геохимические исследования, при которых в почвенных пробах определялось содержание свободных газов, а также газов, образующихся при разного рода воздействии на образцы. Для всех данных отмечена преимущественная локализация аномалий с наиболее высоким содержанием газов вблизи зон линементов и непосредственно в них. С аномалиями содержаний свободных газов хорошо совпали результаты измерений флюоресценций, которые также коррелируются с присутствием в почвах песчаной фракции. Эти данные показывают вполне реальные возможности дистанционного обнаружения довольно малых газопроявлений. Последние могут быть как природными, так и техногенными, связанными с разработкой нефтяных и газовых месторождений.

Рассмотренные методики прямого поиска залежей углеводородов предусматривают применение пассивной измерительной аппаратуры (в основном ИК-сканеров). В настоящее время для этих целей отрабатываются и проходят экспериментальную проверку активные дистанционные измерительные комплексы, осуществляющие так называемую лидарную спектрометрическую съемку.

В основу методики лазерной спектрометрии метана положено резонансное поглощение метаном ИК-излучения гелий-неонового лазера, излучения которого на двух длинах волн генерации по-разному поглощаются метаном и практически одинаково — атмосферными осадками, пылью, туманом. Это позволяет на основании регистрации изменений отношений мощностей излучений лазера после прохождения в атмосфере некоторого пути судить о среднем содержании метана. По мере совершенствования аппаратуры, лидарная спектрометрия обещает стать надежным методом дистанционного изучения зон дегазации углеводородных залежей и прямого распознавания последних.

Приведенные примеры показывают, что развитие дистанционных методов для поисков нефти и газа идет в двух направлениях — с одной стороны, это структурный анализ (в том числе анализ линементов), комплексная интерпретация результатов дешифрирования и геолого-геофизических материалов, структурно-геоморфологические

исследования. Второе направление — прямые поиски нефти и газа; развитие технологического обеспечения этих методов дает надежду на дальнейший прогресс в этой области исследований.

### 13.6. Нефтегазогеологическое районирование

Нефтегазогеологическое районирование, проведенное с помощью дистанционных методов, следует, вероятно, рассматривать как обобщение всей информации, касающейся как пространственного распределения углеводородов, так и тектонических (структурных) факторов контроля этого распределения. При этом учитывается информация, полученная как дистанционными, так и контактными (наземными) методами. Карты нефтегазогеологического районирования имеют обычно тектоническую основу, на которой показываются основные тектонические элементы изучаемой территории, строение фундамента и (или) важнейших в нефтегазовом отношении стратиграфических комплексов, разрывные нарушения, складчатые структуры и пр. На карту выносятся известные месторождения и проявления нефти и газа и, кроме того, предполагаемые локальные поднятия и другие поисковые объекты, обнаруженные при анализе дистанционных материалов; показываются основные линеаменты разного уровня и площадные объекты дешифрирования, которые могут представлять интерес в нефтегазогеологическом отношении. При наличии соответствующих данных, необходимо показывать геодинамические или кинематические характеристики линейных структур, соответствие разноглубинных структурных планов, возможные пути миграции углеводородных флюидов, элементы структуры геофизических полей и пр. Очень важно, чтобы карты районирования не представляли собой случайный набор не увязанных между собой данных; карта нефтегазогеологического районирования должна быть системна и адекватно отражать представления составителя об источниках, путях миграции и местах локализации углеводородов в связи с общей геодинамикой исследуемого региона.

#### *Вопросы для самопроверки*

1. Каким образом на космическом изображении можно различить останцовые возвышенности и активно развивающиеся локальные поднятия?

2. Как может выглядеть в ландшафте (и на КС) типичная ассоциация структур, перспективная на нефть: региональная зона растяжения + поперечное антиклинальное поднятие?

3. Какой комплекс структур следует отражать на картах нефтегеологического районирования с использованием МДЗ?

## ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МДЗ ПРИ ПРОГНОЗЕ И ПОИСКАХ РУДНЫХ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ

Основной объем космической информации, применяемой в металлогенических исследованиях (с целью прогнозирования и поиска полезных ископаемых) относится к выявлению структурных факторов, контролирующих оруденение, и имеет косвенное поисковое значение. К прямым признакам может быть отнесено распознавание рудоносных околорудных пород: зон гидротермальных изменений и окислений, а также геохимических аномалий путем спектрометрических измерений.

К информации, выделяемой по КС и имеющей металлогеническое значение, относятся линейные и кольцевые структуры, площадные (складчато-блоковые) объекты, литолого-стратиграфические комплексы (формации), зоны раздробленных гидротермально измененных пород. Кроме того, по КС, в комплексе с геологическими и геофизическими данными, выделяются также разнопорядковые зоны сжатия, растяжения и сдвига, выявление которых важно при металлогенических построениях с позиций мобилизма.

С помощью КС при металлогенических исследованиях и поисковых работах на рудные полезные ископаемые решаются следующие задачи:

выявление скрытых структур и структур наложенного типа, имеющих важную в металлогеническом районировании роль;

ускоренное доизучение геологических объектов, контролирующих размещение рудной минерализации, и выявление вулканоплутонических структур и нескрытых плутонов как объектов для постановки поисков рудных полезных ископаемых;

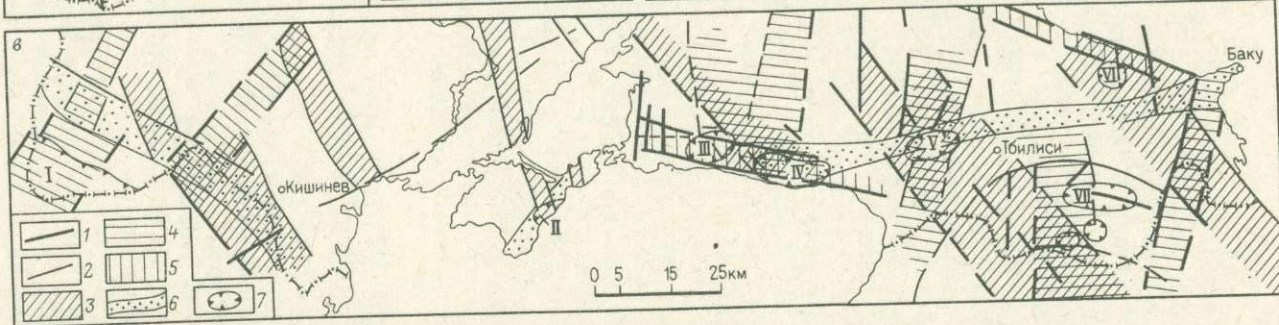
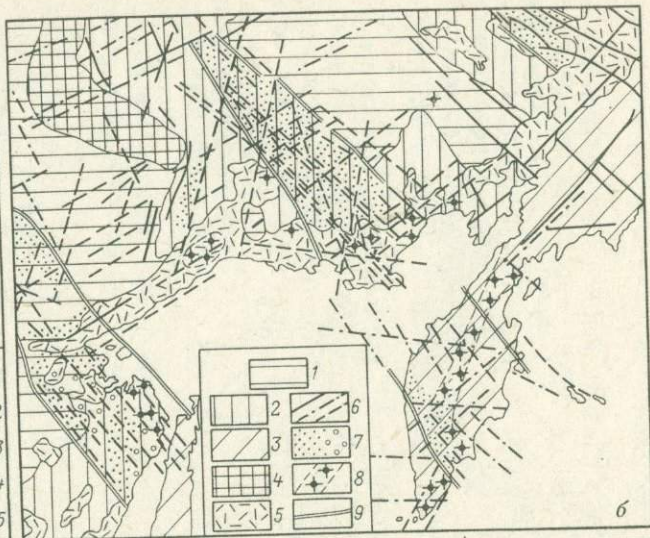
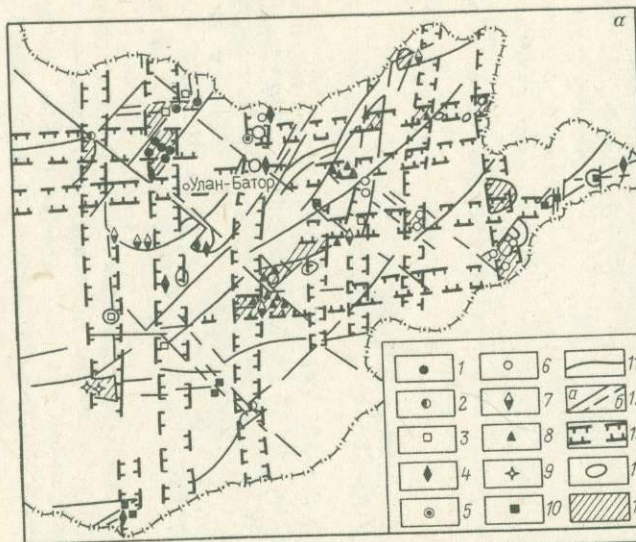
выявление разломных рудоконтролирующих и рудоконцентрирующих зон глубинного происхождения;

изучение узлов повышенной тектонической проницаемости — линейных, кольцевых, очаговых и др.

### 14.1. Изучение линейных рудоконтролирующих и рудоконцентрирующих структур

Среди работ советских специалистов в области выявления пространственных и генетических связей между линейными структурами, выделенными по КС, и металлогенией в первую очередь следует назвать исследования И. К. Волчанской, С. В. Мартиросяна, В. В. Моралева, Е. Н. Сапожниковой, В. З. Сахатова, Ю. Г. Сафонова, И. И. Сониной, И. Н. Томсона, М. А. Фаворской, Н. А. Яковлева и др.

Металлогеническая роль наиболее крупных глобальных и региональных линейных элементов была установлена и показана до применения МДЗ, однако широкое использование КС стимулировало исследования в этом направлении. Среди глобальных и региональных



линеаментов металлогеническое значение имеют структуры сквозного типа.

Для металлогенического анализа важны зоны сквозных систем дислокаций шириной 20—80 км, которые оживлялись в периоды тектономагматической активизации, являясь обычно секущими по отношению к фанерозойским тектоническим сооружениям и прослеживаясь в их пределах в виде различных геологических и геоморфологических аномалий.

На поверхности Земли сквозные структуры выражаются не в виде единого, фиксируемого соответствующими геологическими признаками разлома, а в виде системы мелких однонаправленных по простиранию нарушений — на одних участках, в виде границы мощностей и фаций осадков — на других или в виде цепочки наложенных понижений и впадин — на третьих. Все эти признаки позволяют четко диагностировать сквозные структуры на КС, где они выражены отдельными, последовательно расположенными звеньями с разной степенью выраженности перечисленных признаков. Одни структуры сквозного типа непосредственно наблюдаются на монтажах мелко-масштабных КС, а для выявления других разработаны специальные приемы морфоструктурного анализа и дешифрирования микротрещиноватости.

