А. АЛЛИСОН, Д. ПАЛМЕР

ГЕОЛОГИЯ

ГЕОЛОГИЯ

НАУКА О ВЕЧНО МЕНЯЮЩЕЙСЯ ЗЕМЛЕ

GEOLOGY

THE SCIENCE OF A CHANGING EARTH

seventh edition

IRA S. ALLISON
Professor Emeritus of Geology
Oregon State University, Corvallis

DONALD F. PALMER
Associate Professor of Geology
Kent State University

McGraw-Hill Book Company

New York · St. Louis · San Francisco · Auckland · Bogotá · Hamburg · Johannesburg · London · Madrid · Mexico · Montreál · New Delhi · Panama · Paris · São Paulo · Singapore · Sydney · Tokyo · Toronto

А. АЛЛИСОН
Д. ПАЛМЕР

4153

ГЕОЛОГИЯ

НАУКА О ВЕЧНО МЕНЯЮЩЕЙСЯ ЗЕМЛЕ

Перевод с английского

канд. геол.-мин. наук Б. А. Борисова,
канд. геол.-мин. наук З. В. Кабановой,
Н. И. Кутузовой

под редакцией

д-ра геол.-мин. наук Ю. Г. Леонова

МОСКВА «МИР» 1984

ББК 26.3
А50
УДК 551.1/4

Аллисон А., Палмер Д.

А50 Геология: Пер. с англ.– М.: Мир, 1984.– 568 с., ил.

Вышедшая в США уже седьмым изданием книга американских ученых Айры Аллисона и Дональда Палмера знакомит читателя с геологией как наукой, изучающей нашу планету. Рассматривается внутреннее строение Земли и процессы, происходящие в ее недрах, образование различных минералов и горных пород, их изменение, влияние поверхностных процессов на изменение лика Земли и т. д.

Книга будет полезна преподавателям и студентам по курсу «Общая геология» *и интересна для большого круга читателей, желающих познакомиться с историей* развития нашей планеты.

$\text{А}\frac{1904010000\text{–}382}{041(01)\text{–}83}$ 112–83, ч. 1

ББК 26.3
552

Редакция литературы по геологии

Copyright © 1980, 1974, 1960, 1955 by McGraw-Hill, Inc.
© Перевод на русский язык, «Мир», 1984

ПРЕДИСЛОВИЕ К РУССКОМУ ПЕРЕВОДУ

Предлагаемая вниманию советских читателей книга американских авторов Айры Аллисона и Дональда Палмера «Геология» выдержала в США несколько изданий. В ней удачно сочетаются элементы популярного обзора и серьезного научного труда. Книга вводит читателя в круг задач, методов и результатов исследования почти всех направлений геологической науки. Знакомство с ними идет не столько на занимательном, сколько на солидном научном уровне: доступно, с известными упрощениями, но без искажений по существу. Поэтому кроме выполнения популяризаторской функции, позволяющей рекомендовать ее старшим школьникам и другим любознательным читателям, книга может быть учебным пособием для студентов различных специальностей. Пригодится она и профессионалам-геологам – особенно тогда, когда им потребуется освежить в памяти разделы геологии, не относящиеся к их прямой компетенции.

Авторы убедительно показывают как разнообразие геологических дисциплин, так и тесную их связь со многими другими областями знания. Все разделы геологии, как бы сильно они ни различались методами и техническими приемами, объединяет общий объект исследования – твердая Земля и происходящие в ней процессы. Особенно широк диапазон тех взаимосвязанных и взаимодействующих процессов, под влиянием которых формируются верхние твердые оболочки земно-

го шара и его поверхность. Процессы, развивающиеся в твердом неорганическом веществе, сочетаются здесь не только с процессами, происходящими в атмосфере и гидросфере, но и с биологическими процессами, а в последние тысячелетия также с геологической деятельностью человека, темпы которой стремительно нарастают.

Крупные обобщения, направленные на создание моделей строения и развития Земли, в наше время требуют учета данных многих разделов геологии. Конечно, нельзя требовать, чтобы в одной книге были одинаково подробно освещены все достижения наук о Земле. Наша планета непрерывно меняется. Этот тезис, вынесенный в название книги, убедительно развивается в тексте. В этой связи важно отметить, что в комплексе геологических наук существует раздел, называемый *исторической геологией*, однако многие компоненты этого раздела остались за рамками книги. Между тем задачей исторической геологии как раз является изучение истории развития Земли и происходящих в ней преобразований. Почти совсем не описана эволюция органического мира планеты, изучение которой входит в задачи палеонтологии и биостратиграфии. Материалы этих разделов геологии еще больше усилили бы впечатление от грандиозной картины геологических преобразований.

Авторы книги справедливо отмечают, что меняется не только сама Земля, объект геологических исследований,– меняются и представления о нашей планете. Это относится и к геотектоническим теориям, т.е. моделям строения и истории развития Земли. Наиболее популярна в настоящее время модель тектоники плит, которой посвящены интересные страницы книги. Эта модель привлекает тем, что в ней увязываются между собой самые разные проявления тектонической и магматической активности земного шара. Было бы, однако, опрометчиво считать, что эта модель снимает все вопросы и является каким-то венцом творения в геологии. Авторы книги говорят в основном о преимуществах этой модели и почти не останавливаются на трудностях, с которыми она сталкивается. Урок критического отношения к предлагаемым решениям был бы, наверное, полезен даже на ранней стадии знакомства с геологией, как, впрочем, и с любой другой наукой.

Надо сказать, что принятый в книге стиль описания разных геологических проблем, расстановка акцентов. классификация геологических объектов и терминология типичны именно для американской геологической школы. В изложении советских авторов многое выглядело бы иначе. Таким образом, книга может оказаться полезной не только для знакомства с началами геологии, что, конечно, является ее главной задачей, но и для понимания специфики подхода к решению геологических задач в США.

Помещенный в конце книги словарь терминов поможет читателю разобраться в непривычных геологических названиях. Однако, пользуясь этим словарем, надо помнить о возможности неоднозначного понимания некоторых геологических терминов, особенно тех, которые относятся к понятиям далеко идущей интерпретации геологического материала и связаны с теми или иными обобщающими геологическими концепциями (например, таких терминов, как «геосинклиналь», «орогенез», «тектоген», понимание которых может сильно расходиться у разных авторов). В других книгах читатель может встретиться с иной трактовкой ряда терминов, поскольку наука непрерывно развивается и какие-то ее отрасли еще недостаточно устоялись. Будущим поколениям геологов предстоит решить еще очень много проблем!

Хочется надеяться, что данную книгу, написанную на достаточно высоком профессиональном уровне, с интересом прочтут как молодые читатели, делающие первые шаги на пути познания нашей планеты, так и опытные геологи, желающие обновить свои знания в какой-либо менее знакомой им отрасли геологической науки.

Ю. Леонов

ПРЕДИСЛОВИЕ

Настоящее, седьмое издание книги «Геология: наука о вечно меняющейся Земле» наследует серию, выпуск которой был начат в 1932 г. в Университете шт. Миннесота У. Г. Эммонсом, К. Р. Штауффером, Дж. А. Тилем и А. Ш. Аллисоном. С годами становилось очевидным, что непрерывно меняется не только Земля, которую мы изучаем, но что и сама геология – вечно меняющаяся наука. Как и все науки, геология выросла за счет накопления данных наблюдений и экспериментов и их теоретического синтеза. Геология развивалась благодаря усилиям очень многих ученых, чьими трудами заложены основы, на которых зиждется наше современное понимание динамики Земли. Кроме того, в последние годы геологическая наука пополнилась важными сведениями, полученными при изучении Луны и Марса; прочно вошла в геологию и обобщающая модель тектоники плит.

В соответствии с изменениями самой науки геологии с годами менялось и содержание нашей книги: то, что сохраняло свое значение, мы оставляли, но одновременно включали новые данные и идеи. В настоящем издании мы попытались охватить весь важнейший геологический материал, не вдаваясь в детали, мало интересные для читателей, лишь приступающих к изучению нашей науки. Приблизительно 80% всех глав подверглись пересмотру. Д. Ф. Палмер подготовил гл. 11, 14 и 21, отдельные части глав 4 и 20, исправил словарь терминов, а также со-

ставил контрольные вопросы, помещенные в конце каждой главы. Остальной текст написан А. Ш. Аллисоном. Оба автора пересмотрели и исправили затем всю книгу в целом.

Геология приобретает все возрастающее значение при решении вопросов, касающихся землепользования, охраны экологической и природной среды, сохранения почв, воды, энергетических и других ресурсов, защиты от стихийных бедствий, таких, как оползни, наводнения, вулканические извержения и землетрясения. Кроме того, геология способствует пониманию процессов, происходящих в недрах Земли, и характера образующихся при этом ландшафтов, позволяет составить некоторое представление о продолжительности геологического времени и природе эволюции нашей планеты.

Оба автора книги имели удовольствие изучать геологию в течение значительной части своей жизни. Мы желаем всем, кто берется за изучение этой науки, успешного ее освоения и такого же удовлетворения, какое получили мы.

Айра Ш. Аллисон
Дональд Ф. Палмер



1 ГЕОЛОГИЯ – НАУКА О ВЕЧНО МЕНЯЮЩЕЙСЯ ЗЕМЛЕ

Турист, пресытившийся красотами природы, молча стоит на смотровой площадке южной кромки Большого каньона реки Колорадо в северо-западной Аризоне. Перед ним разворачивается грандиозная панорама, и безразличное созерцание постепенно сменяется благоговейным трепетом. Наконец, он восклицает: «Что-то здесь произошло!» И это, конечно, так. За миллион или за два миллиона лет река Колорадо пропилила в твердых горных породах ущелье глубиной 1,6 км и шириной (от одной кромки до другой) 20–25 км (рис. 1.1). В результате река обнажила толстую пачку почти горизонтальных пластов, сложенных породами, которые накапливались слой за слоем сотни миллионов лет назад. Геологическая история, о которой рассказывают эти породы, большинству обычных туристов недоступна, так же как понимание и других проявлений эрозионных процессов. Трудно им понять и то, как возник сам каньон.

Геологу же, умеющему расшифровать язык слоистых горных пород, они повествуют об условиях, господствовавших в этом районе Аризоны в давние, давние времена. В частности, они говорят, что сотни миллионов лет назад здесь было дно древнего моря, и на нем накапливались карбонатные (известковые) илы. В большом числе обитали беспозвоночные животные. Затвердевшие глинистые илы, пронизанные множеством трещин, которые образовались под горя-

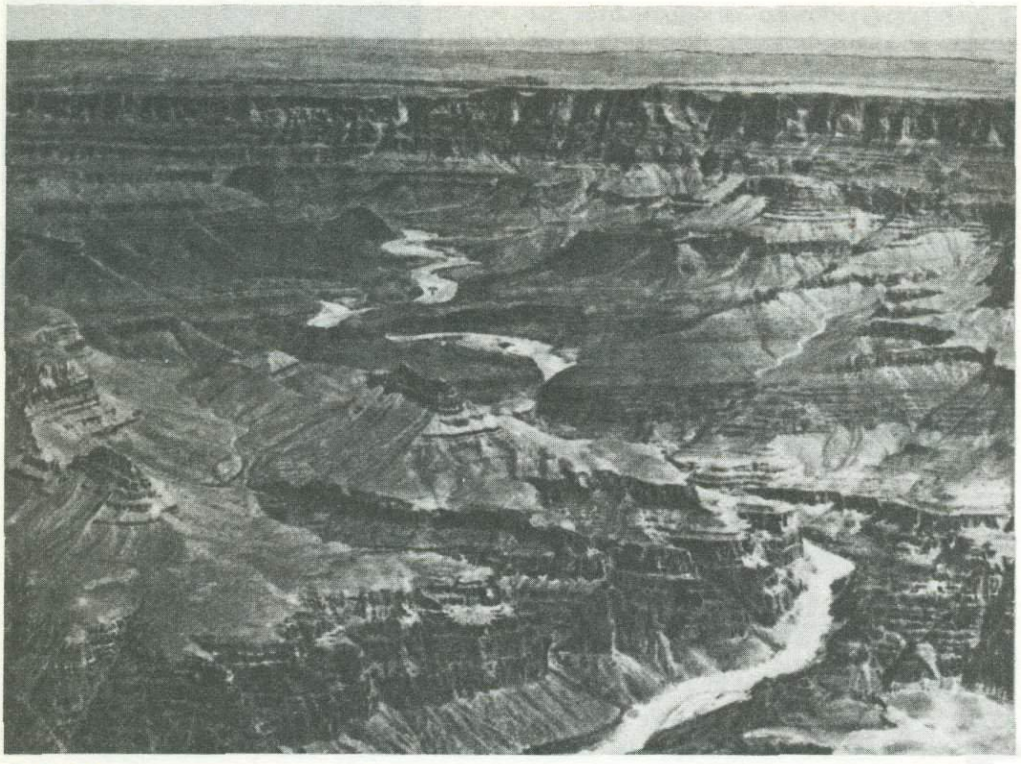


РИС. 1.1

Большой каньон реки Колорадо: вид на восток, по направлению к району Пейнтед-Дезерт. Этот гигантский каньон шириной приблизительно 20–25 км (от одной кромки до другой) и глубиной 1,6 км пропилен рекой и ее притоками. (Фотография компании «Спенс эйр фотос».)

чими лучами Солнца, указывают на то, что здесь существовали условия речной поймы. Карбонатные и глинистые илы, отлагавшиеся в далеком прошлом, давно уже отвердели и стали прочными горными породами, но в них по-прежнему сохраняются свидетельства их образования частично в морской обстановке, частично в условиях суши.

ГЕОЛОГИЯ И МЫ

Знание геологии способствует более глубокому пониманию всего того, что окружает человека. Оно помогает узнать красоты природы и позволяет преодолеть суеверный страх перед мощными, иногда ужасающими и разрушительными геологическими явлениями. Оно доказывает упорядоченность Вселенной и преходящий характер, казалось бы, вечных гор, вулканов, долин и озер.

Знание геологии делает более интересными наши путешествия. Впечатление от таких живописных мест, как Большой каньон, горы Блэк-Хилс, Аппалачи, Скалистые горы, Зайон-каньон, долина Йосе́мите или озеро Крейтер (рис. 1.2), обогащается пониманием их происхождения и геологической истории, и это усиливает наше восхищение.