Установлено, что некоторые сквозные структуры в пределах рудных провинций определяют размещение наиболее крупных месторождений, что позволило И. Н. Томсону и М. А. Фаворской выделить такие структуры в качестве рудоконцентрирующих, так как именно на пересечении последних с традиционно выделяемыми структурно-металлогеническими зонами, согласными с доминирующим тектоническим планом региона, и возникают наиболее крупные скопления минерализации.

Таким образом, применение КС позволило выделить и, в определенной мере, противопоставить друг другу два типа структур земной коры: *рудоконтролирующие* металлогенические зоны, опре-

Рис. 73. Варианты использования КС в металлогенических исследованиях:

а — при определении узлового контроля размещения месторождений (на примере Восточной Монголии).

По И. К. Волчанской.

1—10 — месторождения: 1 — золота, 2 — меди, молибдена, 3 — железа, 4 — олова, 5 — вольфрама и молибдена, 6 — вольфрама, 7 — олова и вольфрама, 8 — плаикового шпата, 9 — железа, фтора, редких земель и стронция, 10 — свинца, цинка и меди; 11 — крупнейшие линеаменты, ограничивающие структурно-геоморфологические области и зоны; 12 — линеаменты, участвующие в формировании рудокализирующих структурных узлов и выраженные: а — непрерывно, б — фрагментарно; 13 — сквозные зоны, выраженные системами структурно-геоморфологических аномалий; 14 — кольцевые морфоструктуры, вмещающие рудобные и перспективные площади; 15 — структурные узлы, вмещающие минерализацию.

б — при выделении металлогенических поясов (на примере кварцево-рудных поясов Востока СССР).

По В. С. Крайцову.

1 — платформенные области; 2 — складчатые мезозойды; 3 — складчатые альпиды; 4 — Предверхоайский краевой прогиб; 5 — вулканические пояса; 6 — крупнейшие разломы, установленные по геологическим данным, геофизическим материалам и с помощью дешифрирования КС; 7—8 — кварцево-рудные пояса; 7 — секущие, 8 — согласные; 9 — границы систем линеаментов, контролирующих секущие кварцево-рудные пояса. а — при выявлении структурно-контролирующих факторов (на примере рутного оруднения альпийского горно-складчатого пояса Юга СССР)

1 — разрывные нарушения; 2 — линеаменты; 3—6 — линеаментные зоны; 3 — северо-западные, 4 — северо-восточные, 5 — субмеридиональные, 6 — субширотные; 7 — рутные районы (по В. П. Федорчуку и др.). I — Карпатский, II — Крымский, III — Западно-Кавказский, IV — Краснодарский, V — Сването-Осетинский, VI — Дагестанский, VII — Севано-Карабахский

деляющие специализацию оруденения, и *рудоконцентрирующие* сквозные системы дислокации, способствующие его концентрации.

На многочисленных примерах установлено, что в пределах рудоконцентрирующих структур крупные месторождения располагаются дискретно, будучи приуроченными к узлам пересечения широтных и меридиональных сквозных систем нарушений между собой (рис. 73, а) и с менее глубинными диагональными разломами. Месторождения, приуроченные к узлам, характеризуются определенной спецификой: для них типичны большая длительность эндогенного процесса, полиформационность, большое разнообразие рудных элементов и их элементов-спутников.

Узлы пересечения сквозных систем нарушений хорошо дешифрируются по КС за счет того, что они сопровождаются системами кольцевых разломов, образующих сложные пересечения, которые ограничивают сегменты с наиболее интенсивным проявлением магматических и гидротермальных процессов.

Примером эффективного использования космической информации с целью выделения новых, как правило, секущих типов металлогенических поясов может служить применение КС при металлогеническом районировании Северо-Востока и Дальнего Востока СССР (рис. 73, б). Здесь по мелкомасштабным телевизионным КС выявлены трансрегиональные системы нарушений северо-западного и северо-восточного простираний, пересекающие различные по генезису и строению тектонические области, и контролирующие протяженные специализированные рудные пояса.

Характерно, что в результате мелкомасштабных исследований, охватывающих большие площади, геологи чаще всего приходят к выводу о большом рудоконтролирующем значении поперечных структур регионального значения.

На территории альпийского горно-складчатого пояса юга СССР сопоставление выделенных по КС линеаментов и их зон с ртутными проявлениями показало их закономерную приуроченность к определенным структурным ситуациям (рис. 73, в), что не только подтверждает представления о ведущей рудоконтролирующей роли структур, поперечных по отношению к продольным нарушениям, но и позволяет значительно их дополнить и уточнить.

Дополнением служит установление рудоконтролирующего значения не только поперечных, но и диагональных нарушений, образующих таким образом не двойное, а тройное пересечение структур — продольных, поперечных и диагональных.

Уточнением может считаться то обстоятельство, что именно в пересечении нарушений указанных простираний и располагаются известные ртутные проявления и месторождения. Отмеченные структурные особенности могут, в известной мере, считаться прогнозными критериями и использоваться при дальнейших региональных металлогенических исследованиях.

Большинство исследователей, придававших поперечным структурам важное структурное и металлогеническое значение, указывали на их глубинный характер. Так, например, Краснополянский узел

образован пересечением: Ставропольско-Сальской системы поперечных линейментов северо-восточного простирания, четко отражающихся в рисунке изогипс поверхности Мохоровичича, т. е. на глубинном срезе 40—45 км; Восточно-Черноморской зоны диагональных нарушений меридионального простирания, проникающих, судя по геологическим данным, до глубины 10—20 км, и субширотной Таманско-Апшеронской зоны продольных нарушений, не очень четко выраженной в глубинных срезах земной коры, но четко выраженной сложной системой продольных надвигов и взбросов, фиксирующихся в приповерхностной структуре с помощью геологической съемки.

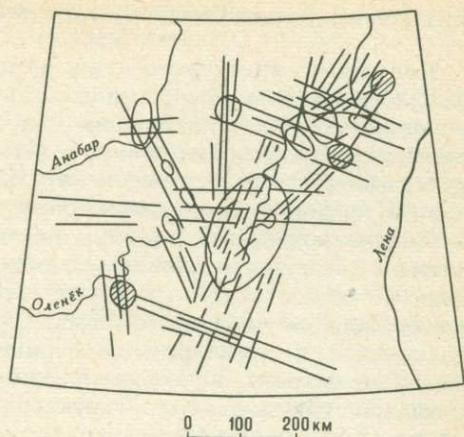


Рис. 74. Соотношение зон линейментов и узлов их пересечения с кимберлитовыми полями Якутской кимберлитовой провинции. Заштрихованы участки, перспективные для поиска новых полей. По Л. М. Натанову и др.

Таким образом, мы видим, что пересечение разноориентированных и разноглубинных (разноэтажных) линейментов создает в плане сложный узел пересечения, а по вертикали — ослабленную зону, по которой фильтруются глубинные (вплоть до мантийных) растворы, приводящие к образованию богатых ртутных месторождений указанных районов.

В аналогичной структурной ситуации, т. е. в линейментном узле, находятся Арчман-Нохурское ртутное проявление Копетдага, а также район Хайдарканского ртутно-сурьмяного месторождения (Южный Тянь-Шань), расположенного в узле пересечения трех крупнейших линейментных зон широтного, северо-восточного и северо-западного направлений, промышленные скопления серы Гаурдакского района, кимберлитовые месторождения Якутии (рис. 74) и многие другие.

Подобная строгая приуроченность рудных месторождений к районам аномально высокой раздробленности и проницаемости земной коры, образующимся в узлах пересечения линейментов и их систем, указывает на значительную перспективность применения КС в поисковых целях, в целом, и в определении рудоконтролирующих структур в частности, с дальнейшим оконтуриванием рудокализирующих участков.

Изложенный материал свидетельствует, что линейменты всех рангов и простираний играют определенную роль как в металлообразовании, так и в его контроле, являясь, по определению В. И. Смирнова, металлогеническими линейментами.

## 14.2. Изучение кольцевых рудоконтролирующих структур

Кольцевые структуры — один из основных объектов современных металлогенических исследований. До применения МДЗ советскими геологами было установлено, что многие кольцевые структуры, выявленные на современной поверхности Земли, совпадают со сводово-глыбовыми и очаговыми структурами, широко распространенными в тектонически активных континентальных областях.

Анализ кольцевых структур различных континентов Земли достаточно уверенно позволяет судить об их рудоконцентрирующей роли. С образованием этих структур генетически связаны многие месторождения черных, цветных, благородных и редких металлов. Для общей и предварительной оценки минерагенических особенностей кольцевых образований Земли и выявления перспективных площадей рекомендуется структурно-генетический анализ. Почти все генетические типы выделенных кольцевых структур имеют определенные минерагенические особенности. Однако достаточно уверенно распознать минерагеническое «лицо» того или иного структурного типа не всегда удается однозначно. Это связано с тем, что кольцевые структуры во многих случаях взаимно усложняют друг друга, развиваясь на протяжении всей геологической истории, в течение которой на месте одной структуры образуются более молодые того же или иного генезиса. Происходит своеобразная интерференция кольцевых структур. Так, например, нуклеары, представляющие собой древнейшие структуры больших диаметров и характеризующиеся определенной минерагенией, осложнены более молодыми кольцевыми образованиями меньших размеров со свойственной им минерализацией. Аналогичного рода интерференция, сгущение или наложение кольцевых структур различного генезиса — явление в природе достаточно распространенное и оно затрудняет проведение детального минерагенического анализа. Однако можно наметить некоторые связи между определенными генетическими типами кольцевых структур и характерными для них полезными ископаемыми. Такие благоприятные условия распределения повышенной минерализации полезных компонентов могут создаваться:

- 1) во внешних или периферических контурах кольцевых структур, особенно в условиях, если последние оконтурены кольцевыми разломами или представляют собою плутоны разных размеров;
- 2) за контурами кольцевых структур (но вблизи них), если они окаймляются складчатыми поясами;
- 3) в зонах пересечения или сопряжения кольцевых структур с разломами (или линеаментами) различных рангов и размеров;
- 4) в областях интерференции (или сгущения) кольцевых структур разного размера и различного генезиса;
- 5) в апикальных частях плутонов, отраженных на КС в виде кольцевых структур.