Однако геология и геологические процессы могут оборачиваться к человеку и своей теневой стороной. В 1969 г. некоторые калифорнийцы были охвачены паникой, когда распространился слух, что



РИС. 1.2
Озеро Крейтер и остров Уизард: вид с высокого южного берега. Озеро и остров расположены в кальдере древнего вулкана – горы Мезама (гора Скотт) в южной части Каскадных гор (шт. Орегон). Озеро Крейтер имеет глубину около 600 м, ширину 10 км и занимает площадь 52 км^2. Его чаша образовалась около 7 тыс. лет назад, когда вулкан Мезама, высота которого превышала тогда 4000 м, выбросил из своих недр большое количество вспененной пемзы и затем обрушился в образовавшуюся полость. (Фотография Департамента шоссейных дорог шт. Орегон.)

в их штате должно произойти катастрофическое землетрясение, в результате чего он будет затоплен Тихим океаном. Землетрясение Сан-Фернандо (в 1971 г.) и предсказания будущих подземных толчков только усилили эти страхи. Жители Аризоны обеспокоены высокой стоимостью воды и ее нехваткой, а население Среднего Запада временами страдает от избытка воды. Сильное весеннее половодье на Миссисипи и ее притоках в иные годы превращается в настоящее бедствие, а иногда там же бывают засухи. Дома, дороги и пляжи, расположенные вдоль побережий Атлантического океана и Мексиканского залива, периодически подвергаются опустошительным набегам штормовых волн, рожденных тропическими ураганами. Сейсмические морские волны (цунами) вызывают разрушения на Тихоокеанском побережье США: на Гавайях, в Калифорнии, на Аляске. У берегов Исландии в 1963 г. внезапно появился новый вулканический остров Суртсэй; неожиданное извержение другого вулкана произошло вблизи Исландии в 1973 г. На острове Гавайи лавовые потоки то и дело угрожают населенным районам. Эти вулканические явления сильно влияют на жизнь обитателей подобных районов.

ПРИРОДНЫЕ РЕСУРСЫ И ОКРУЖАЮЩАЯ СРЕДА

Газеты и журналы постоянно сообщают о катастрофических событиях, жертвами которых стали жители тех или иных районов мира. Однако, к сожалению, мало рассказывается о более прозаических, повседневных геологических процессах. Рассмотрим, например, природные материалы, давно уже ставшие необходимыми для деятельности и благосостояния людей. Вначале грубые орудия труда и простые приспособления изготовлялись из камня, дерева и кости. Когда первобытные люди научились придавать камню нужную форму, начался каменный век. Затем, по мере того как открывались способы извлечения металлов из руд, человечество вступало последовательно в медный, бронзовый и железный века, а затем – в век стали, в атомный век. На каждом этапе получаемые из Земли материалы приобретали все более важное значение.

В настоящее время минеральные ресурсы по своему значению в жизнеобеспечении общества занимают второе место, уступая только сельскому хозяйству. Разработаны тысячи способов использования различных природных материалов,

в том числе для получения металлов, топлива, удобрений, строительных материалов, абразивов, наполнителей и химического сырья. Промышленность получает минеральное сырье, добываемое в шахтах, карьерах и из буровых скважин. По данным Бюро горных работ США, общая стоимость минеральной продукции Соединенных Штатов Америки составила в 1975 г. 62 млрд. долл. Около 77% общей суммы приходится на топливо: нефть, уголь и природный газ. На металлы приходится 8%, а на неметаллы, помимо горючих ископаемых,–15%.

С использованием этих ресурсов, необходимых для поддержания современного уровня жизни, связан и ряд затруднений. Городские власти обеспокоены тем, как удалять (недорого и не загрязняя местные реки, озера и грунтовые воды) нечистоты, пищевые отбросы и мусор. Что можно сделать с неприглядными и, как правило, вредными отходами подземных работ, с грязными котлованами, откуда добывался гравий, с отработанными карьерами? Ведь это те самые шахты и карьеры, посредством которых мы добываем используемые нами минеральные ресурсы. Кроме того, новые источники природных материалов и новые места захоронения отходов становятся все более дефицитными и дорогостоящими.

Люди начинают понимать свою зависимость от того, каким станет в конечном счете мир, а геология во многом определяет его облик. Десятилетиями неправильное использование сельскохозяйственных земель ускоряло эрозию и чрезвычайно быстро разрушало почвы, для формирования которых естественными геологическими процессами требовались тысячелетия. Наносимый ущерб теперь стал очевиден, и в настоящее время широко принимаются меры по сохранению почв. В результате добычи полезных ископаемых быстро удаляются конечные продукты геологических процессов, длившихся миллионы лет. Горные работы прекратить нельзя, но разработка более эффективных способов извлечения нужных материалов – вместо добычи только «высокосортных» руд или только наиболее доступной нефти – позволит получить больше минерального и топливного сырья.

Национальные интересы и мировая политика оказывают все возрастающее влияние на то, как будут использоваться эти ресурсы. Ни одна страна, а в особенности Соединенные Штаты Америки, не может обойтись только собственным минеральным сырьем. Кроме того, как в масштабе всей страны, так и на местном уровне необходимо решать, следует ли начинать промышленное освоение геологических ресурсов или лучше сохранить земли для отдыха людей и тем самым способствовать защите природной среды. Избиратели прямо или косвенно сталкиваются с этими геологическими проблемами, голосуя со знанием дела за ту или иную политику властей. От принимаемых решений зависит наше благосостояние, наш образ жизни, а в конечном счете, возможно, и само наше существование.

СОДЕРЖАНИЕ ГЕОЛОГИИ КАК НАУКИ

Геология как наука изучает всю нашу планету, но она детально занимается минералами, горными породами, ископаемыми органическими остатками и рудами – исследует, как они образовались, какие изменения претерпели, как можно восстановить по ним геологическую историю. Горные породы могут показаться инертными, неизменными, но каждый камень содержит в себе свидетельства своего происхождения и следы многих испытанных им изменений.

Закон актуализма. Геология как наука основана на представлении о непрерывном изменении окружающей среды и на предположении, что главные химические, физические и биологические процессы не зависят от времени. Геологи допускают, что силы и процессы, изменяющие Землю сегодня, действовали, в основном таким же образом, и в прошлом. Ветры, дожди, реки, морские волны, вулканы – все они в прошлом влияли на поверхность Земли точно так же, как это происходит сейчас.

На Земле меняется все. Гранит, традиционное олицетворение прочности, выветривается в конечном счете до состояния рыхлого песка и глины и размывается. Неприступные скалы Гибралтара тоже постепенно рассыплются в мелкую крошку.

Камни, разбросанные по пляжу или вдоль речного русла, подвергались в течение долгого времени медленному истиранию и стали округлыми; следовательно, окатанные крупные обломки, обнаруживаемые в слоях прочных пород, испытали такое же медленное истирание в соответствующей обстановке прошлого. В настоящее время большинство рифообразующих кораллов живет в теплых, светлых, неглубоких водах. Разумно поэтому сделать вывод, что, например, древние рифовые известняки Индианы также формировались в теплых, доступных солнечным лучам водах мелкого моря. Сходным образом симметричные знаки ряби, сохранившиеся на поверхности слоя песчаников, говорят о колебаниях воды над рыхлым песком, находившимся на небольшой глубине, поскольку точно такие же знаки ряби образуются на мелководье и сегодня. Круто наклоненные слои, образованные древними лавовыми потоками в районах верхнего Мичигана, говорят о том, что в этой области раньше проявлялась вулканическая деятельность, а затем земная поверхность испытала наклон. Современный ледниковый панцирь, покрывающий южную Гренландию, царапает подстилающие твердые породы, оставляя на их поверхности тонкие штрихи и глубокие борозды. Отступая, ледник оставляет на своем пути неровные или иной раз обточенные выступы поверхности, местами покрытые разнообразной смесью глыб, песка и более тонкого алевритового материала. Соответственно считается, то такие же штрихи, борозды и обломочные отложения, обнаруженные в Новой Англии, образованы ледниковым покровом во время древнего оледенения.

Элементом, необходимым для того, чтобы могли осуществиться геологические изменения, является время. Незначительные медленные постепенные изменения человек может не заметить – ни день за днем, ни в течение всей своей жизни. Однако геологические силы, действующие в течение тысяч, миллионов и даже нескольких миллиардов лет, способны производить гигантскую работу – скажем, пропилить Большой каньон или сровнять с землей высокие горы. Например, горный хребет, протягивавшийся раньше через верхний Мичиган, северный Висконсин и среднюю Миннесоту, под длительным действием эрозии превратился в равнину. Периодические выбросы лав и вулканических шлаков создают громадные вулканические конусы, такие, как вулкан Рейнир в шт. Вашингтон или гора Шаста в Калифорнии, и сразу же ветер, водные потоки и ледники принимаются за свою разрушительную работу. Примером может служить Шипрок («Скала-корабль») (шт. Нью-Мексико), в настоящее время представляющий собой небольшой останец как раз такого древнего вулкана (см. рис. 6.9). Чтобы понять то, о чем рассказывают камни, надо обладать точными и обширными знаниями как о процессах, происходящих ныне в земных недрах, так и о разрезах древних горных пород.

«СФЕРЫ» ЗЕМЛИ

Магнитосфера. Земля окружена магнитным полем, захватывающим обширное пространство. Это геомагнитное поле очень похоже на поле, создаваемое простым двухполюсным магнитом. Оно служит «передовой линией» Земли в защите от частиц высокой энергии, с большой скоростью летящих из космического пространства. Поле испытывает сильные вариации; слегка изменяется в масштабе дней или лет и его среднее значение, а в масштабе миллионов лет эти изменения оказываются очень большими.

Атмосфера. Это газовая оболочка Земли. От распределения тепла, давления и содержания водяного пара в этой оболочке зависят на Земле погода и климат.

Гидросфера. Гидросфера – водная обо-

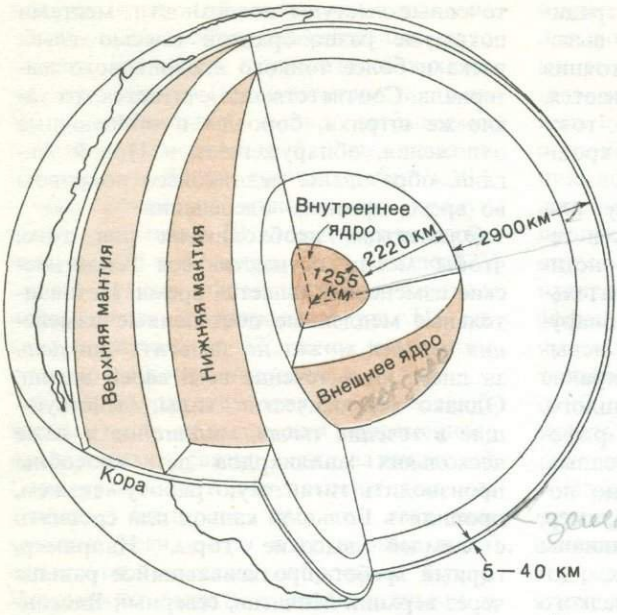


РИС. 1.3
Концентрические зоны Земли. Земная кора имеет толщину 5–40 км, мантия – 2900 км, внешнее ядро – 2220 км; радиус внутреннего ядра равен 1255 км.

лочка твердой Земли. Вода существует в различных формах. Гидрологический цикл (круговорот воды) начинается именно в гидросфере. Однако приводится этот цикл в действие атмосферными факторами. Специфические элементы гидросферы, такие, как волны и прибрежные течения, изменяют берега и пляжи.

Биосфера. Влияние этой оболочки, в которой протекает жизнь, на геологические процессы представить проще всего. Живые организмы, от мельчайших одноклеточных, составляющих океанический планктон, до крупных наземных млекопитающих или морских гигантов – китов, оказывают сильное воздействие на геологическое развитие Земли: от образования осадочных пород до их выветривания и эрозии.

Геосфера. Этим словом называют иногда твердую Землю – основной объект работы геолога (рис. 1.3). Геосферу составляют три главные части, различные по своим свойствам: 1) тонкая (5–40 км) внешняя оболочка, или земная кора; 2) внутренняя оболочка, или мантия; 3) ядро, которое делится в свою очередь на жидкое внешнее ядро и твердое внутреннее ядро. Именно в геосфере происходят наиболее заметные геологические изменения. Как мы увидим позже, процессы, протекающие в коре и верхней мантии, влияют на размещение и рельеф континентов и океанических бассейнов.

ПРОЦЕССЫ ИЗМЕНЕНИЯ

Разрушение и накопление горных пород. В результате разрушения горных пород под влиянием силы тяжести и деятельности воды, ветра и льда происходит снос и выравнивание возвышенностей и заполнение впадин на земной поверхности. В этом процессе, называемом градацией, различают две стороны: деструктивную (деградация) и конструктивную, созидательную (аградация). Чаще при описании этих преобразований используются термины *выветривание*, *эрозия* (размыв) и *отложение* (осадконакопление). Дождевая вода вызывает физическое размельчение или химическое разложение некоторых горных пород на месте их залегания, а бегущие по склонам водные потоки уносят частицы этих размельченных или разложившихся пород и откладывают их вдоль русел рек, в озерах,

во впадинах пустынь или в морях и океанах. Прибой, ударяющий в морской берег, размывает его и перемещает рыхлый материал на подводные склоны или в районы пляжей. Ветер переносит мелкие частицы горных пород как пыль во взвешенном состоянии или перекатывает песчаные зерна по поверхности, откладывая их в виде слоев тонкой пыли или в виде песчаных дюн. Движущиеся скопления льда – ледники – переносят обломки пород, нередко крупные глыбы; при таянии льда происходит отложение этого материала.

Изменения, производимые этими поверхностными геологическими агентами, обычно идут медленно, но почти непрерывно. За длительные промежутки времени результаты их действия оказываются очень значительными и охватывают большие площади.

Магматизм. Процессы, включающие движение расплавленного материала под поверхностью Земли, образование магматических горных пород, выброс лавы, шлака, пемзы и вулканического пепла на земную поверхность, называются магматической деятельностью, или магматизмом. Магматическая деятельность, происходящая на глубине, называется *интрузивной*, а на поверхности – *эффузивной*. Интрузивные изверженные породы становятся доступными наблюдению в результате эрозионного удаления чехла покрывающих пород.

Метаморфизм. Это процесс, в ходе которого под влиянием высоких температуры и давления или в результате действия химически активных флюидов значительно изменяются химический и минеральный составы, а также структура существовавших ранее пород. Хотя этот процесс несколько напоминает магматическую деятельность, он отличается от нее тем, что существовавшие прежде породы претерпевают изменения, находясь скорее в твердом, а не в расплавленном состоянии.