Во всех перечисленных случаях определяющим фактором является интенсивность проницаемости земной коры, обусловленная ее раздробленностью. В зависимости от положения зоны проницаемости

по отношению к кольцевой структуре, локализация полезных компонентов может проистекать как в периферических, так и в центральных частях структуры.

Дистанционные методы исследований позволили обнаружить структуры нового типа, имеющие важное значение в размещении оруденения. Для изучения металлогенических особенностей разномасштабных кольцевых структур необходимы КС различной степени обзорности, поэтому в начале работ целесообразно провести специальный подбор фотоматериалов. Масштабы КС подбираются таким образом, чтобы было видно положение изучаемой кольцевой структуры и района, в котором она расположена. Поскольку разрешающая способность КС при этом должна отвечать наименьшему геологическому объекту, подлежащему изучению, целесообразно применение мелко- и среднемасштабных КС. Кольцевые структуры обычно отражаются на КС всех масштабов. При частичной генерализации в пределах кольцевых структур диаметром 20—30 км выделяются более мелкие структуры — кальдеры, кольцевые и овальные контуры, экстрозивные купола, разломы, перспективные для поисков полиметаллов, меди, сурьмы и др.

Как показал опыт работы, выделение большого числа разномасштабных кольцевых образований на одном КС часто осложняет выявление региональных структур. Поэтому целесообразно проводить дешифрирование КС с разумными ограничениями размеров и типов выделяемых структур в соответствии с задачами исследований. Например, если последние включают изучение как региональных, так и локальных структур, то необходимо проводить последовательное дешифрирование. Кроме того, дешифрируя одномасштабные, но разносезонные КС, можно получить дополнительные сведения.

В первую очередь при дешифрировании кольцевых структур рекомендуется на КС выделять структуры эндогенного происхождения.

С этой целью составляется схема дешифрирования, позволяющая как бы реконструировать концентрический план прослеженных структур, часто осложненный внутренними линейными и дугowymi нарушениями, и проводится их структурно-геоморфологическое районирование. Полученные данные, в целях подтверждения эндогенного происхождения кольцевых структур, сопоставляются с геофизическими материалами, а для установления времени заложения структур проводится палеотектонический анализ. На последнем этапе исследования выявленные структуры должны быть подтверждены комплексом всех имеющихся данных — геологических, геохимических, геофизических, сейсмологических и др.

В тех случаях, когда длительное существование выделяемых кольцевых структур доказывается, их можно использовать при составлении структурной основы прогнозно-металлогенических карт.

Кольцевые структуры различных таксономических рангов имеют различное металлогеническое значение. Самые крупные из них — нуклеары — контролируют крупные минерагенические провинции — алмазоносные, золоторудные, полиметаллические и др. (см. рис. 59).

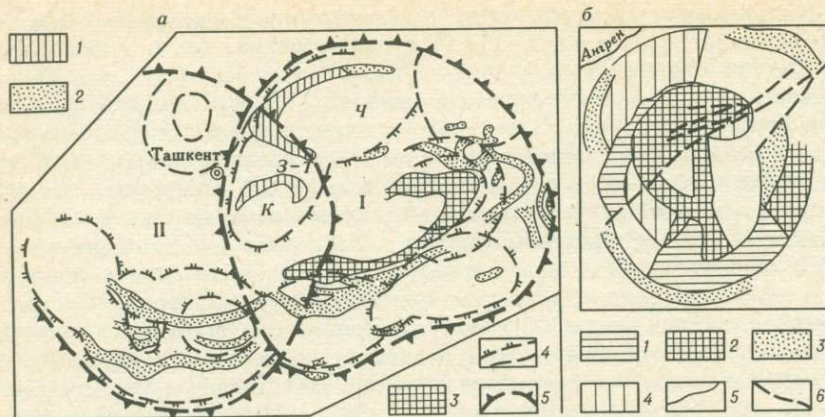


Рис. 75. Пример кольцевых рудоконтролирующих структур разного ранга. По Н. Т. Кочевой и И. Н. Томсону.

*a* — схема соотношений мегакольцевых структур с рудными (и нефтегазоносными) поясами Средней Азии. 1—3 — пояса: 1 — флюоритовые, 2 — сурьмяно-ртутные, 3 — нефтегазоносные; 4—5 — контуры: 4 — сводов (З-Т — Западно-Тянь-Шаньского, К — Кураминского, Ч — Чаткальского), 5 — мегасводов (I — Ферганского, II — Сырдарьинского).

*б* — схема металлогенического районирования Лашкерекской очаговой кольцевой структуры. Рудные зоны: 1 — свинцово-цинковая, 2 — медно-висмутовая, 3 — флюоритовая, 4 — кварцево-рудная; 5 — границы зон, 6 — основные разрывные нарушения

Кольцевые структуры регионального ранга — типа Ферганского или Сырдарьинского мегасводов (рис. 75, *a*) — контролируют металлогенические зоны (с сурьмяно-ртутной, флюоритовой и другой эпипетермальной минерализацией).

Кольцевые структуры подчиненных рангов, например Чаткало-Кураминский свод, определяют концентрическую металлогеническую зональность в распределении минерализации большинства цветных, благородных и редких металлов.

Локальные очаговые структуры типа Лашкерекской (рис. 75, *б*) в Средней Азии определяют положение локальных рудоносных площадей, соответствующих рудным районам, узлам и полям. Эти структуры не только контролируют продуктивное оруденение, но и оказывают влияние на зональность оруденения.

Без учета влияния на распределение оруденения выявленных по КС кольцевых структур проводить объективное металлогеническое районирование и в конечном итоге делать обоснованные прогнозные рекомендации нежелательно, так как они представляются весьма не полными.

#### МИНЕРАГЕНИЧЕСКОЕ ЗНАЧЕНИЕ НУКЛЕАРОВ

Минерагеническое значение этих кольцевых структур определяется следующими особенностями их строения: 1) высокой подвижностью и проницаемостью внешних частей; 2) наличием кольцевых структур-сателлитов, радиальных разломов и узлов тектонической интеграции на участках пересечения радиальных разломов в цент-

ральных частях нуклеаров, а также дуговых и радиальных линеаментов; 3) характерными чертами глубинного строения (увеличенной, по сравнению с интернуклеарными областями, мощностью земной коры и литосферы); 4) длительностью и унаследованностью развития нуклеаров от раннего докембрия до фанерозоя и т. д.

К внешним частям многих нуклеаров приурочены зеленокаменные пояса раннего докембрия, в пределах которых локализованы крупнейшие месторождения железа, никеля, кобальта и др. Примером могут служить: Алдано-Становой нуклеар, во внешней части которого локализованы образования трогового комплекса Алданского щита с крупными месторождениями железистых кварцитов; Витимо-Олекминский нуклеар, во внешней части которого располагаются месторождения, генетически связанные с основными и ультраосновными породами (асбест, полиметаллические руды).

К поясам окаймления нуклеаров приурочены также раннепротерозойские орогенно-магматические комплексы пород, с которыми генетически связаны месторождения редких и цветных металлов. Например, районы развития рудоносной вулканоплутонической ассоциации Аkitканского пояса в пределах Ангарского нуклеара; отдельные узлы в пределах внешней части Алдано-Станового нуклеара с пространственно и генетически связанными месторождениями редких и полиметаллических руд, меди, никеля и т. д.

Во внешних частях нуклеаров располагаются крупные кольцевые структуры — сателлиты. Установлено, что по периферии сателлитов формируются месторождения железа, титана, никеля, апатита и флогопита. Для нуклеаров характерна длительность и унаследованность развития, в результате чего к ним часто пространственно приурочены проявления глубинных магматических комплексов, таких, как ультраосновные и щелочные породы, карбонатиты и кимберлиты. Это особенно хорошо выражено на Сибирской платформе, где установлена связь кимберлитовых полей и массивов щелочных и ультраосновных пород с узлами пересечения дуговых и радиальных линеаментов внешних частей нуклеаров. К этим же узлам пересечения обычно бываюи приурочены месторождения олова, вольфрама и других цветных металлов.

Во внешних частях нуклеаров могут локализоваться не только месторождения докембрийского возраста. Здесь известны более молодые интрузии щелочных и ультраосновных пород и кимберлитов, несущих соответствующее оруденение. Примером может служить Хета-Оленекский нуклеар, в пределах которого размещены многочисленные поля кимберлитов и ультраосновных щелочных пород.

Отмечена следующая закономерность связи нуклеаров и кимберлитовых полей:

кимберлитовые поля локализируются только в пределах нуклеаров — участков земной коры, характеризующихся наибольшей мощностью и глубиной астеносферного слоя;

кимберлитовые поля располагаются во внешних, наиболее подвижных частях нуклеаров либо в их центре. В первом случае устнавливается приуроченность проявлений кимберлитового магма-

тизма к дуговым, часто граничным разломам нуклеаров, и особенно в местах их пересечения с радиальными разломами. Во втором — кимберлитовые поля локализованы в местах взаимного пересечения радиальных разломов.

### МИНЕРАГЕНИЧЕСКОЕ ЗНАЧЕНИЕ МЕТАМОРФОГЕННЫХ КОЛЬЦЕВЫХ СТРУКТУР

К ним относятся гнейсовые складчатые овалы и гранитогнейсовые купола. Обычно оба типа кольцевых образований пространственно и генетически связаны с развитием нуклеаров. Однако они достаточно обособлены и характеризуются определенными геологическими чертами и морфологическими признаками и выпукло проявляются на щитах древних платформ. Например, на Африканском кратоне они отчетливо дешифрируются на аэрокосмических снимках Мозамбикского блока, где выделяются кольцевые структуры диаметром 100—160 км: Ньяса, Кабу-Делгаду, Монацо, Мокуба, Альто-Лигония (Замбези). Наиболее изученный купол Альто-Лигония совпадает со знаменитым пегматитоносным районом. В ядерной части этого купола локализованы редкометалльные пегматиты, к периферии приурочены зоны мусковитовых и редкоземельных тел.

В пределах Северной Америки локализованы крупные месторождения золота и серебра, молибдена, свинца и цинка, вольфрама, сурьмы, ртути, а также барита, бора, кобальта, мелкие месторождения железа и крупнейшее редкоземельное месторождение Маунтин-Пас; все они связаны с кольцевыми структурами метаморфогенного типа.

Гнейсовый складчатый овал Брокен-Хилл в Австралии — крупнейшее свинцово-цинковое месторождение мира. Оно приурочено к гнейсам нижнепротерозойского возраста.

Анализ кольцевых магнитных аномалий показал, что часть из них адекватна метаморфогенным кольцевым структурам.

Имеющиеся материалы свидетельствуют о том, что комплексирование космических и наземных исследований в значительной мере повышает перспективы поисков скрытых метаморфогенных кольцевых структур — важнейших объектов в минерагеническом отношении.

### МИНЕРАГЕНИЧЕСКОЕ ЗНАЧЕНИЕ МАГМАТОГЕННЫХ КОЛЬЦЕВЫХ СТРУКТУР

Магматогенные структуры образуют два типа объектов: плутонические и вулканические (вулканоплутонические). Оба этих генетических типа имеют важное минерагеническое значение, так как с ними связаны многие виды важнейших полезных ископаемых — урана, бериллия, алюминия, циркония, золота, серебра, редких и других металлов.

Кольцевые массивы гранитов достаточно подробно изучены на Африканской платформе. Здесь кольцевые интрузии плато Джос

(Нигерия) могут быть приняты за эталоны гранитных месторождений тантала, ниобия, олова, бериллия. В Аппалачах с кольцевыми интрузиями связаны медно-цинковые, полиметаллические (вольфрам, висмут, молибден) и другие месторождения. Особенно интересными в минерагеническом отношении являются зоны пересечения plutонических кольцевых структур с линеаменами. Так, например, в Центральной Неваде расположено 14 рудников, где ведется добыча золота, серебра, меди, цинка и свинца, скопления которых приурочены к зонам пересечения линеаментов и plutонических кольцевых структур.

Кольцевые массивы нефелиновых сиенитов также являются важными в минерагеническом отношении. Высокие концентрации апатита не исчерпывают их возможностей потенциальных и реальных источников алюминиевого сырья, редких и рассеянных элементов. Примерами этого являются риолитовые руды Ловозерского массива (СССР), чкаловитовые руды Илимауссака (Гренландия), сынныритовые породы Сынныра (СССР). В отдельных случаях запасы апатит-нефелиновых руд измеряются миллиардами тонн.

Кольцевые массивы щелочного ультраосновного состава (карбонатиты) известны на всех континентах, но особенно многочисленны в СССР, Канаде, Бразилии, Индии и в ряде стран Африки (Ангола, Заир, Танзания, Кения, Малави, ЮАР, Мозамбик). Хорошо изученный Ковдорский карбонатитовый массив (СССР) содержит магнетит, бадделеит, апатит, флогопит, вермикулит, кальцит, диопсид. Массив Сокли (Финляндия) отличается повышенной ураноносностью.

На Индийской платформе В. М. Моралевым описаны карбонатитовые массивы докембрийского и палеогенового возраста. Минерогения древних карбонатитов Индии традиционна (apatит, редкие земли, ниобий, стронций, уран), молодые карбонатиты содержат промышленные скопления флюорита.

Большой интерес вызывают минерагенические особенности plutонических кольцевых структур основного состава. Среди них наиболее замечательными природными объектами являются кольцевые интрузивные комплексы Бушвельд в ЮАР и Садбери в Канаде. С Бушвельдским комплексом связаны концентрации меди, никеля, ванадия, кобальта, железа, титана, хрома, платины, золота, олова, молибдена, флюорита. Не имеет аналогов кольцевая структура Никелевого массива Садбери. Этот овальный массив (60 × 27 км) норит-диоритовых пород, осложненный интрузиями гранитов и диабазовых даек, содержит месторождения комплексных руд.

Приведенные данные по минерогении plutонических кольцевых структур наглядно свидетельствуют об их огромной практической значимости. Подавляющее большинство из них являются рудоносными. В этой связи вновь отдешифрованные на космических снимках или выявленные другими способами кольцевые структуры этого типа должны рассматриваться в качестве перспективных и нуждаются в тщательном исследовании. Кольцевые структуры plutонического происхождения занимают ведущее положение в минерогении всех континентов.

Вулканические и вулканоплутонические кольцевые структуры также имеют важное значение для минерагенического анализа. С ними, например, связаны многие медно-порфировые руды Андийского складчатого пояса и Карибского региона. Здесь медно-порфировые месторождения ассоциируют с поясами известково-щелочных магматических пород, для которых доказывается глубинное подкоровое происхождение. Во многих случаях месторождения приурочены к субвулканическим кольцевым телам кварцевых монцититов, дацитовых порфириров, кварцевых диоритов и, видимо, генетически с ними связаны.

В Северных и Южных Кордильерах в зонах пересечения линейamentов с кольцевыми структурами вулканоплутонического происхождения формируются многочисленные месторождения меди. К этим же зонам часто приурочены месторождения серебра.

Анализ связи магматогенных кольцевых структур и металлических полезных ископаемых показывает, что большая группа цветных, редких и благородных металлов приурочена к магматогенным кольцевым структурам и в этой связи они представляют большой практический интерес. Дальнейшего пристального изучения требуют структуры, металлогения которых пока не изучена.

#### МИНЕРАГЕНИЧЕСКОЕ ЗНАЧЕНИЕ ТЕКТОНОГЕННЫХ КОЛЬЦЕВЫХ СТРУКТУР

Значение тектоногенных кольцевых структур определяется главным образом их положением в чехлах платформ различного возраста. Как правило, с ними не связаны месторождения металлических полезных ископаемых. Однако это не означает, что кольцевые структуры данного генезиса не должны анализироваться с точки зрения их практического использования. С ними связаны или, точнее, к ним приурочены основные месторождения угля, нефти и газа, известные в различных районах земного шара. Они могут служить объектом для поисков россыпных месторождений некоторых металлов. Эти структуры также могут быть использованы как поисковый критерий, так как отражают собой скрытые объекты, могущие играть значительную практическую роль.

Кольцевые структуры играют большую роль при оценке перспектив крупных геологических регионов на нефть, уголь, черные, цветные, благородные металлы и редкие элементы. Выяснилось при этом, что минерагенические особенности кольцевых структур различного генезиса различны. Для поисков новых месторождений нефти, газа и угля важны кольцевые структуры тектонического происхождения. Наиболее благоприятными среди них для поисков металлического сырья являются структуры магматогенные и метаморфогенные, образование которых в какой-то степени связано с формированием нуклеаров — крупнейших и древнейших кольцевых структур Земли. В этой связи детальное изучение последних может обусловить значительное расширение минерагенических перспектив

континентов. Дальнейшие работы должны быть направлены на обнаружение новых нуклеаров и на уточнение их строения.

Очевидно, что границы нуклеаров являются наиболее проницаемыми зонами, по которым на протяжении всей геологической истории происходит перераспределение энергии и вещества планетных недр. При металлогенической оценке кольцевых структур различных генетических классов следует помнить, что наименее перспективны структуры тектонического происхождения, проявленные в чехле древних и молодых платформ. Однако их металлогеническая роль пока остается не до конца выясненной. Данные образования, отражающие собой на поверхности структуры фундамента, могут иметь важное значение как косвенный поисковый признак. Еще более пристального внимания требует дальнейшее изучение астроблем. Структуры невыясненного генезиса также нуждаются в последующих исследованиях для расшифровки их происхождения. В целом же все кольцевые структуры Земли, независимо от их ранга и генезиса, играют существенную роль при металлогеническом анализе.

### 14.3. Изучение структуры рудных полей и месторождений

В исследовании структур рудных полей и месторождений применение КС помогает решить следующие задачи:

1) уточнить геологическую позицию рудных полей и месторождений и выявить локальные структурные формы земной коры, вмещающие эти поля и месторождения;

2) исследовать главные рудоконтролирующие структурные элементы рудных полей и месторождений;

3) изучить глубинную структуру рудных полей и районов и прогнозировать поведение рудоконтролирующих структурных элементов на глубину.

Возможности решения этих важнейших задач структурного изучения рудных полей и месторождений обусловлены основными свойствами разномасштабных КС — эффектом генерализации и единовременным обзором площадей рудных провинций, областей и районов в целом.

### 14.4. Применение космических снимков при прямых поисках полезных ископаемых

Непосредственное (прямое) изучение рудоносных пород или геохимических аномалий, индицирующих месторождения полезных ископаемых, основано на измерении с ИСЗ спектрметрических яркостных характеристик горных пород и минералов в различных зонах спектра\*.

С помощью этого метода получены интересные результаты и в нашей стране, и за рубежом: многозональные сканерные снимки использованы для выявления рудоносных зон гидротермально измененных железенных пород в восточной Гренландии и полупус-

\* Так называемого КСЯ — коэффициента спектральной яркости.

тынным районе Невады в США; для поисков и картирования боксито- и никеленосных латеритов Индонезии, Австралии и Ямайки; для оконтуривания таких трудно открываемых объектов, как кимберлитовые трубки, проведенного на севере штата Колорадо и на юго-востоке штата Вайоминг (США); для поисков и прогнозирования гидротермального оруденения в Коунрадском рудном районе (СССР) и т. д.

На основе изучения спектральных характеристик горных пород в настоящее время проводится разработка спектральных образов рудоносных площадей, с тем чтобы в будущем создать банк данных по спектральным характеристикам рудоносных формаций.

Спектральные образы рудных полей и месторождений определяются литологическими особенностями вмещающих пород, минеральной формой нахождения в них рудных компонентов (главным образом для экзогенных и магматических месторождений), ассоциациями околорудных измененных пород (для гидротермальных месторождений), формой и интенсивностью деформированности пород и т. д.

Наиболее новым, только наметившимся направлением развития методов ДЗ для поисков полезных ископаемых является измерение спектрометрических яркостных характеристик растительности и установление корреляции между характеристиками и геохимическими особенностями состава субстрата, т. е. почв и горных пород. По имеющимся данным, листья деревьев, произрастающих на почвах с повышенным содержанием меди, свинца и цинка, имеют более высокие КСЯ, по сравнению с листьями деревьев, растущих на площадях отсутствия рудной минерализации. При этом установлено, что эти отличия наиболее заметны поздним летом и ранней осенью перед опаданием листьев.

Данные об основных элементах структуры рудных полей и месторождений позволяют выявить типовые — геометрические и спектральные — образы локальных рудоносных площадей, характерных для того или иного рудного района. Исследования показали, что только сбалансированное сочетание спектрометрических данных (яркость, показатель цвета и степень поляризации) с всесторонним анализом геометрии природных тел (форма, внутренняя структура и структурный рисунок) обеспечит наиболее полное изучение геологических образований, в том числе и рудоносных, с помощью КС.

С точки зрения металлогенических исследований этот комплексный вид космической информации наиболее ценен для прямого прогнозирования и поиска рудных объектов. Однако получение такой информации наиболее сложно, так как требует качественных многозональных снимков и специальной аппаратуры для их обработки.