Тектонические движения. Породы внешней части Земли испытывают дифференцированные движения. Породы, образовавшиеся в морской обстановке, могли подняться на тысячи метров выше уровня моря, как, например, в Канадских Скалистых горах или на плато Колорадо. Другие области, такие, как дно Тихого океана к западу от острова Мидуэй, сильно опустились. Бывшие вулканические



РИС. 1.4
Аэрофотоснимок геологической структуры Литл-Дом – изогнутой вверх складки (*антиклинали*) в округе Фримонт, шт. Вайоминг. Эрозия создала характерный рельеф этой складки и обнажила ее ядро (сложенное юрскими породами), хорошо выраженное в современном рельефе. (Фотография Геологической службы США.)

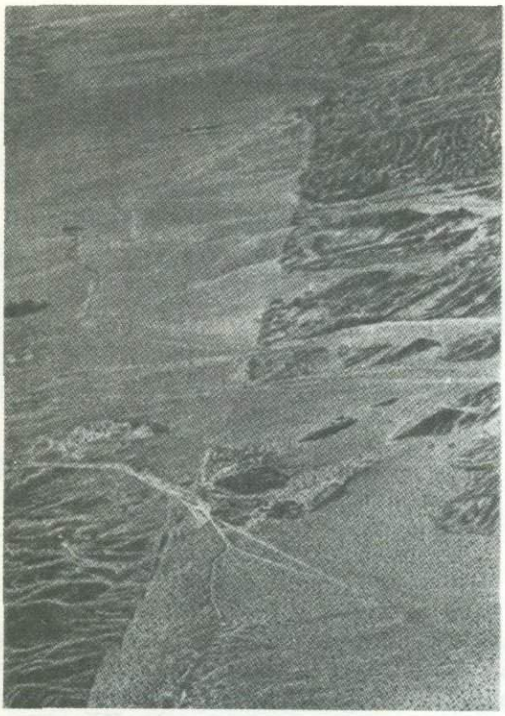


РИС. 1.5
Аэрофотоснимок одного из отрезков разлома Сан-Андреас в южной Калифорнии. Горные породы, залегающие справа, наклонены и смяты в складки. Они подверглись размыву, и их материал отложился в низменной области слева от разлома.
(Фотография компании «Спенс эйр фотос».)

острова, называемые гийотами, подвергшиеся волновой эрозии, располагаются в настоящее время на тысячи метров ниже уровня моря. Обширные континентальные области, такие, как побережье Мексиканского залива, были затоплены, а затем поднялись над уровнем моря. В других районах, например в Вайоминге или в Аппалачских горах, залегавшие прежде горизонтально слои горных пород ныне изогнуты в складки (рис. 1.4). В районе Великих равнин слои горных пород полого наклонены, а в районе Большого Бассейна (шт. Юта и Невада)

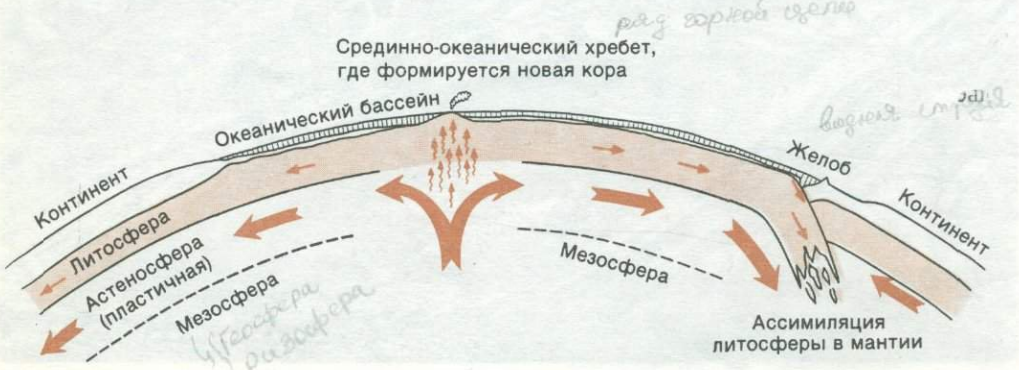


РИС. 1.6
Схематическое изображение сравнительно толстой континентальной коры, срединно-океанического хребта, где образуется более тонкая океаническая кора, подвижной твердой литосферы и пластичной астеносферы, которая располагается над мезосферой и представляет собой главный источник движения. (По Менарду, 1964.)

крупные блоки пород перемещены вертикально на тысячи метров вдоль крутых трещин (разрывов или разломов), называемых сбросами. В Калифорнии же крупные сегменты земной коры смещены на большие расстояния по горизонтали вдоль разрывных нарушений другого типа, из которых лучше всех известен разлом Сан-Андреас (рис. 1.5).

Тектоника плит. В 60–70-х годах было установлено, что внешняя оболочка твердой Земли, называемая *литосферой* (этот термин объединяет земную кору и верхнюю мантию), состоит из шести крупных и нескольких мелких плит. Крупные плиты несут на себе континенты обеих Америк, Евразию, Африку, Австралию, Антарктиду, а также бóльшую часть Тихого океана. Эти плиты, имеющие толщину 75–125 км, медленно перемещаются относительно друг друга. Вдоль узких зон на их краях возникают многочисленные землетрясения, чаще всего мелкофокусные.

Ниже литосферы располагается *астеносфера* («податливая сфера»), где сейсмические колебания замедляются и ослабевают главным образом потому, что поднимающееся из более глубоких зон Земли тепло вызывает плавление.

4153

Мы узнали также, что расплавленный материал поднимается с глубин 100 км или больше и затвердевает вблизи поверхности морского дна вдоль срединно-океанических хребтов, таких, как Срединно-Атлантический хребет, для которого характерны обилие разломов и горный рельеф. Образующиеся при этом изверженные породы раскалываются, и разные блоки движутся от хребта в противоположных направлениях со скоростью несколько сантиметров в год. Такой процесс называется разрастанием морского (океанического) дна или спредингом. Механизм этого процесса изучен пока недостаточно, но, по-видимому, он включает в себя какой-то вид конвекции больших объемов пластичного мантийного вещества (рис. 1.6). Подъем магматического вещества в срединно-океанических хребтах способствует непрерывному образованию новой коры в месте раздвижения океанического дна. Раскол, возникший вдоль Срединно-Атлантического хребта, послужил началом образования впадины Атлантического океана и обусловил отделение Северной и Южной Америки от Европы и Африки. Спрединг в стороны от хребта вызывал медленное расширение океана до его нынешних размеров (в широтном направлении).

Там, где эта система медленного подводного конвейера сталкивается с континентом, как это происходит, например, с плитой Наска (в восточной части Тихого океана), упирающейся в западное побережье Южной Америки, океаническая плита изгибается вниз и погружается в мантию Земли, образуя в морском дне глубоководный желоб в месте изгиба. Такое же изгибание плиты и образование глубоководных желобов, подобных Марианской впадине на западе Тихого океана, происходят и перед дугообразными цепочками вулканических островов Тихого океана (рис. 1.7). Холодная хрупкая опускающаяся литосферная пластина движется вниз по наклонной плоскости, называемой *зоной субдукции* (или *зоной Беньоффа*), достигая глубины 700 км и вызывая на своем пути глубокофокусные землетрясения, а затем окончательно поглощается мантией.

Какие бы глубоководные осадки ни накапливались на океанической плите при ее движении, все они обычно слишком легкие, чтобы погрузиться в мантию в зоне субдукции, и поэтому, подходя к континентальному массиву, они сминаются в складки, осложненные разрывами, и образуют горные сооружения, подобные Андам.

Все эти движения плит объединяются термином «тектоника плит». Дальнейшие детали и доказательства этой новой геологической теории рассматриваются в последующих главах.

Здесь же просто отметим, что представления о спрединге и тектонике плит явились настоящей революцией во многих областях геологии и дали этой науке новую жизнь. Появилась возможность разумного решения многих прежде загадочных проблем, хотя и остается ряд трудностей, которые предстоит еще преодолеть.

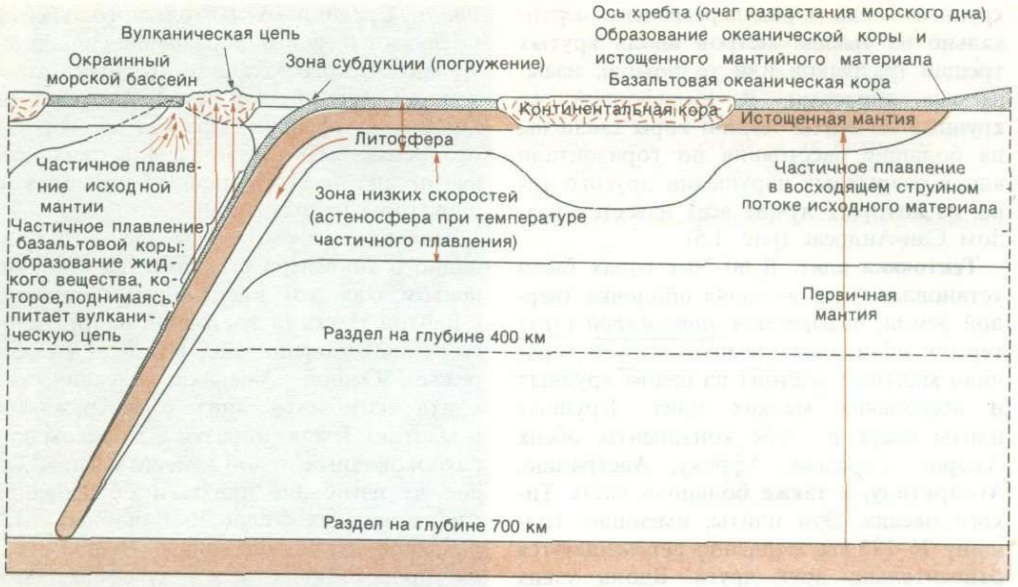


РИС. 1.7

Представление о слоистом строении земной коры и верхней мантии. Новая кора образуется вдоль оси хребта (в правой части схемы) и уничтожается при погружении в зоне субдукции (в левой части схемы). Частичное плавление приводит к созданию вулканической островной дуги. (По Дьюи: Dewey, 1972, Plate tectonics, Scientific American, vol. 226, N° 5, pp. 56–68. Copyright 1972 by Scientific American, Inc. All rights reserved.)

Все происходящие в недрах Земли движения – будь то поднятие, опускание, смятие пород в складки, наклон, образование разрывов, спрединг (тектоника плит) – это проявление *тектонических движений*, или *тектогенеза*. Региональные движения большого масштаба, такие, как общее поднятие без внутренней деформации, называются *эпейрогеническими*; движения, вызывающие формирование складок и разрывов и захватывающие обычно сравнительно узкие пояса, называются *орогеническими* или *горообразовательными*. Без многократных тектонических преобразований вся суша давно была бы эродирована практически до уровня моря.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ

Геология помимо практического, хозяйственного имеет и культурное значение. Она способствует пониманию того, что́ представляет собой Земля, и формирует правильное отношение к нашей планете. Она помогает открывать и осваивать разнообразные минеральные ресурсы и защищать окружающую среду от загрязнения.

Геология изучает минералы, горные породы, руды, окаменевшие органические остатки, а также их изменение во времени. При этом она исходит из предположения, что закономерности, управляющие происходящими ныне изменениями, действовали и в прошлом. Иначе говоря, геология основана на принципе актуализма.

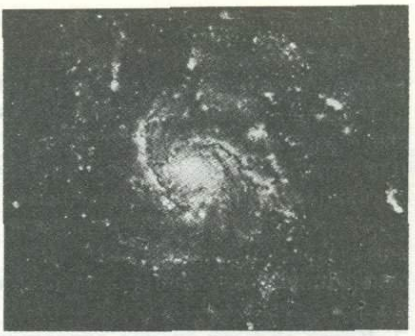
Этот принцип принят для атмосферы, гидросферы, геосферы (т. е. коры, мантии и ядра Земли) и биосферы.

Главные процессы, с которыми связаны

изменения,– это разрушение горных пород и отложение осадков, магматическая деятельность, метаморфизм и тектонические движения (включая процессы, описываемые тектоникой плит).

ВОПРОСЫ

1. Определите своими словами, что́ представляет собой геология.
2. Какие области знания относятся к геологии?
3. В чем отличие геологических исследований от изучения биологии или химии?
4. Что такое принцип актуализма и какова его роль в геологических исследованиях?
5. Перечислите пути, посредством которых процессы, происходящие в недрах Земли, влияют на жизнь и культуру человечества.



2 ЗЕМЛЯ В КОСМИЧЕСКОМ ПРОСТРАНСТВЕ

Геологи имеют дело прежде всего с твердой Землей, на которой мы живем, однако некоторые геологические явления связаны с другими космическими телами, существующими вместе с Землей в мировом пространстве. Следовательно, нам необходимо рассмотреть астрономическое положение нашей планеты, чтобы разобраться в том, как влияют на геологию процессы, происходящие во Вселенной.

Земля – одна из девяти планет, вращающихся вокруг Солнца. Солнце в свою очередь всего лишь одна из сотен миллиардов звезд, образующих Галактику Млечного Пути; поэтому представляется возможным, что любая из огромного множества этих других звезд также может иметь свои планеты. Понимание того, как связана Земля с другими объектами, находящимися в просторах Вселенной, помогает составить представление о скрытой от нас ранней истории нашей планеты. Эти ранние этапы обусловили возникновение обстановки, в которой развивалась более близкая к нам и более осязаемая геологическая история, охватывающая интервал времени, когда уже образовалась твердая земная поверхность.

ГАЛАКТИКА МЛЕЧНОГО ПУТИ

Спиральная Галактика Млечного Пути – одна из множества галактик разного размера и формы, существующих во Вселенной. Галактика – это гигантское скопление миллионов, миллиардов или триллионов звезд и связанной с ними диффузной материи (рис. 2.1). Судя по данным, полученным с помощью оптических и радиотелескопов, диаметр некоторых галактик измеряется сотнями световых лет[1]. Они удалены от нас на десятки миллиардов ($10 \cdot 10^9$) световых лет. Десять миллиардов световых лет соответствуют $96 \cdot 10^{21}$ км. Звезды и другая материя Млечного Пути удерживаются в своем положении благодаря взаимному гравитационному притяжению. Поскольку и Солнце, и Земля расположены внутри нашей Галактики и мы видим ее край из срединной области, Млечный Путь кажется нам не спиральным скоплением, а просто полосой звезд, пересекающей небо. То, что расплывчатая светлая дуга, идущая через ночное небо, состоит из миллионов звезд, было впервые показано Галилеем в 1610 г. Эти звезды слишком далеки, чтобы их можно было различить по отдельности без телескопа. Невооруженным глазом можно увидеть около 6000 звезд. Ближайшая из них (не считая Солнца) – Альфа Центавра, расположенная на расстоянии 4 св. лет.