### *Вопросы для самопроверки*

1. Очертите основной круг задач, решаемых при металлогенических исследованиях с помощью КС.

2. Раскройте содержание понятий: а) структура сквозного типа; б) рудоконтролирующие структуры; в) рудоконцентрирующие. По каким признакам структуры (а—в) диагностируются на КС?

3. Какие задачи при изучении структуры рудных полей и месторождений помогают решить КС?

## Глава 15

# ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МДЗ ПРИ ПРОГНОЗЕ И ПОИСКАХ НЕРУДНЫХ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ

## МЕСТОРОЖДЕНИЯ КАМЕННОГО УГЛЯ

Благодаря применению разномасштабных КС, появилась возможность поиска и изучения региональных глубинных разломов, скрытых мощной толщей угленосных отложений, локальных линеаментов и кольцевых структур, влиявших на условия накопления угленосных толщ. Системы линеаментов отвечают разломам, контролировавшим зоны с разной скоростью опускания ложа торфяника или осложняющим условия залегания угольных пластов. *Кольцевые структуры*, впервые выделенные в Донецком и Печорском бассейнах, достигают размера от 8—10 до 70—100 км: мелкие структуры соответствуют изометричным поднятиям как в каменноугольных, так и в мезокайнозойских отложениях; крупные, например, Гуковская, — гравитационным, магнитным, тепловым и другим аномалиям. Большое значение в структуре угленосных бассейнов имеют *узлы пересечения* линеаментов, к которым приурочены участки наиболее сложного строения угленосных отложений и некоторые, например Гуковская, кольцевые структуры, с которыми, в свою очередь, связаны изменения мощности геологических тел, расщепления угольных пластов, разрывные нарушения и прочие аномалии в составе и строении угленосных толщ.

## ИЗУЧЕНИЕ ГИДРОГЕОЛОГИЧЕСКИХ И ГЕОТЕРМАЛЬНЫХ РЕСУРСОВ

Результаты дешифрирования КС применяются при гидрогеологическом районировании территории и составлении гидрогеологических карт. Использование разномасштабных космических снимков обусловило возможность выявления и оконтуривания артезианских бассейнов, картирования по ландшафтно-индикационным признакам участков развития различных водоносных горизонтов, определения областей питания и разгрузки пластовых вод и т. д. Структурно-геологическая интерпретация результатов дешифрирования КС предоставила возможность поиска и выявления зон повышенной трещиноватости. Поскольку последние приурочены к региональным разломам, контролирующим движение подземных вод, то таким образом появились предпосылки для прогнозирования элементов динамики подземных вод, выделения основных гидродинамических

областей грунтовых вод и вод верхних водоносных горизонтов. Решение вопросов развития и эксплуатации геотермальных ресурсов тесно связано с изучением структурного плана территорий, в отношении которого результаты обработки МДЗ дают наиболее полную и достоверную информацию.

## МЕСТОРОЖДЕНИЯ ФЛОГОПИТА, АПАТИТА, КАЛИЙНЫХ СОЛЕЙ И СТРОИТЕЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ

В настоящее время имеются данные об эффективном использовании различных КС при горногеологической оценке месторождений флогопита и апатита, при изучении месторождений калийных солей и прогнозе строительных материалов и др.

Так, в результате анализа мелкомасштабных КС «Метеор-25» на территории Алданского щита установлена приуроченность месторождений флогопита к острым, а проявлений апатита к тупым углам ромбической сетки линеаментов.

Применение разномасштабных КС в комплексе с геофизическими, гидрогеологическими и другими данными позволило впервые выделить и протрассировать кроме продольных (субширотных) и поперечные (северо-восточные) зоны разрывных нарушений, ограничивающих в пределах Старобинского месторождения калийных солей в Припятском прогибе (Белорусская ССР) блоки разной новейшей активности, что позволило внести коррективы в геолого-разведочные работы разных стадий вплоть до эксплуатационной разведки.

Как известно, из нерудных полезных ископаемых с осадочным чехлом связаны различные виды известняков, доломиты, стекольные и формовочные пески, различные глины, гипсы и т. д.

Преобладающая доля строительных материалов: суглинков, песков, гравийных смесей и др.,— связана с четвертичными отложениями ледникового или аллювиального происхождения. Изучение геологической информативности КС территории Калужско-Тульского района и сопоставление полученных данных с геолого-геофизическими материалами показало, что результаты дешифрирования могут быть использованы при прогнозе и поиске указанных видов полезных ископаемых путем выявления и картирования структурных и геоморфологических признаков геологических комплексов, с которыми связаны полезные ископаемые.

### *Вопросы для самопроверки*

1. При изучении каких нерудных полезных ископаемых широко используются МДЗ?

Новая отрасль знаний — космическая геология открывает широкие горизонты в области изучения закономерностей формирования земной коры и исследования Земли как части Вселенной. Это научное геологическое направление отличается высокой эффективностью, экономичностью, большим социальным и экологическим значением.

Комплексные аэрокосмические и традиционные наземные исследования с применением ЭВМ позволили установить глобальные и региональные закономерности геологических явлений, обнаружить процессы, не доступные для наблюдения другими методами, а также оперативно получать материалы дистанционного зондирования различного масштаба с разной периодичностью на больших территориях.

Информация, содержащаяся на космических снимках, носит междотраслевой характер. Использование КС позволяет изучать природные системы в их естественных границах, в различных природных и сезонных условиях.

Возможность изучения небесных тел Солнечной системы с помощью АМС позволяет осуществить сравнительный геологический анализ, способствующий расшифровке истории развития Земли на ранних стадиях.

*Эффективность* космической геологии — в выявлении структур, трудно обнаруживаемых наземными методами и ранее неизвестных; в уточнении размеров и конфигурации уже установленных структур; в выявлении связей между структурами различной природы, что, в конечном итоге, открывает новые перспективы для минералогического анализа.

*Социально-экономический эффект* космической геологии заключается в экономии трудовых ресурсов при проведении дорогостоящих полевых работ за счет увеличения объема камеральной обработки данных, поддающихся автоматизации.

*Экологический эффект* создается за счет сокращения объемов буровых и горно-разведочных работ, наносящих ощутимый урон окружающей среде.

Космические исследования Земли, в том числе и в области космической геологии создают все возможности для объединения специалистов различных стран для того, чтобы еще лучше познать нашу планету и более рачительно и бережно распоряжаться ее ресурсами.

Наиболее перспективным направлением по использованию материалов дистанционного зондирования является их комплексирование с данными наземных исследований. В этой связи сейчас ведутся работы по развертыванию уникальной научно-технической программы «Геос». Информация о природных ресурсах нашей страны будет

поступать из четырех источников — со спутников, самолетов-аэросъемщиков, от наземных станций и датчиков, установленных в сверхглубоких скважинах — и обрабатываться в едином автоматизированном центре. Такие комплексные исследования дадут полное представление о пока не открытых залежах полезных ископаемых и геологических процессах, протекающих в недрах Земли.

## РЕКОМЕНДУЕМАЯ ЛИТЕРАТУРА

---

1. *Анализ космических снимков при тектоно-магматических и металлогенических исследованиях*/Под ред. И. Н. Томсона. М., Наука, 1979.
2. *Баррет Э., Куртис Л. Введение в космическое землеведение*. М., Прогресс, 1979.
3. *Буш В. А. Проблема кольцевых структур Земли*. М., изд. ВИНТИ, 1986, 116 с. (Итоги науки и техники, серия «Общая геология»).
4. *Виноградов Б. В. Космические методы изучения природной среды*. М., Мысль, 1976.
5. *Дистанционное зондирование: количественный подход*. М., Мир, 1983.
6. *Использование материалов космических съемок при региональных геологических исследованиях (методические рекомендации)*/Под ред. Н. В. Межеловского. М., 1986.
7. *Кац Я. Г., Полетаев А. И., Румянцева Э. Ф. Основы линейментной тектоники*. М., Недра, 1986.
8. *Кинг Э. Космическая геология. Введение*. М., Мир, 1979.
9. *Кольцевые структуры континентов Земли*/В. А. Брюханов, В. А. Буш, М. З. Глуховский, А. Т. Зверев, Я. Г. Кац, Н. В. Макарова, Е. Д. Сулиди-Кондратьев. М., Недра, 1987.
10. *Космическая информация в геологии*/Под ред. В. Г. Трифонова, В. И. Макарова, Ю. Г. Сафонова, П. В. Флоренского. М., Наука, 1983.
11. *Космогеология СССР*/Под ред. В. Н. Брюханова, Н. В. Межеловского. М., Недра, 1987.
12. *Кравцова В. И., Козлова Е. К., Фивенский Ю. И. Космические снимки (методическое руководство)*. М., Изд. МГУ, 1985.
13. *Моралев В. М., Чешихина К. Г. Дистанционные методы изучения геологии и полезных ископаемых*. М., изд. ВИНТИ, 1987 (Итоги науки и техники, серия «Геологические и геохимические методы поисков полезных ископаемых», т. 9)
14. *Садов А. В., Бурлешин М. И., Викторов А. С. Аэрокосмические методы поисков подземных вод*. М., Недра, 1985.
15. *Шарков В. В., Гурьева З. И., Кильдюшевский Е. И. Аэрокосмические методы геологического изучения шельфа*. Л., Недра, 1985.

# ПРЕДМЕТНЫЙ УКАЗАТЕЛЬ

## А

- Альbedo 23
- Анализ линеаментный 112, 110, 207
  - машинный (автоматизированный) 107
  - морфоструктурный 211
  - системный 108
  - спектральный 26
  - статистический 42
- Аномалия влажности 202
  - геоботаническая 206
  - геохимическая 209, 221
  - гравитационная 54, 108, 204, 223
  - изображения 141
  - магнитная 25, 54, 143, 218, 223
  - ландшафтная 204
  - нефтегазовая 207
  - оптической плотности 35
  - температурная 24, 191, 205, 206, 223
- Апвеллинг 193
- Апогей 7, 12
- Астролема 145, 146, 153, 221
- Аэрофильм 38

## Б

- База знаний 39, 43, 48
- Банк данных 25
  - образов 52

## В

- Видикон 17
- Визуализация 36
- Выборка обучающая 42, 58, 198

## Г

- Генерализация 37, 59, 161, 215, 221
- Геокон 155
- Гидроиндикация 189
- Гнездо — см. кластер
- Голограмма 20
- Гравилинеаменты 122
- Графопостроитель 32

## Д

- Делимость 102, 116, 119, 121, 122, 131, 132, 135
- Дешифрирование автоматическое (машинное, инструментальное) 31, 34, 37, 41, 57, 58
  - аналоговое 198, 199
  - аэрокосмическое 20, 23
  - визуально-инструментальное 37
  - визуальное 31, 37, 41—43, 57, 58, 106, 108

- геологическое 25, 32, 37, 39, 43, 46, 56, 57, 66, 71, 192
- геоморфологическое 50, 197, 204
- индикационное 57, 198, 199
- интерактивное 37, 58
- кольцевых структур 141
- комплексное 23
- ландшафтно-индикационное 57, 138
- стереоскопическое 184
- Дискретность 113
- Дисперсия шума 37
- Дисплей 32, 107

## З

- Запись аналоговая 31
  - цифровая (числовая) 31
- Зона линеаментная 114, 117, 122, 123, 126, 129—131, 133, 135, 175, 176, 179, 197, 200, 211

## И

- Идентификация 39, 43—45, 53—55, 141, 142
- Излучение инфракрасное 23, 207
  - монохроматическое 26
  - радиационное 25
  - солнечное 23
  - электромагнитное 41
- Изображение исходное 35, 36
  - квантованное 32
  - промежуточное 35
  - синтезированное 32, 34, 35
  - сканерное 77
  - стерео 37, 80
  - фоновое 35
  - фотографическое 32
  - цифровое 31
  - электронное 32
- Индикатор — см. признак дешифровочный
- Интерпретоскоп 37, 38
- Источник освещения 39

## К

- Камера автоматическая 15—17
  - многозональная 15, 17
  - ручная 15
  - сканирующая 18—20
  - телевизионная 16, 17
- Карта главного магнитного поля Земли 25
  - космогеологическая 76, 77
  - ландшафтно-индикационная 189
  - эпицентров 36

Картирование аэрофотогеологическое 76, 77  
— геолого-минералогическое 77  
— космогеологическое 76, 77  
Квантование 32, 34, 38, 191  
Классификация кольцевых структур 146, 161  
— линейментов 108, 112  
Кластер (гнездо) 42, 61  
Клин сенситометрический 16  
Кольцевая структура 27, 28, 50, 64, 68, 130  
— вулканическая 149—151, 156, 218, 220  
— вулканоплутоническая 148, 150, 218, 220  
— вулканотектоническая (овоид) 151  
— диапировая 152  
— замкнутая 137  
— импактная 140, 144, 148, 153, 159, 160  
— комбинированная 137  
— концентрическая 137, 142, 154  
— коровая 146, 149, 156  
— ксеногенная (космогенная) — см. импактная  
— купольная 218  
— магматогенная 143, 146, 149, 156—159, 160, 218, 230  
— макро 146, 151  
— мега 146, 164, 216  
— мезо 146  
— метаморфогенная 146, 148, 218, 220  
— микро 146  
— мини 146  
— моногенная 144, 146  
— овоидная — см. вулканотектоническая  
— орбитальная 137  
— отрицательная 157  
— очаговая 216  
— периплутоническая 150  
— плутоническая 148—150, 156, 218, 219  
— подкорковая 146, 149, 156  
— полигенная 146, 148  
— положительная 157  
— простая 137  
— радиально-концентрическая 196  
— региональная 100, 216  
— рудоконтролирующая 214, 216  
— сателлитная 149, 216, 217  
— сложная 137  
— соляно-купольная 140  
— сопряженная 137  
— субвулканическая 220  
— тектоногенная 140, 142, 146, 152, 153, 156, 157, 220  
— фрагментарная 137  
— экзоплутоническая 150  
— эндоплутоническая 150  
Комплекс высотный 39

Концентр 145, 151  
Контрастность 32, 33, 61, 71  
Коррекция 31  
Корреляция 115, 178  
Космолинемент 120  
Космофотосхема (карта) 16, 77  
Коэффициент корреляции 36  
— спектральной яркости 25, 221  
Кратер метеоритный (ударный, импактный) — см. астроблема  
Купол гранитогнейсовый 148, 218

## Л

Лазер 26, 39  
Линемент батиметрический (батилинемент) 120, 121  
— глобальный (планетарный) 109, 133, 169, 209  
— диагональный 127, 129, 131, 168, 185  
— достоверный 109  
— дуговой 154, 217  
— коровый (экзогенный) 109  
— локальный 109  
— мантийный (эндогенный) 109  
— металлогенический 212  
— непрерывный 109  
— ортогональный 129, 168, 185  
— поперечный 131, 185, 213  
— предполагаемый 109  
— прерывистый 109  
— продольный 120, 131  
— радиальный 154, 217  
— региональный 53, 54, 109, 117, 133, 201, 209  
— сейсмоконтролирующий 179  
— трансконтинентальный 109, 117  
— трансорогенный 129  
— трансрегиональный 133  
Линементогенез 105, 135  
Линементология 115  
— инженерная 185, 194  
Линементопара 118, 123, 130  
Линеаризация 36, 51  
Линеатура раstra 33  
Локус сцены 45  
Локсодромный характер нарушений 169  
Лорнет 37

## М

Магнитолинемент 122  
Магнитометр 25  
Мегабайт 58  
Метод инструментальный 107  
— интерактивный 108  
— ландшафтно-индикационный 141, 188  
— компьютерный 33, 35, 81  
— растровый 33  
— синтезирования (совмещения) 34  
— статистический 115  
— фильтрации 33, 36

— фотографический 35  
— эвритический 106  
Модель геологическая 34, 39, 47—49, 51, 52, 59, 74, 79  
— геодинамическая 114, 130  
— геометрическая 48  
— геоморфологическая 74  
— дедуктивная 57  
— ландшафтная 47—50, 52, 59  
— сцены 39, 43  
— тонально-геометрическая 52, 204  
Мониторинг 7, 179, 187, 188, 194

## Н

Наблюдения визуальные 10, 11, 14, 15, 187  
— космовизуальные 26, 181, 190  
Наклонение орбиты 12  
Нуклеар 148, 149, 154—156, 163, 214—218, 221

## О

Обзорность изображения 37, 60, 62, 75, 161, 215  
Облик изображения 50  
Обработка аналоговая 23  
— компьютерная 37  
— предварительная 31  
— фотографическая 31  
— числовая (цифровая) 23  
Образ объекта 44, 50, 222  
Овал гнейсовый 148, 149, 218  
Овоид — см. кольцевая структура вулкано-тектоническая  
Окно прозрачности 23, 24  
Оператор 58, 78  
Орбита гелиосинхронная 12  
— геосинхронная (геостационарная) 12  
— круговая 8, 13  
— наклонная 12  
— околоземная 6, 10  
— опорная 6  
— полярная (квазиполярная) 12  
— экваториальная 12  
— эллиптическая 12, 13  
Ось оптическая 8, 15  
Отклик 42, 61

## П

Перигей 7, 12  
Пиксел 18, 19, 33, 60, 107  
Плотность оптическая 32, 33, 35  
Поле аномальное 35, 106  
Поле гравитационное 81, 122, 125, 149  
— зрения 38, 60  
— инфракрасное (тепловое) 54  
— линейментное (ЛП) 90, 112, 117, 119—122, 127, 130—132  
— магнитное 25, 122, 125, 144, 149

— фоновое 35  
Полоса обзора 18, 19  
— растровая 17  
Пользователь 39, 41  
Пояс линейментный 112, 131  
Прибор рисовальный 38  
Признаки дешифрировочные 49—53, 203  
— дедуктивные 51, 52, 53  
— индикационные 139  
— индуктивные 51, 52  
— косвенные 49, 50, 52, 129, 191, 193, 204  
— ландшафтно-индикационные 138, 223  
— прямые 49—51, 62, 129, 209  
— специальные 51  
— структурно-геоморфологические 73  
— тонально-геометрические 49  
— фототональные 73  
Пространство откликов 42  
Профиль кругосветный 25

## Р

Радар 22, 23, 79  
Радиал-пантограф 38  
Радиоканал 17  
Радиолокатор 20, 39  
Радиометр сканирующий 19  
Размер отпечатка 50, 51  
Разрешение (разрешающая способность) 8, 15—19, 23, 26, 27, 28, 35, 51, 215  
Ракета баллистическая 5, 9  
— межконтинентальная 5  
— носитель 5, 6  
— транспортная 5, 7  
Растр 33  
Репрезентация (сведение) 45  
Рисунок концентрический 87, 138  
— линейментный 113, 117—120, 122, 124, 128, 131—133, 135, 162, 185  
— «метелок» 176  
— полосчатый 49, 88, 124, 176

## С

Сегментация 32, 33, 38  
Сигнал аналоговый 31  
— зашумленный 37  
— полезный 32, 36  
— радио 20  
— световой 18  
— электрический 18  
— электромагнитный 17, 39  
Система линейментов 27, 112, 118, 121, 122, 133, 185, 202, 223  
— распознающая 41—42  
Скан 18  
Сканер 18, 26, 30, 206  
Сканирование 18  
Снимок аэрокосмический 141, 218  
— аэрофото 21, 27, 37, 62, 179, 190, 198  
— высотный 79  
— глобальный 26—28, 37

- детальный 31, 64, 65, 78
- зональный (см. многозональный) 16, 25
- инфракрасный (тепловой) 108
- континентальный 28, 64, 74, 166
- локальный 30, 31, 63—65, 78, 166
- многозональный 17, 188, 206, 221, 222
- панорамный 9
- панхроматический 81
- перспективный 15, 90, 101
- плановый 15, 101
- радарный (радиолокационный) 20—23, 35, 79, 81, 141, 198
- региональный 23—28, 63, 65, 66, 166
- сканерный 20, 22, 35, 51, 81, 117, 206, 221
- спектральный (спектрозональный) 35, 203
- синтезированный 191
- телевизионный 117, 212
- трансформированный 16
- фотографический 20, 21, 35, 77, 79, 81
- цветной 10, 81, 191
- черно-белый 10, 32, 73, 80—81, 103, 203
- Спектр 221
  - инфракрасный 15, 23
  - электромагнитный 15
- Спектральная характеристика 60, 61
- Спектральный канал 61
- Спектрометр сканирующий 19
- Спектрометрия 207, 209
- Стереомодель 38, 51, 79
- Стереоскоп зеркально-линзовый 37, 38
- Стереоскоп зеркальный 37, 38
  - линзовый 37
- Стереометр геологический 37, 38
- Стереочки 37
- Стереопара 17, 37, 38
- Стереозэффект 37, 51
- Съемка бокового обзора 20
  - газовая 207
  - геохимическая 26, 191
  - голографическая 20, 191
  - групповая 76, 77
  - инфракрасная (тепловая) 14, 23—25, 27, 178, 190, 191, 205, 206
  - космическая 15, 16, 18, 20
  - лазерная 14, 26, 191
  - лидарная 26; 178
  - люминесцентная 191
  - магнитная 14, 25
  - микроволновая 25
  - многозональная 178
  - полистная 76, 77
  - радиолокационная (радарная) 9, 10, 14, 20, 21, 27, 28, 178, 190, 191
  - сканерная 18, 27, 190, 191
  - спектрометрическая 9, 14, 25
  - телевизионная 14, 16, 17, 27, 28, 190, 191