Млечный Путь имеет форму диска или цевочного колеса. Диаметр его составляет около 100 тыс. св. лет, а толщина у центра диска – около 20 тыс. св. лет. На рис. 2.2 показана спиральная туманность в созвездии Андромеды; она меньше нашей Галактики, но похожа на нее по форме. Солнце располагается примерно в 3/5 расстояния от центра Галактики Млечного Пути до ее тонкого внешнего края в слое материи, лежащем вдоль экваториальной плоскости галактического диска, вблизи внутреннего края одной из спиральных ветвей. Центр Галактики скрыт от наблюдения межзвездной пылью, скопившейся у галактического экватора, но известно, что он располагается за созвездием Стрельца южного звездного неба. Его окружают примерно 120 видимых шаровых скоплений звезд, каждое из которых содержит от 10 тыс. до 1 млн. звезд. Все звезды Галактики обращаются вокруг галактического центра. Наше Солнце, сопровождаемое свитой планет и связанных с ними тел, совершает один оборот вокруг центра Галактики за 250 млн. лет, двигаясь со скоростью

[1] Астрономы обычно измеряют расстояние в световых годах. 1 св. год соответствует длине пути, который свет проходит за 1 год, что равняется приблизительно $9{,}6 \cdot 10^{12}$ км. Световой год – более удобная единица, чем километр, так как астрономические расстояния выражаются в световых годах меньшими числами. Если какое-то небесное тело удалено от нас на 1 млн. св. лет, то это значит, что событие, которое мы наблюдаем, произошло 1 млн. лет назад.

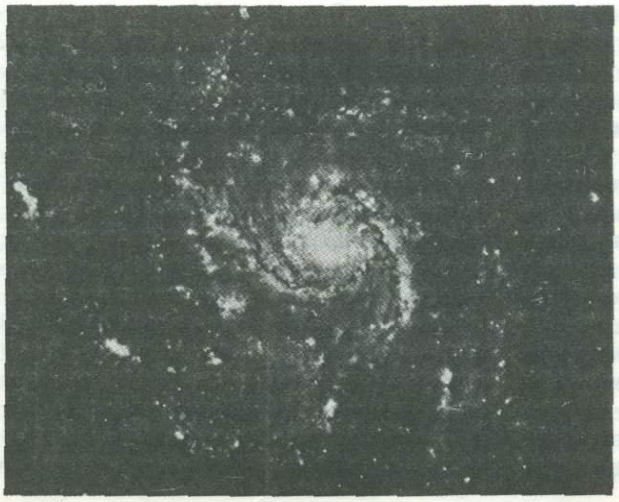


РИС. 2.1
Спиральная туманность в созвездии Большой Медведицы. Судя по ее виду, она вращается против часовой стрелки. (Фотография публикуется с любезного разрешения обсерватории Хейл.)



РИС. 2.2
Гигантская спираль в созвездии Андромеды – Мессье-31 со своими двумя эллиптическими «спутниками» – туманностями Мессье-32 (слева) и NGC 205 (внизу справа). (Фотография обсерваторий Маунт-Уилсон и Паломар.)

240 км/с. Долгое путешествие! Это круговое движение звезд и создает дискоидальную спиральную форму Галактики.

Ни одна из звезд, за исключением Солнца, не имеет доступных непосредственному наблюдению планет. Однако в движении звезды Барнарда, удаленной от нас на 13 св. лет, замечены ритмичные колебания. Эти покачивания указывают на то, что на движение звезды влияет какое-то темное невидимое тело – ее спутник; оба они вращаются вокруг общего центра тяжести.

СОЛНЕЧНАЯ СИСТЕМА

Масса Солнца составляет 99,8% общей массы Солнечной системы, а масса Юпитера – крупнейшей из планет – 0,1%. Поэтому Солнце представляет собой центр притяжения для всего множества вращающихся вокруг него планет, спутников, астероидов, метеоритов и комет, совместно образующих Солнечную систему. Все они держатся вместе благодаря силе гравитационного притяжения. Названия 9 планет хорошо известны, но кроме них вокруг Солнца движутся 33 спутника планет, не менее 50 тыс. мелких твердых астероидов, бесчисленное множество метеоров и несколько сотен комет. Диаметр Солнечной системы до орбиты Плутона достигает $5{,}9 \cdot 10^9$ км, и все-таки Солнечная система занимает в Галактике совершенно изолированное положение.

В движении Солнца, планет и спутников наблюдается замечательное сходство. Большинство компонентов этой системы движутся по орбитам, наклон которых отличается от наклона орбиты Земли (от плоскости эклиптики) не больше чем на несколько градусов, и всю Солнечную систему можно показать на одной двухмерной схеме, подобной рис. 2.3. Земля вращается вокруг своей оси с запада на восток, поэтому земному наблюдателю кажется, что с каждым часом звезды (а днем Солнце) смещаются к западу. Все девять планет движутся по своим орбитам с запада на восток почти в одной и той же плоскости, а Солнце медленно вращается вокруг своей оси в том же направлении – с запада на восток. Все планеты, кроме Венеры и Урана, вращаются вокруг своей оси в том же направлении, в котором они вращаются вокруг Солнца. Венера вращается в противоположном (обратном) направлении, а ось вращения Урана располагается почти в плоскости его орбиты. Помимо этого 27 из 33 спутников обращаются по орбитам в том же направлении, в каком их планеты вращаются вокруг своих осей.

Вероятность того, что такое сходство в характере движения возникло случайно, чрезвычайно мала. Поэтому астрономы считают, что согласованность движения Солнца, планет и их спутников указывает на их общее происхождение, возможно, из единого облака межзвездной материи,



РИС. 2.3
Схема, показывающая главные компоненты Солнечной системы в порядке их расположения относительно Солнца (не в масштабе). Все планеты обращаются вокруг Солнца по эллиптическим орбитам, которые располагаются почти в одной и той же плоскости.

при коагуляции которой и образовались Солнце и связанные с ним тела. Планеты *и их спутники обладают достаточной орбитальной скоростью, чтобы не упасть на* Солнце под действием его гравитационного притяжения.

СОЛНЦЕ

Сравнение. Солнце – одна из типичных звезд Млечного Пути. Из-за того что оно расположено так близко к нам, оно представляет собой самый яркий небесный объект. Примерно половина звезд Млечного Пути – такие же изолированные тела, как и Солнце, остальные – это двойные или тройные звезды, передвигающиеся относительно друг друга и связанные силой гравитационного притяжения.

Температура поверхности различных звезд меняется в широких пределах: от 2000 *до примерно* 50 000°С. *Многие* звезды относятся к классу звезд с температурой 10 000 – 25 000°С; *на нашем Со*лнце температура поверхности составляет *около* 5600°С.

Солнце – звезда среднего размера с диаметром $1{,}39 \cdot 10^6$ км. Размеры других звезд меняются от малых долей размера Солнца до величин, превышающих диаметр Солнца более чем в 1500 раз. Масса различных звезд составляет от 1/25 массы Солнца и, вероятно, до 100 солнечных масс.

Солнечная энергия. Подсчитано, что выделяемая Солнцем энергия составляет около 10^{33} эрг в секунду – величина, столь же непостижимая для большинства из нас, как, скажем, национальный долг. Почти вся солнечная энергия, достигающая Земли, приходит в виде электромагнитного излучения, частота которого образует спектр, включающий рентгеновские и ультрафиолетовые лучи, видимый свет, тепловое излучение и радиоволны. Земная атмосфера для некоторых длин волн непрозрачна, но тепловое излучение и видимый свет свободно проникают через нее.

Физики – специалисты по атомной энергии открыли в последние десятилетия подходящий источник солнечной энергии. Это ядерный синтез. При главных реакциях такого типа ядра водорода (протоны) соединяются между собой, образуя ядра гелия. Количество выделяющейся энергии подчиняется уравнению Эйнштейна о превращении массы в энергию: $E = mc^2$. *Энергия равна произведению* доли массы, перешедшей в энергию, на *квадрат скорости света (в метрических* единицах). Астрофизики в подробностях *изучили ряд ядерных реакций, но изложение* этих подробностей было бы чересчур сложным для нашей книги.

В ходе этих ядерных превращений диаметр Солнца практически не меняется, так как тенденция к взрывному расширению уравновешивается гравитационным притяжением составных частей Солнца, стягивающим газы в компактное сферическое тело. Хотя на поверхности температура составляет лишь около 5600°С, ближе к центру, где происходит ядерный синтез, она повышается, вероятно, не менее чем до 10 млн. градусов.

На Солнце обнаружены не только водород и гелий, но и другие элементы, однако в очень малых количествах. До сих пор астрономы выделили на Солнце 67 химических элементов; вероятно, там *есть и другие элементы, известные на* Зе-

мле, но содержание их слишком мало, чтобы их можно было обнаружить.

Другие звезды по составу похожи на Солнце: они состоят главным образом из водорода и в меньшей степени из гелия со следами более тяжелых элементов, унаследованных из их прежней дозвездной истории, когда они, возможно, были распределены в пространстве в виде газов, образовавшихся при расширении звезды типа «красного гиганта» или при взрыве «сверхновой». Волокнистая Крабовидная туманность – результат взрыва сверхновой в 1054 г. н. э. Другой такой взрыв отмечен в туманности Андромеды в 1885 г. Вероятно, все встречающиеся на Земле и во Вселенной элементы, ядра которых состоят из многих протонов и нейтронов (см. табл. 3.1), возникли при процессах ядерного синтеза в недрах звезд, причем началом был простейший атом – атом водорода.

Тепло и свет, излучаемые Солнцем, питают энергией многие геологические процессы. Тепло оказывает важное влияние на климат, приводит в действие гидрологический цикл, играет определенную роль при выветривании и эрозии и создает на Земле условия, пригодные для жизни. Без этого источника энергии не было бы ни потоков, размывающих горы, ни ледников, перепахивающих земную поверхность. Вся вода, кроме отдельных горячих источников и водоемов в вулканических областях, должна была бы замерзнуть; речная и береговая эрозия должна была бы прекратиться. Без солнечного тепла прекратилась бы даже ветровая эрозия.

Выделяемая Солнцем энергия остается практически неизменной: вариации составляют, вероятно, лишь немногие проценты. Жизнь на Земле может сохраняться в диапазоне температур всего лишь около 100°С. Существование непрерывно эволюционировавшего ряда ископаемых форм жизни, прослеживаемого по окаменелостям почти на 3 млрд. лет, – ясное свидетельство постоянства температуры Солнца на протяжении длительного времени.

На солнечном диске видны пятна, которые сохраняются несколько недель, а также многочисленные горячие точки и вспышки, существующие в течение каких-то часов. Непрерывная эксплозивная (взрывная) деятельность на Солнце вызывает отторжение заряженных частиц (ионов и протонов) в космическое пространство и разлет их со скоростью 300–600 км/с. Этот поток заряженных частиц называется *солнечным ветром*. С ним связано возникновение полярных сияний и магнитных явлений в нашей атмосфере. Магнитное поле Земли и ее атмосфера улавливают и поглощают эти частицы, так что они не приносят нашей планете большого вреда. Возможно, однако, что солнечный ветер является одним из второстепенных факторов эрозии на Луне.

Возраст Солнца. Расчеты, произведенные на основании теоретических представлений ядерной физики, показывают, что возраст Солнца составляет почти 5 млрд. лет. Такие расчеты находят независимое подтверждение в радиоактивности других частей Солнечной системы. Радиоактивность – это ядерный процесс, при котором определенные химические элементы претерпевают изменение и «распад» с образованием более легких элементов. Обычно этот процесс включает в себя излучение частиц и энергии. Примером служит медленное естественное превращение урана в один из видов свинца, происходящее в несколько стадий (гл. 3). Это превращение протекает с постоянной и измеримой скоростью, так что отношение количества оставшегося урана к количеству образовавшегося таким путем свинца может использоваться для измерения возраста. По измерениям радиоактивного распада производят расчеты, согласно которым установлено, что древнейшие известные на Земле породы имеют возраст 3,5–4,0 млрд. лет. На Луне найдены породы возрастом 4,7 млрд. лет, а возраст метеоритов достигает 4,6 млрд. лет. Эти данные подтверждают, что возраст Солнца и его спутников составляет приблизительно 5 млрд. лет и что все тела Солнечной системы образовались вероятно, в одно и то же время.

Что можно сказать о будущем Солнца? Расчеты показывают, что атомного горю-

чего (водорода) нашему светилу хватит по меньшей мере еще на 5 млрд. лет, так что Солнце – это поистине звезда среднего возраста. Когда звезды, сходные по массе с Солнцем, входят в «преклонный» возраст и запасы их водородного горючего истощаются, их излучение энергии падает, гелиевое ядро сжимается, а внешние слои расширяются, в результате чего образуются «красные гиганты». Проходя через стадию красного гиганта, звезда может потерять небольшую долю своего поверхностного материала и вступить в стадию «белого карлика». Когда наше Солнце будет в гипотетической стадии белого карлика, его возросшего излучения, по оценкам, будет достаточно, чтобы вчетверо повысить абсолютную температуру земной поверхности: от 300° выше абсолютного нуля (нынешняя температура) примерно до 1200° выше абсолютного нуля. При этом на Земле выкипят океаны и исчезнут все формы жизни. Нам, однако, не следует бояться столь ужасного конца – исполнение приговора отсрочено на 5 млрд. лет.

Предполагается, что после стадии белого карлика Солнце войдет в стадию старения и постепенно погаснет, превратившись в темное холодное космическое вещество – что-то вроде груды звездной золы или пепла.

Развитие звезд с массой, гораздо большей массы Солнца, происходит быстрее и более сложным путем; стадия старения включает в себя взрыв «сверхновой», в результате чего материал звезды разлетается в пространстве с высокими скоростями. Остаточные ядра взорвавшихся звезд становятся, как считают, телами чрезвычайно большой плотности (нейтронные звезды) или исчезают из виду, превратившись в «черные дыры» – объекты с настолько сильным гравитационным притяжением, что никакие частицы или лучи (тепловые, световые и т. д.) не могут из них вырваться. Подробное объяснение эволюции звезд выходит за рамки задач геологии.

ПЛАНЕТЫ

Планеты – крупные тела, движущиеся по орбитам вокруг Солнца (табл. 2.1). Они сильно отличаются друг от друга по размерам: по возрастающей от Меркурия и Плутона до Юпитера. Они могут быть сложены твердым материалом, частично или полностью окруженным концентрической оболочкой, состоящей из жидкости, газовой атмосферы или замерзших твердых тел. Меркурий, Венера, Земля и Марс – четыре внутренние, ближайшие к Солнцу планеты – сравнительно малы и сложены каменным или металлическим веществом земного типа. Юпитер, Сатурн, Уран и Нептун гораздо крупнее и состоят из большого количества газов: водорода, гелия, метана, а также, возможно, из твердого аммиака и двуокиси углерода («сухой лед»), окружающих плотное каменное ядро. Плутон настолько удален от нас, что, кроме его массы, диаметра и периода обращения, о нем мало что известно.

ЗЕМЛЯ КАК ПЛАНЕТА

Движение Земли. Земля – самая крупная из четырех каменных планет, близких к Солнцу, – обращается вокруг Солнца по почти круговой орбите. Среднее расстояние от Солнца составляет приблизительно 150 млн. км. Скорость движения Земли по орбите 29,7 км/с, полный оборот Земля совершает за 365,26 сут. Период вращения Земли вокруг своей оси 23 ч 56 мин. В результате этого вращения возникло небольшое экваториальное вздутие и полярное сжатие, так что диаметр Земли в экваториальном сечении на 43 км длиннее диаметра, соединяющего полюсы вращения.

Масса, объем и плотность. Полная масса Земли составляет $5{,}976 \cdot 10^{27}$ г. Непосредственно эту массу измерить нельзя, но рассчитать ее сравнительно просто по формуле силы гравитационного притяжения:

$$F = k_1 \frac{m_1 m_2}{d^2},$$

Таблица 2.1

Солнечная система

Планета	Диаметр, км	Среднее расстояние от Солнца, млн. км	Период обращения по орбите	Период вращения вокруг своей оси	Наклон оси вращения	Число спутников (лун)	Относительная масса (масса Земли = 1)	Плотность (плотность воды = 1)	Атмосфера	Температура поверхности, °С
Меркурий	4880	57,9	88 сут	59 сут	28°	0	0,055	5,4	Нет	Днем 350, ночью – 170
Венера	12258	108,2	224,7 сут	243 сут (обратное)	3°	0	0,815	5,2	CO_2	Облака, – 33 Твердая поверхность, 480
Земля	12756	149,6	365,26 сут	23 ч 56 мин 4 с	23°27′	1	1,000	5,52	N, O, CO_2, Ar, H_2O	Поверхность грунта, 22
Марс	6774	227,9	687 сут	24 ч 37 мин 23 с	23° 59′	2	0,108	3,9	CO_2, Ar(?)	Твердая поверхность, – 23
Юпитер	142800	778,3	11,86 лет	9 ч 30 мин 30 с	3° 05′	13	317,9	1,314	H, He	Облака, – 150
Сатурн	120000	1427	29,46 лет	10 ч 14 мин	26° 44′	11	95,2	0,704	H, He	Облака, – 180
Уран	51800	2870	84,01 лет	11 ч (обратное)	82° 05′	5	14,6	1,21	H, He, CH_4	Облака, – 210
Нептун	49500	4497	164,8 лет	16 ч	28° 48′	2	17,2	1,67	H, He, CH_4	Облака, – 220
Плутон	5800	5900	247,7 лет	6 сут 9 ч	?	0	0,1(?)	2(?)	Не обнаружена	– 230(?)

где k_1 – гравитационная постоянная, равная $6{,}67 \cdot 10^{-8}$ (в метрической системе мер); m_1 и m_2 – массы притягивающихся тел (в граммах); d – расстояние между центрами тел (в сантиметрах)[1].

Объем приблизительно сферической Земли также легко подсчитать, так как радиус точно известен из измерений дуг ее окружности. Найденный таким способом объем составляет $1{,}083 \cdot 10^{27}$ см^3.

Зная массу и объем, находят плотность. Плотность Земли равна 5,52 г/см^3, т. е. в 5,52 раза больше плотности воды. Установлено, что внешняя, каменная часть земной коры имеет среднюю плотность 2,8. Таким образом, чтобы общая плотность равнялась 5,52, внутренняя часть Земли должна быть плотнее, чем наружная. Вероятный характер строения внутренних областей Земли показан на рис. 1.3. Возрастание плотности с глубиной можно объяснить различиями в составе и той огромной силой, с которой внешние части Земли давят на внутренние. Предполагается, что внутреннее ядро имеет плотность около 13, что, по-видимому, соответствует состоянию металлического железа при этом давлении.

ЛУНА

Общая характеристика. Как указано в табл. 2.1, Луна – единственный естественный спутник Земли. Диаметр Луны равен 3475 км. Она обращается вокруг Земли на среднем расстоянии примерно 400 тыс. км, полный месячный цикл – от одного полнолуния до другого – занимает 29 1/2 сут. Орбита Луны составляет с плоскостью земной орбиты угол 5°, поэтому Луна редко оказывается полностью в тени Земли. Однако солнечные и лунные затмения свидетельствуют о том, что положения, когда Луна и Земля загораживают одна другую от Солнца, все-таки возникают.

Поскольку период вращения Луны вокруг своей оси и период обращения вокруг Земли совпадают, одна сторона Луны всегда обращена к Земле. Форма Луны почти совершенно сферическая, она лишь очень немного искажена обращенным к Земле вздутием, обусловленным гравитационным притяжением Земли.

Когда на Луне день, ее поверхность очень яркая и горячая (115°С), но ночью там чрезвычайно холодно (−135°С), так как атмосфера, которая могла бы сохранять тепло, отсутствует.

Средняя плотность Луны равна 3,3 г/см^3 и мало отличается от средней плотности большинства пород, залегающих у земной поверхности, но составляет только 7/10 плотности Земли в целом.

Абсолютный возраст древнейших лунных пород, согласно радиологическим определениям на образцах, собранных астронавтами, составляет 4,7 млрд. лет. Это на 0,9 млрд. лет превышает возраст самых древних пород, найденных до настоящего времени в земной коре.

Особенности поверхности. Поверхность Луны изучена и задокументирована с большой детальностью; эта работа выполнялась и астронавтами, и с помощью дистанционно управляемых космических аппаратов (рис. 2.4–2.8). Обращенная к нам сторона характеризуется обилием кратеров диаметром от нескольких метров до 241 км. Высота бортов крупнейшего из этих кратеров составляет приблизительно 4000 м. Некоторые кратеры имеют вулканическое происхождение, но подавляющее большинство – это следы падения метеоритов. Имеются и еще более обширные ровные темные области, которые называются лунными морями. Это ударные кратеры, позднее покрытые сравнительно гладким плащом лавовых потоков. Известны также борозды (рилли), лучи (светлые полосы, расходящиеся от крупных кратеров), цепочки кратеров и морщинистые гряды. Рилли – это извилистые каналы, которые отходят от кратеров или других понижений и спускаются к поверхности лунных морей. Теоретические представления об их происхождении очень различны: от процессов лунной эрозии до обрушения пустот в лавовых потоках. Лучи образованы материалом, выброшен-

[1] В системе СИ масса измеряется в килограммах, расстояние – в метрах, сила – в ньютонах ((кг · м)/с^2); соответственно гравитационная постоянная равна в этой системе $6{,}67 \cdot 10^{-11}$ (Н · м^2)/кг^2. – *Прим. перев.*



РИС. 2.4

Кратер Аристарх шириной 57 км. Фотография получена с космического аппарата «Лунар орбитер-I» с высоты 121 км. Обратите внимание на обрушивающиеся стенки кратера (НАСА).

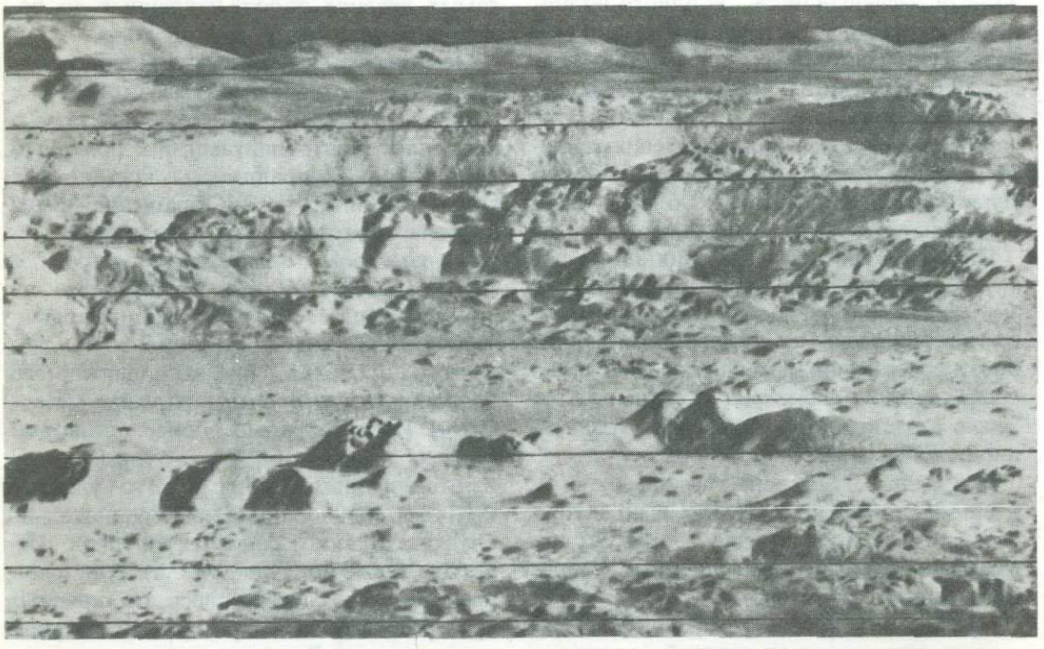


РИС. 2.5

Снятая крупным планом фотография одного из участков крупного лунного кратера Коперник. Фотография получена с космического аппарата «Лунар орбитер-II» с высоты 46 км на расстоянии 250 км от центра кратера. Снимок охватывает участок, имеющий 27 км в ширину и находящийся на расстоянии около 80 км до горизонта. Высота уступов по кромке кратера составляет 305 м. По склонам развиваются оползни. Холмы, поднимающиеся над плоским дном кратера, имеют высоту 305 м; крутизна склонов достигает 30° (НАСА).

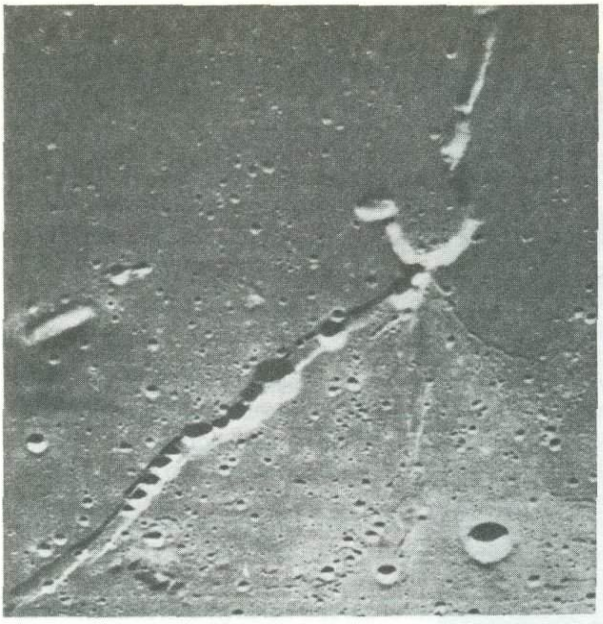


РИС. 2.6
Цепочки кратеров вдоль борозды (рилля) Гигинуса (Rima Hyginus). Гигинус – кратер шириной 11 км, расположенный на пересечении двух крупных трещин. На дне кратера находятся небольшие купола. Не связанные между собой кратеры в этих цепочках служат ясным свидетельством прошлых времен; такие кратеры, расположенные вдоль четких трещин, едва ли могли образоваться в результате внешнего ударного воздействия. Темное поле на поверхности лунного моря (слева вверху), возможно, материал лавовых потоков, излившихся из Гигинуса (НАСА).

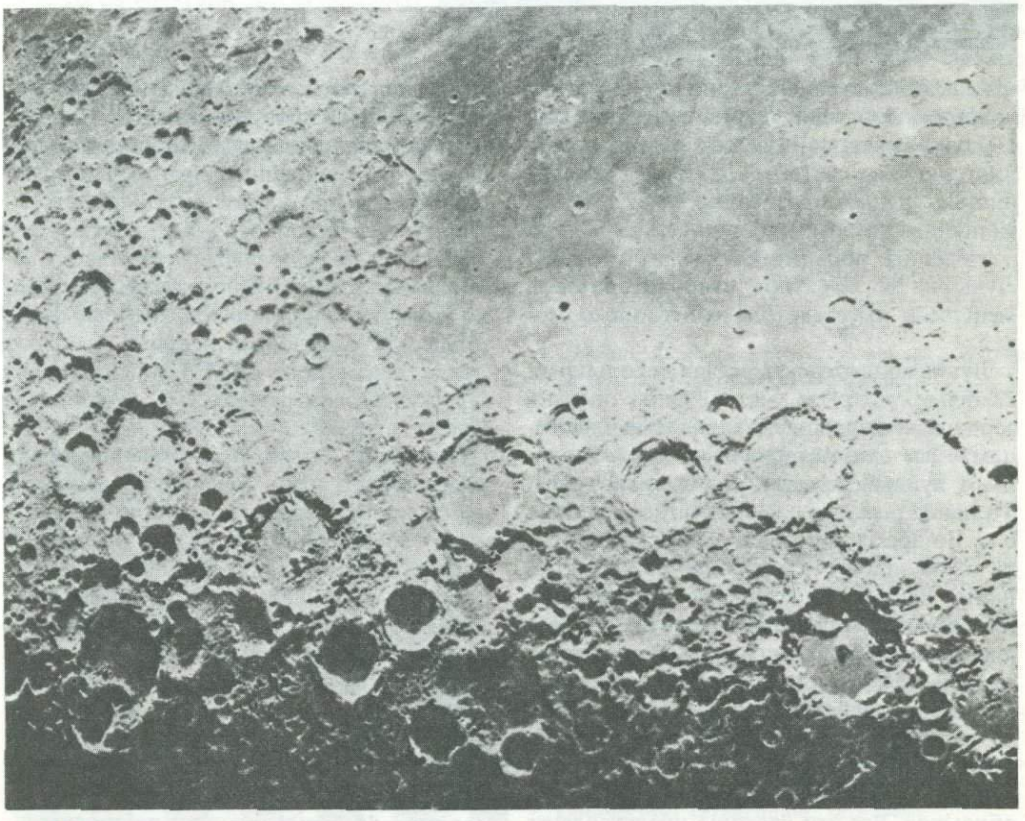


Рис. 2.7
Участок лунной поверхности в последней четверти между кратерами Птолемей и Тихо. Морские области, подобные той, которая расположена на снимке слева вверху, подстилаются концентрациями масс вещества высокой плотности. Связанные с ними гравитационные аномалии, называемые масконами, обнаружены по возмущениям в орбите аппарата «Лунар орбитер-I». Кратеры явно имеют различный возраст. (Обсерватория Маунт-Уилсон.)