- фотографическая 14—16, 27, 28, 191
- ультрафиолетовая 191
- фототелевизионная 17
- Схема дешифрирования 45, 55, 143, 144, 191, 194, 203, 215
- предварительная 77
- ландшафтно-индикационная 183
- линейментов 36, 107
- Сцена 39, 41, 43, 47, 53, 54, 57—59

## Т

- Текстура изображения 21, 50, 51
- Тектоника линейментная 105, 116, 121, 122, 126, 127, 132, 133, 135, 136
- Тень 50, 79
- Тепловизор 24
- Термограмма 206
- Тон 21, 50, 51
- Транзитность линейментов 120
- Трансформатор 16
- Трансформирование 41
- Тренд-анализ 108, 139
- Трасса полета 12

## У

- Угол локации 35, 81
- обзора 8
- сканирования 18, 26
- Узел линейментный 135, 158, 185, 289, 213, 223
- Упорядоченность пространственная 41, 87
  - системная 54, 55
  - спектральная 41
- Уровень генерализации 26, 31, 59, 60, 133
  - глобальный 27, 28, 59, 182
  - детальный 27, 59, 60, 71, 77, 86, 96, 183
  - континентальный 27—29, 59, 60, 63, 64, 68, 163, 166, 169
  - локальный 27, 59, 60, 68, 71, 77, 86, 88, 94, 96, 156, 183
  - региональный 27, 59, 60, 65, 79, 88, 96, 98, 183

## Ф

- Флуктуация 33, 35
- Файл 45
- Фильтрация 36, 38, 108
  - оптическая 34
  - растровая 33
  - цифровая 32
- Форма 50
- Фотоаномалия 50, 141, 202—204
- Фотолаборатория 38
- Фотолинеймент 57
- Фотомозаика (фотосхема, фотокарта) 16, 37—38
- Фототон 32, 49, 50, 65, 71, 73, 74, 138, 170, 182—184, 189, 203

## Ш

Шаг линеаментный 118

Шок-метаморфизм 146

Шум 36, 37

## Э

Эквидистантность (ритмичность) 112,  
133

Элемент изображения 35, 59, 102

Эффект просвечивания 29

## Я

Яркость излучения 222

— изображения 25

— интегральная 41

— спектральная 41, 221

— сцены 42

# ОГЛАВЛЕНИЕ

ПРЕДИСЛОВИЕ . . . . .	3
<b>Часть I. ТЕХНИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ ИЗ КОСМОСА . . . . .</b>	<b>5</b>
Глава 1. ТРАНСПОРТНЫЕ СРЕДСТВА ДОСТАВКИ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ КОМПЛЕКСОВ НА ОРБИТЫ. <i>Я.Г. Кац</i> . . . . .	5
Глава 2. ОСНОВНЫЕ ТИПЫ КОСМИЧЕСКИХ НОСИТЕЛЕЙ И РАБОЧИХ ОРБИТ. <i>Я.Г. Кац</i> . . . . .	7
2.1. Искусственные спутники Земли . . . . .	7
2.2. Автоматические межпланетные станции . . . . .	9
2.3. Пилотируемые космические корабли . . . . .	10
2.4. Долговременные орбитальные станции . . . . .	11
2.5. Типы космических орбит . . . . .	12
Глава 3. ТЕХНИКА НАБЛЮДЕНИЙ И ИЗМЕРЕНИЙ ИЗ КОСМОСА <i>Я.Г. Кац</i> . . . . .	14
3.1. Визуальные наблюдения . . . . .	14
3.2. Космическая фотографическая съемка . . . . .	15
3.3. Телевизионная космическая съемка . . . . .	16
3.4. Фототелевизионная съемка . . . . .	17
3.5. Сканерная космическая съемка . . . . .	18
3.6. Голографическая космическая съемка . . . . .	20
3.7. Радиолокационная (радарная) съемка . . . . .	20
3.8. Инфракрасная съемка . . . . .	23
3.9. Спектрометрическая съемка . . . . .	25
3.10. Магнитная съемка . . . . .	25
3.11. Лазерная съемка . . . . .	26
Глава 4. ВИДЫ МАТЕРИАЛОВ КОСМИЧЕСКИХ СЪЕМОК ПО УРОВНЯМ ГЕНЕРАЛИЗАЦИИ. <i>Я.Г. Кац</i> . . . . .	26
Глава 5. ПРЕДВАРИТЕЛЬНАЯ ОБРАБОТКА ИСХОДНЫХ ДАННЫХ И ПРЕОБРАЗОВАНИЕ ИЗОБРАЖЕНИЙ В ГЕОЛОГИЧЕСКИХ ЦЕЛЯХ. <i>А.В. Тевелев</i> . . . . .	31
5.1. Задачи предварительной обработки данных . . . . .	31
5.2. Преобразование изображений в целях геологического дешифрирования . . . . .	32
5.3. Важнейшие технические средства визуального геологического дешифрирования космических снимков. <i>Я.Г. Кац</i> . . . . .	37
<b>Часть II. ГЕОЛОГИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ КОСМИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ . . . . .</b>	<b>39</b>
Глава 6. ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ И МЕТОДЫ ГЕОЛОГИЧЕСКОГО ДЕШИФРИРОВАНИЯ. <i>А.В. Тевелев</i> . . . . .	39
6.1. Принципиальная схема дистанционного геологического зондирования . . . . .	39
6.2. Принципы автоматического геологического дешифрирования материалов дистанционного зондирования . . . . .	41
6.3. Принципиальная схема визуального дешифрирования . . . . .	42
6.4. Системы дешифровочных признаков . . . . .	49
6.5. Идентификация моделей космических изображений . . . . .	53

6.6. Виды и разновидности геологического дешифрирования космических снимков .....	56
6.7. Информативность космических снимков .....	58
<b>Глава 7. ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МАТЕРИАЛОВ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ В СТРУКТУРНО-ГЕОЛОГИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЯХ И ГЕОЛОГИЧЕСКОМ КАРТИРОВАНИИ. А.В. Тевелев .....</b>	<b>62</b>
7.1. Геологическая информативность космических снимков .....	62
7.2. Особенности применения материалов дистанционного зондирования при геологической съемке и картировании .....	76
<b>Глава 8. ПРИМЕНЕНИЕ КОСМИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ В СТРУКТУРНО-ГЕОМОРФОЛОГИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЯХ. А.В. Тевелев .....</b>	<b>79</b>
8.1. Задачи и цели структурно-геоморфологических исследований .....	80
8.2. Выбор источников информации .....	80
8.3. Формы и комплексы форм рельефа как результат развития структур земной коры .....	81
8.4. Дешифрирование и тектонический анализ рельефа локальных новейших структур .....	86
8.5. Анализ космических изображений при региональных и глобальных структурно-геоморфологических исследованиях .....	98
<b>Глава 9. ОСОБЕННОСТИ ИЗУЧЕНИЯ ЛИНЕЙНЫХ СТРУКТУР (ЛИНЕАМЕНТОВ) С ПОМОЩЬЮ МАТЕРИАЛОВ КОСМИЧЕСКОГО ЗОНДИРОВАНИЯ. А.И. Полегаев .....</b>	<b>103</b>
9.1. Возникновение и эволюция представлений о линейaments .....	103
9.2. Методы поиска, выявления и изучения линейaments .....	106
9.3. Морфология, строение и элементы классификации линейaments .....	108
9.4. Линейamentные сообщества: зоны, системы, поля, рисунки .....	112
9.5. Методы интерпретации линейaments и их систем .....	113
9.6. Линейamentная тектоника платформенных областей .....	116
9.7. Линейamentная тектоника складчатых поясов .....	123
9.8. Особенности линейamentной тектоники Земли .....	132
<b>Глава 10. ИССЛЕДОВАНИЕ КОЛЬЦЕВЫХ СТРУКТУР С ПОМОЩЬЮ МАТЕРИАЛОВ КОСМИЧЕСКОГО ЗОНДИРОВАНИЯ. Я.Г. Кац .....</b>	<b>136</b>
10.1. Общие сведения о кольцевых структурах .....	136
10.2. Методы выявления, изучения и идентификации кольцевых структур ..	141
10.3. Классификация кольцевых структур .....	146
10.4. Древнейшие кольцевые структуры Земли – нуклеары .....	154
10.5. Распространенность разных типов кольцевых структур .....	156
10.6. Некоторые проблемы взаимосвязи кольцевых структур и линейaments ..	157
10.7. Сравнительный анализ кольцевых структур Земли и других планет ...	159
<b>Глава 11. ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МАТЕРИАЛОВ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ В ТЕКТОНИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЯХ. А.И. Полегаев .....</b>	<b>161</b>
11.1. Применение космической информации в тектонических исследованиях Земли .....	161
11.2. Сравнительный тектонический анализ планет земной группы. Я.Г. Кац ..	171
<b>Глава 12. ПРИМЕНЕНИЕ КОСМИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ ПРИ ИССЛЕДОВАНИИ СОВРЕМЕННЫХ ГЕОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ. А.И. Полегаев .....</b>	<b>174</b>
12.1. Изучение землетрясений .....	174
12.2. Изучение вулканических явлений и структур .....	181
12.3. Инженерно-геологические и гидрогеологические исследования .....	182
12.4. Изучение шельфа .....	190