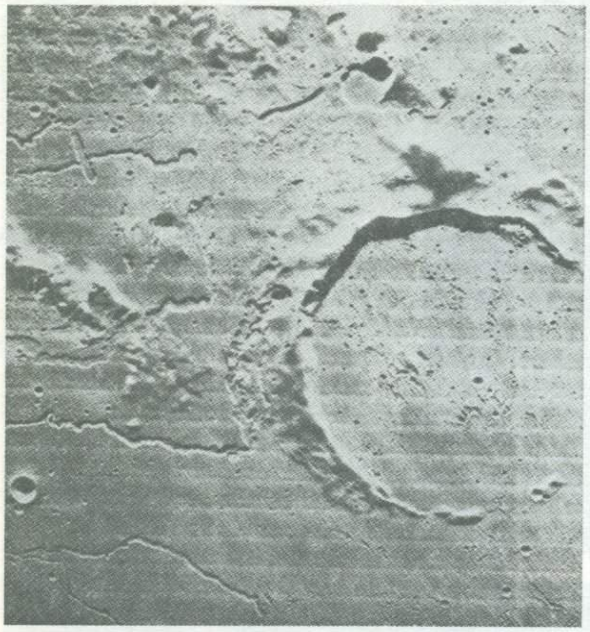


Рис. 2.8
Фотография подковообразного лунного кратера Принц и участка гор Харбингер, полученная с космического аппарата «Лунар орбитер-V» с высоты 138 км. От борта кратера до дна морской впадины местность опускается примерно на 1200 м. Особый интерес представляют долины, идущие от более мелких кратеров (диаметром в несколько километров); они прослеживаются на несколько десятков километров, а затем теряются. Предполагается, что эти каналы представляют собой следы вулканических извержений и быстрого лавинообразного перемещения горячего твердого, сильно насыщенного газами вулканического материала вниз по склону (НАСА).

ным или выплеснувшимся из связанных с ними кратеров при ударах падавших тел. Цепочки кратеров – это, как ясно из названия, линейные системы кратеров, а морщинистые гряды образованы, по-видимому, излияниями лавы вдоль зон разломов. В отличие от обращенной к нам стороны Луны на ее обратной стороне кратеров меньше и имеется только несколько морей.

Лунная поверхность усеяна небольшими камнями, покрыта метеоритной пылью, зернами минералов и стекловатыми частицами; все эти материалы вместе составляют лунный реголит, или лунный грунт. Толщина рыхлого слоя достигает местами 6 м. Во время работы космического аппарата «Аполлон-17» в декабре 1972 г. астронавты нашли удивительные породы – так называемый «оранжевый грунт». Это открытие возбудило разговоры о том, что на лунной поверхности породы могли окислиться под действием воды. Однако при дальнейшем изучении выяснилось, что оранжевый грунт состоит из частиц каплевидной и сферической формы или из их обломков. Все эти частицы представляют собой стекло, имеющее коричневатый или буровато-оранжевый цвет. Такое вещество никоим образом нельзя считать продуктом водного изменения или вулканической деятельности в присутствии воды. Специалисты по анализу лунных пород пришли к выводу, что найденный оранжевый грунт образовался при ударе метеорита, столкнувшегося с Луной 3,71 млрд. лет назад. В результате последовавшего взрыва из воронки было выброшено множество капелек расплавленной породы, которые после остывания образовали шарики твердого стекла диаметром 0,02–0,5 м. Оранжевая окраска связана с высоким содержанием железа и титана.

Отличия от Земли. Исследования, начавшиеся после лунных экспедиций на аппаратах серии «Аполлон», позволили получить много новых данных о Луне; эти данные указывают на многочисленные черты сходства с Землей и на некоторые заметные отличия. Сила тяжести на Луне составляет только одну шестую силы тяжести на Земле. Исследования гравитационного поля Луны во время орбитальных наблюдений показали наличие глубинных скоплений («концентраций») плотных масс, названных *масконами*, под лунными морями. Избыточные массы, расположенные на стороне, обращенной к Земле, вызывают небольшое отклонение формы Луны от сферической.

Луна имеет и слабое магнитное поле неизвестного происхождения; некоторые лавовые потоки, возраст которых измеряется миллиардами лет, все еще обнаруживают слабое намагничивание. Возможно, что когда-то Луна имела небольшое активное жидкое ядро, создававшее магнитное поле; затем это ядро затвердело.

Поскольку на Луне нет атмосферы, там невозможны такие явления, как химическое выветривание пород, выпадение дождя или снега, водная, ветровая, волновая или ледниковая эрозия. Из всех процессов денудации и осадконакопления, действующих на Земле, на Луне могут действовать только процессы гравитационного переноса посредством обвалов и оползней горных пород. Но даже оползни на Луне редки; возможно, это связано с низкой плотностью лунных пород. Однако на одном из участков, обследованных в ходе экспедиции «Аполлона-17», обнаружен вероятный след оползня.

Удары метеоритов испещрили поверхность Луны воронками и послужили причиной появления многочисленных каменных обломков, группирующихся в длинные полосы. Из-за того что выветривания – в том виде, как мы его знаем на Земле, – на Луне не существует и эрозия протекает чрезвычайно медленно, этот странный, с обилием кратеров лунный ландшафт за длительное время изменился мало. Самые крупные шрамы, оставленные ударами метеоритов, сохраняются уже миллиарды лет, и даже кратеры меньшего размера существуют минимум сотни миллионов лет. Главная масса метеоритного материала попала на Луну в ранний период ее истории.

Большинство лунных пород имеет магматическое происхождение, и по составу они несколько похожи на обычные базальты, распространенные на Земле (рис. 2.9). Одна из разновидностей лунных пород содержит исключительно много минерала, который мы называем полевым шпатом. Другие мало отличаются по процентному содержанию некоторых химических элементов, таких, как фосфор, титан, калий и редкоземельные элементы. Часть этих пород – обломки метеоритов.

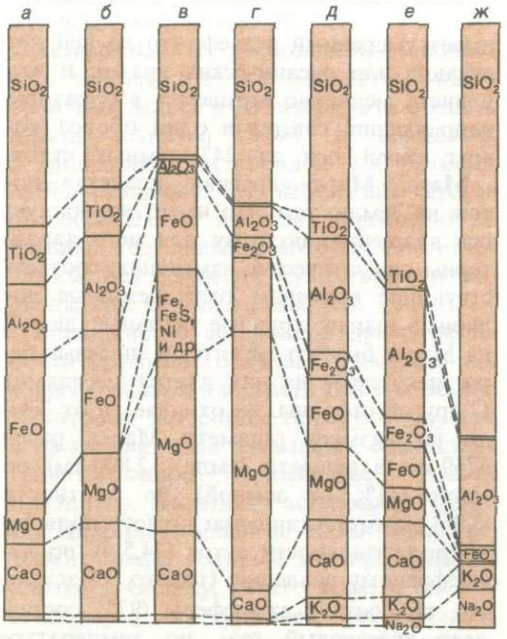


РИС. 2.9

Химический состав лунных, метеоритных и земных пород (по работам: *Guest, Greeley, 1977; Taylor, 1975; Levinson, Taylor, 1971; Mason, 1962; Nockolds, 1954*). *а* – средний состав 16 образцов лунных базальтов; *б* – средний состав 4 проб тонкого лунного материала; *в* – средний состав 94 хондритовых метеоритов; *г* – средний состав 23 образцов перидотитов; *д* – средний состав 96 образцов земных базальтов; *е* – средний состав 49 образцов андезитов; *ж* – средний состав 48 образцов гранитов. Лунные породы характеризуются умеренным содержанием кремнезема и значительным содержанием железа, алюминия, магния и кальция; исключительно высоко содержание титана. Для метеоритов характерны металлы – железо и никель, а также большое количество кремнезема, магния, железа и кальция в различных химических соединениях. Если метеориты – это примеры первозданного планетарного материала Солнечной системы, то можно считать, что Земля испытала весьма интенсивную химическую сегрегацию, особенно принимая во внимание наличие железа в земном ядре и относительное увеличение содержания кремнезема, натрия и калия в континентальной коре.

В то время как многие обычные для Земли особенности строения на Луне не встречаются (например, нет скоплений слоистого материала, отложенного ветром или водой), слоистый вулканический материал имеется. На Земле некоторые части поверхности превратились под действием внутренних сил в горные хребты; на поверхности Луны горы тоже существуют, но их происхождение связано, по-видимому, в основном с ударами метеоритов.

Недра Луны. Внутренние области Луны не кажутся такими беспокойными, как недра Земли. Хотя «лунотрясения» изредка и происходят, особенно во время наибольшего приближения к Земле, они отражают только гравитационное воздействие. Некоторые из отмеченных приборами лунотрясений вызваны, возможно, ударами метеоритов. Скорость сейсмических волн на Луне не достигает тех значений, которые характерны для большинства земных пород, и лучше всего соответствует медленному распространению волн от землетрясений через обычный рыхлый материал.

Сейсмические данные, полученные с помощью приборов, которые были оставлены на Луне во время работ по программе «Аполлон», раскрывают нам устройство лунных недр. Лунная кора имеет слоистое строение до глубины 65 км. Самый верхний слой мощностью 2–3 км сложен разрушенными породами и рыхлым «лунным грунтом». Второй слой, до глубины 25 км, сложен лунными базальтами либо в виде пачки лавовых потоков, либо в виде мощной массивной толщи. Третий слой, на глубинах от 25 до 65 км, состоит, по-видимому, из магматических пород того же типа, что и земные породы, залегающие на соответствующих глубинах. Резкое изменение сейсмических свойств на глубине около 65 км отмечает подошву лунной коры и переход к лунной мантии.

Метаморфических пород на Луне, по-видимому, нет, за исключением тех, которые образовались при ударах метеоритов.

ДРУГИЕ ТЕЛА СОЛНЕЧНОЙ СИСТЕМЫ

Описание всех планет выходит за рамки данной книги, так что здесь рассматриваются только Венера и Марс, относительно которых у нас есть новые сведения. Данные о других планетах можно почерпнуть из литературы, указанной в конце этой главы.

Венера. Венера, ближайшая к нам планета, очень похожа на Землю по размеру и плотности, но отличается по атмосферному давлению, которое выше земного приблизительно в 90 раз. Атмосфера состоит в основном из двуокиси углерода (CO_2) с небольшим количеством окиси углерода (CO), воды (H_2O), фтористоводородной кислоты (HF). Кислорода (O_2) очень мало или нет совсем. Эта плотная газовая оболочка образует непроницаемую пелену облаков и создает «парниковый эффект», который повышает температуру поверхности до 750° выше абсолютного нуля. Просвечивание сквозь облачный покров с помощью радаров показало, что твердая поверхность Венеры имеет умеренный рельеф, что на ней нет океанов или океанических впадин и что планета медленно вращается в обратном направлении, совершая один оборот вокруг своей оси за 243 земных суток.

Марс. Марс – «красная планета» – похож на Землю тем, что имеет наклонную ось вращения; поэтому для него характерны климатические изменения, соответствующие временам года, сезонные полярные шапки, крупные песчаные дюны; на Марсе бывают гигантские пылевые бури (некоторые из них длятся месяцами). С другой стороны, он отличается от Земли по размеру (диаметр Марса равен 6769 км, а диаметр Земли – 12 800 км), по массе (11% от земной), по плотности (3,96), по отсутствию магнитного поля, по продолжительности суток (24,5 ч), по атмосферному давлению (только 0,5 земного), по составу атмосферы (97% составляет углекислый газ), по температуре поверхности (от -75 до $+15$°C). На Марсе нет океанов, зато имеются

огромные вулканические горы. У Марса две луны; это небольшие, изрытые кратерами, несимметричные тела, одно из которых движется по орбите вокруг Марса в обратном направлении со скоростью, вдвое превышающей скорость вращения планеты вокруг своей оси. На Марсе существуют также огромные ветвящиеся линейно вытянутые впадины, более глубокие, чем Большой каньон в Аризоне. Создается впечатление, что эти извилистые каналы (длина одного из них составляет 1500 км, ширина 200 км, а глубина 6 км) пропилены потоками. Существование таких каналов заставляет предполагать, что раньше, когда на Марсе было теплее, чем сейчас, там была вода в «нормальном» жидком виде. Было ли так на самом деле? С этим вопросом связан и другой: сколько сохранилось водяного льда в современном мерзлом грунте Марса вместе с «сухим льдом» (замерзшим CO_2)? Один крупный метеоритный кратер (Эллада) имеет ширину 2000 км и глубину 4 км. Гигантский, уникальный по размерам вулкан Олимп с пологими склонами достигает в диаметре 600 км, имеет высоту 23 км и сложен,по-видимому, лавовыми потоками.

Астероиды. В расположении планет есть промежуток: он находится между орбитами Марса и Юпитера. Эта область занята сотнями тысяч, а возможно, и миллионами астероидов. Их размеры очень различны: от небольших кусков (различимых на пределе видимости) до крупных тел, диаметр которых достигает 955 км. Без сомнения, существуют и мириады еще более мелких тел.

Большинство астероидов движется по почти круговым орбитам, плоскости которых близки к плоскости орбиты Земли. Некоторые астероиды образуют группы, и на их движение оказывают совместное гравитационное воздействие Солнце и Юпитер. Несколько астероидов, таких, как Икар (названный по имени героя греческого мифа, который взлетел слишком близко к Солнцу, отчего воск, скреплявший перья его крыльев, расплавился), имеют вытянутые эллиптические орбиты, двигаясь по которым они оказываются внутри орбит внутренних планет.

Астероиды представляют собой, по мнению астрономов, рассеянный материал, который при возникновении Солнечной системы почему-то не образовал отдельного планетного тела и не присоединился к другим планетам; возможно, этому отчасти помешало мощное воздействие Юпитера.

Кометы. Кометы – это, вероятно, самые странные тела, существующие в Солнечной системе. Они движутся главным образом по сильно вытянутым эллиптическим орбитам, подходя близко к Солнцу и удаляясь от него за пределы орбиты Плутона (рис. 2.3). Общая масса кометы очень мала. В составе кометы Когоутека, открытой в 1973 г., присутствуют, как было установлено, молекулы аммиака (NH_3), метана (CH_4), водорода (H_2), а также следы водяного льда (H_2O), цианистого водорода (HCN) и цианистого метила (CH_3CN).

Когда комета приближается к Солнцу, часть замерзшего материала сублимируется и под действием солнечного ветра отталкивается в сторону от Солнца, образуя хвост длиной в миллионы километров. Кометы не горячие тела, их свет обусловлен солнечным излучением. Их аммиачный лед можно себе представить в виде небесных «снежков», нашпигованных (на манер того, как это делают озорные дети) кусочками камней.

Метеориты. Двигаясь вокруг Солнца и сопровождая Солнце в пространстве Вселенной, Земля почти непрерывно проходит около мелких твердых тел, совершающих свой путь в пределах Солнечной системы. Если они оказываются в области достаточно сильного притяжения Земли, они падают на нашу планету. Несколько раз в году орбита Земли пересекает орбиты роев этих быстро летящих частиц. По расчетам, в земную атмосферу каждый день попадает около 8 млрд. таких частиц. Большинство из них, войдя в атмосферу и разогревшись от трения, испаряется, испуская яркое свечение, почему их и называют «падающими звездами». Как правило, эти частицы очень мелкие, размера песчинок или меньше, но в ясную ночь их путь на небе хорошо виден. Научное название для таких частиц



РИС. 2.10

Кратер Метеор около Уинслоу, шт. Аризона. Считается, что эта воронка шириной около 1,6 км и глубиной 150 м имеет, скорее всего, метеоритное, а не вулканическое происхождение. Доказательством такого предположения может служить тот факт, что внутри воронки залегают опрокинутые слоистые осадочные породы, а не лава, на бортах воронки отмечается беспорядочное нагромождение глыб известняков и песчаников, а в окрестности кратера найдено множество мелких метеоритов. (Фотография компании «Спенс эйр фотос».)

в стадии свечения – «метеоры». Метеоры, достигающие земной поверхности, называются метеоритами. Чаще всего нам не удается их заметить, но ежедневно на Землю выпадают, вероятно, сотни тонн метеоритной пыли. Огромное множество микрометеоритов обнаружено в глубоководных осадках океанов и в снежно-ледяном покрове Антарктиды. Много мелких кусочков такого вещества найдено недавно на тающих ледниках (в этой области планируются новые исследования).

Крупнейший из известных метеоритов, весящий 59 т, был найден на юго-западе Африки, где он сейчас и находится. Большинство других весят не больше чем несколько килограммов. Около 7% найденных метеоритов состоят из железоникелевого сплава. Они выглядят как куски металла с закругленными краями и покрыты ямками, образовавшимися от нагревания при трении во время их спуска через воздушную оболочку Земли. Большинство метеоритов, поднятых после их засвидетельствованного очевидцами падения, представляют собой каменные тела и по своему виду, составу и способности к выветриванию похожи на обычные земные породы. Из-за этого сходства много каменных метеоритов ускользает от внимания. Высокое значение отношения каменных метеоритов к металличе-

ским (в наблюдавшихся случаях) согласуется с отношением содержания каменного материала к содержанию металлического (железоникелевого) материала в Земле, что позволяет делать интересные предположения о происхождении нашей планеты.

Хотя аккреционный рост Земли несомненно происходил в основном на раннем этапе ее истории, до сих пор на Землю иногда падают тела намного более крупные, чем обычные метеориты. Одно из таких тел – возможно, крупный астероид, – ударившись о Землю, образовало кратер Метеор в Аризоне (рис. 2.10). Этот ударный кратер, возраст которого составляет по меньшей мере десятки тысяч лет, благодаря своему положению в аридной зоне эродирован мало. Около дюжины других ударных воронок, называемых астроблемами («звездными ранами»), установлены на разных континентах.

ВРЕМЕНА ГОДА

Движение Земли в Солнечной системе и воздействие солнечного тепла регулируют чередование времен года на нашей планете. Ось вращения Земли на $23\,^1/_2{}^\circ$ отклоняется от перпендикуляра к плоскости ее обращения вокруг Солнца (рис. 2.11). Следовательно, в разные периоды годового цикла бóльшая часть прямых солнечных лучей падает на разные части Земли. На рис. 2.11 показано положение, в котором Земля оказывается в декабре. Заметьте, что в это время одна и та же доза солнечной энергии приходится на гораздо большую площадь в северном полушарии, чем в южном. Наклон лучей в северном полушарии приводит к более низким температурам, что и знаменует наступление зимы. В этот период Северный полюс находится в темноте круглые сутки, а на Южном полюсе круглые сутки светло (полярный день, «полуночное солнце»). Очень большой наклон лучей, падающих в район Южного полюса, приводит только к слабому потеплению.

Обратимся теперь к положению, в котором Земля оказывается на другой стороне своей орбиты спустя шесть месяцев, т. е. в июне. В этот период северные широты Земли освещаются почти прямыми солнечными лучами, а на южное полушарие лучи падают косо. В результате температуры меняются, и в северном полушарии наступает лето, а в южном – зима.

На полпути между описанными летним и зимним положениями перпендикулярные лучи Солнца падают на экватор. Это – время весеннего или осеннего равноденствия с умеренными температурами и в северном и в южном полушарии, когда день и ночь имеют одинаковую продолжительность во всем мире.

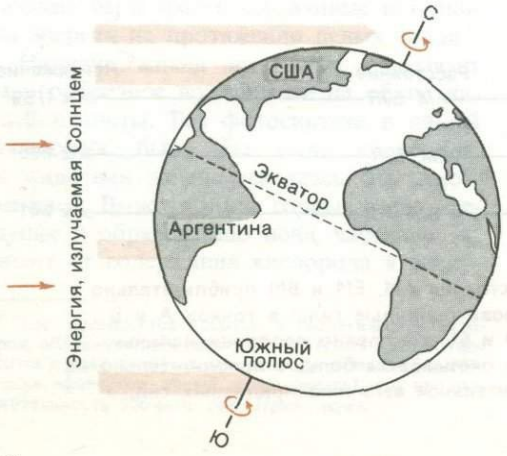


РИС. 2.11
Солнечное излучение и времена года на Земле. На схеме Земля показана в положении, когда в южном полушарии лето, а в северном – зима.

ПРИЛИВЫ

Приливы, т.е. поднятия уровня воды в океанических бассейнах, обязаны своим происхождением главным образом гравитационному притяжению Луны. Луна движется настолько близко к Земле, что ее притяжение сказывается на Земле сильнее, чем притяжение всех других небесных тел, кроме Солнца, которое удерживает Землю вместе с Луной на орбите.

Пара Земля–Луна, связанная гравитационным притяжением, совместно вращается вокруг общего центра тяжести, расположенного примерно в 4800 км от центра Земли, так как масса Земли превосходит массу Луны. В этой вращающейся системе, рассматриваемой в целом, полная центробежная сила в точности уравновешивает центростремительные силы. Из-за того что одна сторона Земли ближе к Луне, чем другая, лунное гравитационное притяжение оказывается на ближней стороне на 7% больше, чем на дальней (рис. 2.12). Это приводит к хорошо известному явлению приливов и отливов в океанах, слабым приливным явлениям в атмосфере и даже вызывает приливные колебания твердой земной коры с амплитудой около 10 см.

Из-за того что Земля испытывает суточное вращение в поле этих сил, а Луна движется вокруг нее, приливные вздутия стремятся двигаться в соответствии с положением Луны, поэтому в каждом данном районе океана каждые 24 ч 50 мин дважды происходит прилив и дважды – отлив, если не вмешиваются какие-либо осложняющие факторы. Ежесуточное отставание на 50 мин обусловлено опережающим движением Луны по ее орбите вокруг Земли, которая, непрерывно вращаясь, вынуждена догонять Луну.

Солнце также вызывает на Земле приливы, хотя и втрое меньшей высоты, и они накладываются на приливы, вызванные притяжением Луны, меняя их характеристики.

Несмотря на то что Солнце, Земля и Луна лежат почти в одной и той же

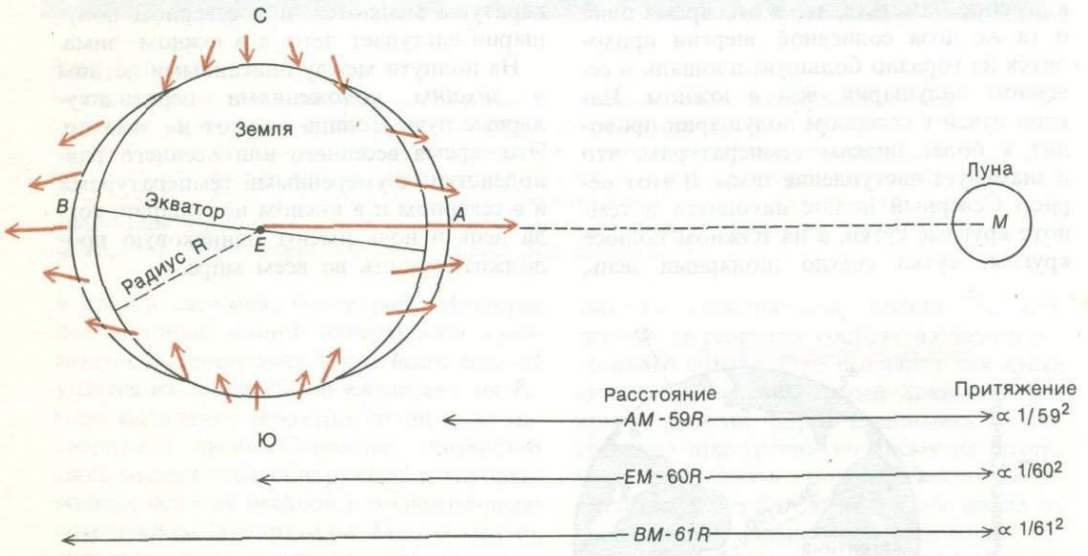


РИС. 2.12

Схема возникновения приливов и отливов. Расстояния AM, EM и BM приблизительно равны 59, 60 и 61 радиусам Земли, поэтому гравитационные силы в точках A и B обратно пропорциональны квадратам чисел 59 и 61, т.е. прямо пропорциональны числам 1/3481 и 1/3721. Притяжение в точке A оказывается больше приблизительно на 7%. Стрелками показано направление и относительная величина приливных сил, действующих в различных местах.

плоскости, они непрерывно меняют свое положение относительно друг друга, и соответственно изменяется их приливное воздействие. Дважды на протяжении лунного месяца – в новолуние и полнолуние – Земля, Луна и Солнце оказываются на одной линии. В это время приливные силы Луны и Солнца складываются, и возникают необычно высокие («сизигийные») приливы. В первой и третьей четвертях Луны, когда приливные силы Солнца и Луны направлены под прямым углом друг к другу, они оказывают противоположное воздействие, и высота лунных приливов оказывается ниже приблизительно на одну треть («квадратурные приливы»).

Другие различия в высоте приливов связаны с выявленными перемещениями Луны по небесному меридиану в течение года, с влиянием широты, с размерами и формой океанического бассейна, а также с конфигурацией заливов, эстуариев и другими особенностями берегов. Поэтому на мареограммах можно увидеть записи сложной последовательности изменений уровня воды.

ЖИЗНЬ НА ЗЕМЛЕ

Земля – это, несомненно, единственная в Солнечной системе планета, где существует высокоразвитая жизнь в том виде, в каком мы ее знаем. Для того чтобы возникла жизнь, нужны определенные условия. Вероятно, единственным химическим элементом, свойства которого делают возможным образование органического вещества, является углерод. Двуокись углерода (углекислый газ) и водяной пар – необходимые компоненты атмосферы, в которой растения могут производить фотосинтез. Земля удалена от Солнца именно на то расстояние, при котором вода существует в жидком состоянии. Наконец, для того чтобы высокоразвитая жизнь могла развиваться, необходимо сохранение нужных условий в течение сотен миллионов лет или еще дольше. Чтобы появились такие сложные формы живых организмов, как млекопитающие, Земля должна была иметь устойчивые источники энергии на протяжении целых эонов [1].

Наличие жизни на Земле оказывает многообразное воздействие на облик нашей планеты. Без фотосинтеза в нашей атмосфере было бы мало кислорода, и животная жизнь оказалась бы невозможной. Выветривание горных пород, ведущее к образованию почв, частично зависит от содержания кислорода в воздухе. До того как на суше образовался плотный растительный покров, т.е. раньше чем 400 млн. лет назад, эрозия должна была протекать гораздо быстрее, чем сейчас. В последнее время люди уничтожили часть растительного покрова, и уже в исторический период скорость эрозии в некоторых районах сильно возросла. Если бы не было жизни, не образовались бы уголь и нефть.

Поскольку Солнце – это всего лишь одна из множества звезд, число которых в известной нам части Вселенной оценивается в 10^{20}, пригодные для жизни условия могут, вероятно, существовать и на планетах, вращающихся вокруг других звезд. По оценке Шапли (Shapley, 1962), для существования организмов пригодны 100 млн. планетных систем. Фон Хёрнер (Von Hoerner, 1961) считает, что из каждых 3 млн. звезд одна может сопровождаться планетной системой с разумной цивилизацией. Уже начались исследования с помощью радиотелескопов и космических приборов по выделению возможных сигналов, например в виде систем чисел, от других культур. В космос запущено искусственное небесное тело «Джупитер-Проб», несущее пластину, на которой изображены фигуры мужчины и женщины и человеческое лицо. Это одна из попыток установить контакты с другими разумными существами во Вселенной.

[1] Эон – промежуток времени в геологической истории, объединяющий несколько эр. Наше время относится к эону, который называют фанерозоем (по-гречески «фанерос» – явный, «зоэ» – жизнь); его продолжительность 570 млн. лет. – *Прим. перев.*

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ

Солнечная система находится далеко от центра нашей Галактики – Млечного Пути, одного из многих населяющих Вселенную спиральных скоплений, состоящих из миллиардов звезд. Вместе со свитой планет, их спутников, астероидов, метеоров и комет Солнце движется вокруг галактического центра со скоростью 240 км/с.