<b>Часть III. ПРИМЕНЕНИЕ КОСМИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ ПРИ ИССЛЕДОВАНИИ МИНЕРАЛЬНЫХ РЕСУРСОВ</b> . . . . .	195
<b>Глава 13. НЕФТЕГАЗОГЕОЛОГИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ. А.В. Тевелев</b> . . . . .	195
13.1. Уточнение геологического и тектонического строения бассейнов неф- тегазонакопления . . . . .	195
13.2. Анализ глубинного строения нефтегазоносных бассейнов . . . . .	196
13.3. Геодинамический анализ областей нефтегазонакопления . . . . .	199
13.4. Поиск потенциальных ловушек нефти и газа . . . . .	200
13.5. Прямые поиски залежей нефти и газа . . . . .	205
13.6. Нефтегазогеологическое районирование . . . . .	208
<b>Глава 14. ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МДЗ ПРИ ПРОГНОЗЕ И ПОИСКАХ РУДНЫХ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ. А.И. Полетаев, Я.Г. Кац</b> . . . . .	209
14.1. Изучение линейных рудоконтролирующих и рудоконцентрирующих структур . . . . .	209
14.2. Изучение кольцевых рудоконтролирующих структур . . . . .	214
14.3. Изучение структуры рудных полей и месторождений . . . . .	221
14.4. Применение космических снимков при прямых поисках полезных ис- копаемых . . . . .	221
<b>Глава 15. ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МДЗ ПРИ ПРОГНОЗЕ И ПОИСКАХ НЕРУД- НЫХ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ. А.И. Полетаев</b> . . . . .	223
<b>ЗАКЛЮЧЕНИЕ</b> . . . . .	225
<b>РЕКОМЕНДУЕМАЯ ЛИТЕРАТУРА</b> . . . . .	227
<b>ПРЕДМЕТНЫЙ УКАЗАТЕЛЬ</b> . . . . .	228

**Кац Я. Г., Тевелев А. В., Полетаев А. И.**  
К12 **Основы космической геологии: Учебное пособие.— М.:  
Недра, 1988.—235 с.: ил.  
ISBN 5—247—00319—5**

Изложены задачи и методы космической геологии. Рассмотрены особенности различных видов космофотосъемки: черно-белой, цветной, спектрзональной. Описаны носители съемочной и передающей аппаратур, техника съемки, способы передачи и первичной обработки дистанционных данных, приемы дешифрирования космических снимков. Показаны особенности изучения специфических космогеологических объектов (линеаментов, кольцевых структур), освещены современные проблемы сравнительной геологии планет Солнечной системы.

Для студентов геологоразведочных и геологических факультетов вузов и университетов.

К  $\frac{1904030000-400}{043(01)-88}$  59—88

ББК 26.3

УЧЕБНОЕ ИЗДАНИЕ

Кац Яков Гиршевич,  
Тевелев Аркадий Вениаминович,  
Полетаев Анатолий Иванович

## ОСНОВЫ КОСМИЧЕСКОЙ ГЕОЛОГИИ

Заведующий редакцией *В. А. Крыжановский*  
Редактор издательства *Л. А. Журавлева*  
Технический редактор *Е. Л. Финкельштейн*  
Корректор *К. И. Савенкова*

ИБ № 7500

---

Сдано в набор 20.04.88. Подписано в печать 06.10.88. Т-17198. Формат 60×90<sup>1</sup>/<sub>16</sub>. Бумага офсетная № 2. Гарнитура Тип Таймс. Печать офсетная. Усл. печ.л. 15,0. Усл. кр.-отт. 15,0. Уч.-изд. л. 17,29. Тираж 3700 экз. Заказ 1608/1619-2. Цена 90 коп.

---

Ордена «Знак Почета» издательство «Недра», 125047, Москва, пл. Белорусского вокзала, 3

Набрано в ордена Октябрьской Революции и ордена Трудового Красного Знамени МПО «Первая Образцовая типография» имени А. А. Жданова Союзполиграфпрома при Государственном комитете СССР по делам издательств, полиграфии и книжной торговли. 113054 Москва, Валовая, 28

Отпечатано в Московской типографии № 6 Союзполиграфпрома при Государственном комитете СССР по делам издательств, полиграфии и книжной торговли. 109088, Москва, Ж-88. Южнопортовая ул., 24.

ИЗДАТЕЛЬСТВО «НЕДРА»

выпускает в свет в 1989 году книгу  
В. Ф. Пенькова

**«УРАН И УГЛЕВОДОРОДЫ»**

Работа посвящена выяснению роли эпигенетических углеводородных веществ (битумов) в формировании уранового оруденения. Особое значение данные исследования приобретают в связи с тем, что битумные вещества встречаются в разнообразных геологических условиях. Они не только определяют характер восстановительной обстановки, необходимой для осаждения урана при эпигенетическом рудообразовании, но и выступают в роли парагенетических спутников урана, а также активно участвуют в разрушении ранее сформированных рудных скоплений.

Ассоциация оксидов урана с твердыми битумами типа керита (реже антраксолита) распространена в пегматитах, урансодержащих конгломератах, на метасоматических и жильных месторождениях урана в кристаллических породах, в пласто- и роллообразных рудных телах урана в осадочных породах. Твердые эпигенетические углеродистые вещества считают производными углеводородов нефтяного ряда, запolyмеризованными гуминовыми веществами (дериватами углей), продуктами синтеза из простых неорганических соединений. Допускается наложение углеводородов на скопления настурана (иногда с разрушением его и образованием коффинита), а также совместный перенос и отложение урана с органическими веществами. Распространено представление об образовании ураноносных битумов при наложении на нефтяные залежи экзогенного оруденения или гидротермальной рудной минерализации.

В работе приведены результаты минералогического исследования ураноносных и безрудных битумных веществ и сделана попытка определения основных черт их происхождения: уранобитумное рудообразование рассмотрено как своеобразный гидротермально-метасоматический процесс; показано отражение свойств эмульсионподобного рудообразующего флюида в строении макровыделений ураноносных битумов; описаны признаки полимерного строения твердых битумов и признаки генетической связи рудоносных битумов с углеводородными веществами нефтяного ряда.

Особенностью работы является использование принципов онтогении минералов при изучении твердых аморфных битумных веществ, а при изучении их природы и процессов образования — элементов физики полимеров и коллоидной химии.

*Книгу можно приобрести в местных магазинах, торгующих геологической литературой, или заказать через отдел «Книга — почтой» магазина № 17 по адресу:*

*199178 Ленинград, В. О., Средний проспект, 61.*

ИЗДАТЕЛЬСТВО «НЕДРА»

выпускает в свет в 1990 году книгу

Е. А. Козловского и М. А. Комарова

**«УПРАВЛЕНИЕ  
ГЕОЛОГОРАЗВЕДОЧНЫМ  
ПРОИЗВОДСТВОМ»**

Книга посвящена проблемам управления производством в условиях полного хозяйства и самофинансирования, заинтересовывающих коллективы в применении методов и средств повышения качества и снижении себестоимости продукции. Исходя из места и роли геологоразведочных работ в сфере материального производства и развития наук, изучающих различные стороны геологоразведочного процесса, обоснована необходимость углубления теоретических исследований по управлению геологоразведочным производством. Рассмотрены особенности геологоразведочного процесса как объекта управления, исследованы взаимосвязи категорий теории управления. Показаны взаимосвязи и основные направления реализации принципов управления в хозяйственном механизме геологоразведочного производства. Сформулированы принципы гибких производственных систем на геологоразведочных работах, приведены условия управляемости процессов и критерии оптимальности для решения геолого-методических и организационно-технических задач управления. Разработаны принципы формирования плановых норм затрат труда и даны примеры их реализации в сметном нормировании геологоразведочных работ.

Показано, что комплексное, взаимосвязанное управление геологоразведочным процессом и производством — основное направление совершенствования теории и практики управления. Значительное внимание уделено практическому применению принципов и методов управления на производственно-технологическом уровне. Разработан ряд экономико-математических моделей, алгоритмов их оптимизации для принятия управленческих решений на производственно-технологическом уровне. Приведены типичные производственные ситуации и практические примеры принятия оптимальных вариантов выполнения геологического задания, составления оперативных производственных планов, управления материально-техническим снабжением производственных объектов.

Рассмотрены тенденции развития математических методов и автоматизированных информационных систем в геологоразведочном производстве и даны рекомендации по разработке технических и программных средств управления разведочным бурением, а также по определению эффективности управления геологоразведочным производством.

Книга предназначена для специалистов геологоразведочных организаций, она может быть использована слушателями Института повышения квалификации Мингео СССР, студентами геологических специальностей вузов.

*Книгу можно заказать в местных магазинах, торгующих геологической литературой, или через отдел «Книга — почтой» магазина № 17 по адресу:*

*199178 Ленинград, В. О., Средний проспект, 61.*

## **ВНИМАНИЮ СПЕЦИАЛИСТОВ!**

*издательство «Недра»*

*выпустит в 1989 году новые книги*

---

**ГАВРИЛОВ В. П.** *Общая и историческая геология и геология СССР.*  
Учебник для вузов. 32 л. 1 р. 40 к.

Рассмотрены внутреннее строение Земли, геологическая деятельность главных факторов внешней (атмосферы, гидросферы, ледников) и внутренней (землетрясений, магматизма, метаморфизма) динамики Земли, формы залегания горных пород, тектонические движения и методы их изучения, основные типы структур тектоносферы и литосферы. При обзоре геотектонических гипотез основное внимание уделено концепции глобальной тектоники литосферных плит. Изложены основы палеонтологии, закономерности размещения полезных ископаемых, дана характеристика горных пород.

Для студентов вузов, обучающихся по специальности «Геофизические методы поисков и разведки месторождений полезных ископаемых».

План 1989 г., № 58.

**ПАВЛИНОВ В. Н.** *Структурная геология и геологическое картирование с основами геотектоники. Основы общей геотектоники и методы геологического картирования:* учебник для вузов. 25 л. 1 р. 20 к.

Охарактеризованы строение и образование тел Солнечной системы и эволюция нашей планеты, возраст формирования различных структурных элементов земной коры, с которыми связаны разнообразные полезные ископаемые. Дан анализ развития земной коры и глубоких сфер Земли с позиции тектоники литосферных плит и подкоровых конвекционных движений тектоносферы. Рассмотрены методы организации и проведения геологического картирования. Подчеркнута важность применения группового, глубинного и объемного методов картирования с применением современных комплексных съемок.

Для студентов геологических специальностей вузов, изучающих структурную геологию, геологическое картирование и основы общей геотектоники.

План 1989 г., № 57.

Интересующие Вас книги можно приобрести в местных магазинах, распространяющих научно-техническую литературу, и в магазинах — опорных пунктах издательства, адреса которых приведены в аннотированном плане выпуска. Для тех, кто живет далеко от крупных городов, работают отделы «Книга — почтой» центральных магазинов:

№ 115 — 117334, Москва, Ленинский пр., 40

№ 17 — 199178, Ленинград, В. О., Средний пр., 61.

**ИЗДАТЕЛЬСТВО «НЕДРА»**

5175

5175