На Солнце приходится почти вся (за исключением 0,2%) масса Солнечной системы. Имея температуру поверхности 5600°С, Солнце служит источником широкого спектра электромагнитного излучения и солнечного ветра заряженных частиц. Его энергия возникает благодаря ядерному синтезу водорода с образованием гелия. Его тепло и свет приводят в действие гравитационные процессы на Земле. Его возраст оценивается приблизительно в 5 млрд. лет.

Почти все планеты и их спутники движутся с запада на восток, в направлении медленного вращения Солнца. Земля — крупнейшая из четырех внутренних планет – совершает один оборот вокруг Солнца за год и один оборот вокруг своей оси за сутки. Земля имеет почти шарообразную форму, будучи слегка сплюснутой у полюсов и слегка раздутой у экватора. Ее средняя плотность составляет 5,52.

Луна, всегда обращенная к Земле одной стороной, обращается вокруг Земли за $29\,^1/_2$ сут. Лишенная воздуха и воды, она сильно нагревается в течение своего дня и чрезвычайно сильно охлаждается ночью. Денудация и осадконакопление иначе как под действием силы тяжести и, возможно, солнечного ветра там невозможны. Луна имеет рыхлый обломочный чехол мощностью до 6 м и трехслойную кору толщиной 65 км. На лунной поверхности находится множество ударных и вулканических кратеров, лунных морей, уступов, риллей (борозд), лучей и морщинистых гряд. Поле силы тяжести и магнитное поле на Луне слабые. Некоторые из найденных на лунной поверхности пород достигают возраста 4,7 млрд. лет.

Тысячи астероидов диаметром до 955 км заполняют промежуток в ряду планет между Марсом и Юпитером. Кометы – малые твердые объекты, движущиеся вокруг Солнца по сильно вытянутым эллиптическим орбитам. Приближаясь к Солнцу и выходя затем из его ближайших окрестностей, кометы становятся видимыми и приобретают хвосты из испарившегося материала. Каждую ночь в земной атмосфере появляется много метеоров; некоторые достаточно крупные металлические (железоникелевые) и каменные небесные тела достигают поверхности Земли и известны как метеориты.

То обстоятельство, что Земля движется по орбите вокруг Солнца, а ось вращения Земли занимает наклонное положение, приводит к постепенному изменению относительного расположения Солнца и, следовательно, к смене времен года на Земле.

Гравитационное притяжение Луны, усиливаемое или ослабляемое притяжением Солнца, создает приливы и отливы в океанах, что связано с вращением твердой Земли под ними. Приливы и отливы возникают дважды за период в 24 ч 50 мин.

Химические свойства углерода, жидкое состояние воды и стабильное излучение солнечного тепла сделали возможным длительное существование и развитие жизни на Земле. Растения и животные играют важную роль в процессах выветривания горных пород, эрозии суши и накопления континентальных и морских осадков.

ВОПРОСЫ

1. Какие две силы или два источника энергии имеют первостепенное значение для стабильности Солнца и процессов денудации и осадконакопления на Земле?
2. Какая из этих сил наиболее важна для

возникновения приливов и отливов на Земле?

3. Перечислите виды тел, существующих в Солнечной системе.
4. Смена времен года на Земле связана с тем, что ось ее вращения на 23 1/2° отклоняется от перпендикуляра к эклиптике. Расскажите, как бы изменились времена года, если бы этот угол был равен а) 0° и б) 80°.
5. Какие факторы важны для существования жизни (в известном нам виде) на той или иной планете?
6. Предположим, что Земля внезапно оказалась на орбите Марса. Как это сказалось бы на климате Земли?
7. Что произошло бы с поверхностью Земли и с ее атмосферой, если бы Земля оказалась на орбите Меркурия?

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

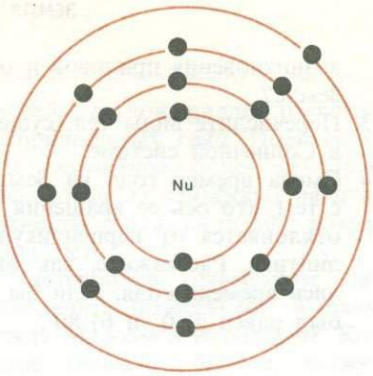
Baker R. H., Fredrick L. W., 1971, Astronomy, 9th ed., Van Nostrand Reinhold Company, New York.

Cole F. W., 1971, Fundamental Astronomy, John Wiley and Sons, Inc., New York.

Goldsmith D., 1976, The Universe. W. A. Benjamin, Inc., Menlo Park, Calif.

Press F., Siever R., 1974, Planet Earth (статьи из журнала Scientific American), W. H. Freeman and Company, San Francisco.

Scientific American, 1975, vol. 233 (статьи разных авторов).



3 ВЕЩЕСТВО И ЭНЕРГИЯ

Изучая Вселенную, ученые сочли удобным разделить все то, что можно измерить, на две большие группы. К одной категории относится материальное, т. е. то, что мы ощущаем как вещественное и конкретное; это – *вещество*. К другой категории относятся явления, которые не ощущаются столь же конкретно, как вещество, но не менее реальны; эти явления называются *энергией* . На рубеже нашего столетия ученые считали, что вещество (материя) и энергия четко разграничены. От такого представления отказались с развитием современной физической науки, которая доказала, что у того, что́ мы относим к энергии, с одной стороны, и к веществу, с другой – имеется много общих особенностей. Тем не менее для удобства целесообразно сохранить такое простое разделение на вещество и энергию, и особенно уместно оно в применении к геологическим наукам.

СТРОЕНИЕ ВЕЩЕСТВА

Атомы. Основными элементами вещества, будь то газ, жидкость или твердое вещество, являются атомы и частицы, на которые распадаются атомы. Атом – это наименьшая частица химического элемента, которая сохраняет все его химические

свойства. Хотя физики обнаружили множество частиц меньшего размера, чем атом, нас – для целей геологии – будут интересовать только три типа таких частиц: протоны, нейтроны и электроны. Эти частицы могут существовать порознь, как, например, в раскаленных звездах, или все вместе, как это наблюдается в атомах с упорядоченной структурой.

Строение атома. Каждый атом имеет один или больше электронов и ядро в центре, состоящее из протонов и нейтронов; исключение представляет атом обычного водорода, в ядре которого имеется только один протон. Электрон обладает единичным отрицательным электростатическим зарядом, протон – таким же положительным зарядом, а нейтрон нейтрален (не несет электрического заряда). Протоны и нейтроны имеют приблизительно равную массу, они более чем в 1800 раз тяжелее электронов. Следовательно, бóльшая часть массы атома приходится на ядро. Наличие протонов в ядре придает ему положительный заряд.

В простых атомах, например в атомах водорода и гелия, электроны вращаются на орбитах, или в электронных «оболочках», расположенных близко к ядру, а в более сложных атомах, в которых электронов намного больше, на разных расстояниях от ядра имеются дополнительные оболочки (рис. 3.1). На каждой электронной оболочке может находиться ограниченное число электронов: на первой может быть 2 электрона, на второй и последующих – по 8 электронов (рис. 3.2).

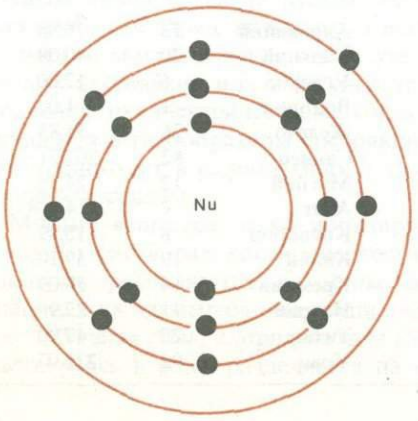


РИС. 3.1

Строение атома калия (K). Его порядковый номер 19, в ядре 19 протонов и 20 нейтронов, 2 электрона на первой электронной оболочке, 8 на второй, 8 на третьей, 1 на четвертой – всего 19 электронов, что соответствует числу протонов в ядре. В действительности орбиты электронов не располагаются ни с равными интервалами, ни в одной плоскости.

Атомный вес и порядковый атомный номер. Атомный вес химического элемента приблизительно равен общему числу протонов и нейтронов в ядре атома. Количество протонов в ядре увеличивается в соответствии с увеличением атомного веса. Водород, самый легкий элемент, имеет один протон, следующий за ним гелий – два, третий по весу элемент литий – три протона и т. д. В ядре лития, атомный вес которого 7, кроме трех протонов есть четыре нейтрона. Порядковый (атомный) номер химического элемента полностью зависит от количества протонов в ядре (табл. 3.1).

Таблица 3.1

Составные части атомов

Элемент	Порядковый номер	Количество протонов	Количество нейтронов	Количество электронов	Относительный атомный вес
Водород	1	1	0	1	1,008
Гелий	2	2	2	2	4,004
Литий	3	3	4	3	6,940
Бериллий	4	4	5	4	9,02
Бор	5	5	6	5	10,82
Углерод	6	6	6	6	12,00
Кислород	8	8	8	8	15,99

При точных измерениях атомных весов обнаружилось, что они не являются целыми числами; например, кислород тяжелее водорода в 15,872 раза. Исключи-

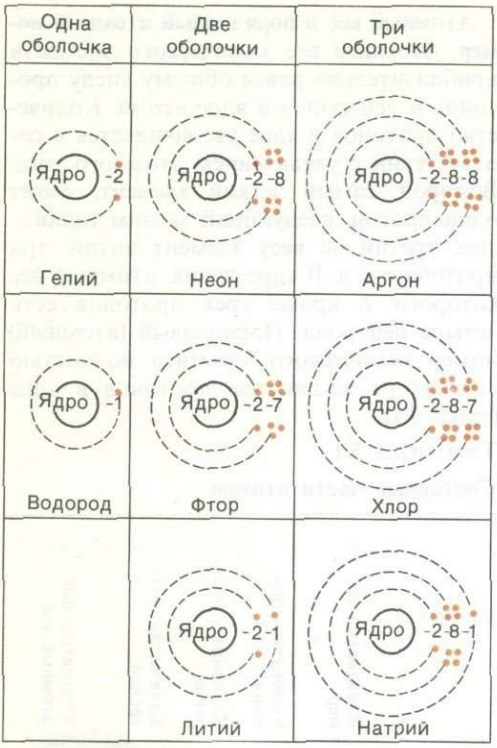


РИС. 3.2
Схематическое изображение электронных оболочек атомов некоторых элементов. Внешние оболочки атомов гелия, неона и аргона заполнены, других атомов не заполнены. У восьми электронов неодинаковые энергетические уровни; они образуют группы из 6 и 2 электронов с разными «квантовыми» числами, т. е. с разной энергией.

тельно для удобства химики договорились считать, что атомный вес самого распространенного в природе изотопа углерода (^{12}C) равен 12. Сравнивая вес других элементов с этой стандартной величиной, получаем, что атомный вес водорода равен 1,0080, кислорода 15,9994 и т. д.

Атомы различаются по размеру[1], и эти различия влияют на возможность замещения атомов в упорядоченной структуре кристаллов минералов.

Химические элементы. Установлено, что существует 105 химических элементов, причем 87 из них встречаются в природе. Остальные, полученные в лабораторных условиях, неустойчивы и почти сразу же распадаются. Здесь достаточно будет уделить внимание лишь немногим элементам. В табл. 3.2 приводятся сведения о 14 химических элементах, в том числе их на-

[1] Единица измерения атомов – ангстрем (одна стомиллионная доля сантиметра). Многие атомы имеют в диаметре 2 Å, из которых на ядро приходится менее 1%; почти все пространство занимают электроны.

Таблица 3.2
Некоторые химические элементы, важные для геологии

Химический символ	Название	Порядковый номер (количество протонов)	Атомный вес
Al	Алюминий	13	26,98
Ca	Кальций	20	40,08
C	Углерод	6	12,00
H	Водород	1	1,008
Fe	Железо	26	55,85
Pb	Свинец	82	207,21
Mg	Магний	12	24,32
N	Азот	7	14,008
O	Кислород	8	15,99
K	Калий	19	39,10
Si	Кремний	14	28,09
Na	Натрий	11	22,99
Ti	Титан	22	47,90
U	Уран	92	238,07

звания, химические символы, порядковый номер и атомный вес.

Изотопы. Изотопы – это атомы одного и того же химического элемента, имеющие разный атомный вес. Например, в 100 г природного хлора содержится 76 г хлора с атомным весом 34,98 (17 протонов и 18 нейтронов) и 24 г хлора с атомным весом 36,98 (17 протонов и 20 нейтронов). Эти различия в атомном весе обусловлены разным количеством нейтронов в ядрах; число протонов в ядрах изотопов одинаково. Средний вес этих двух разновидностей хлора, смешанных в пропорции 76 : 24, равен 35, 46, это число принято за атомный вес хлора. Существование изотопов и является причиной того, что атомные веса элементов представляют собой дробные величины.

Многие химические элементы имеют по нескольку изотопов. Так, у водорода 3 изотопа: без нейтронов, с одним нейтроном и с двумя нейтронами. Углерод, порядковый номер которого 6, имеет 5 изотопов: с 4, 5, 6, 7 и 8 нейтронами. *Как мы увидим позднее, некоторые изотопы используются при измерении геологического возраста.*

Ионы. Когда атом химического элемента теряет электрон с внешней оболочки или приобретает дополнительный электрон, его электростатическое равновесие нарушается. Например, если атом натрия теряет электрон, то он становится положительно заряженным, причем заряд его равен единице за счет избыточного протона в ядре. Точно так же если атом хлора приобретает электрон, то он становится отрицательно заряженным с зарядом, равным единице. Такие атомы, несущие электрический заряд, называются ионами. Элементы могут перейти в ионную форму при нагревании или в результате возбуждения их электричеством, когда они находятся в газообразном состоянии, как это происходит в радиолампах и трубках неоновых реклам.

Многие вещества легко ионизируются в водных растворах, когда химические соединения распадаются на ионы составляющих их элементов или групп элементов. Обычная соль, хлорид натрия (NaCl), *растворяясь в воде, разделяется на ионы* Na^+ и Cl^-. Такие ионы в растворе называются *электролитами*. Заряженные частицы в растворе диссоциируют и беспорядочно движутся в жидкости. Многие важные для геологии химические реакции зависят от поведения электролитов.

Химические соединения. Химические свойства атомов зависят от количества и расположения в них электронов. Химически самыми инертными являются те элементы, у которых на внешней оболочке находится 8 электронов, а химически наиболее активные элементы имеют на внешней оболочке от 1 до 7 электронов. Внешняя оболочка атома может быть укомплектована всеми восемью электронами за счет 1) заимствования электронов у других элементов, 2) передачи электронов или 3) того, что одним электроном совместно владеют атомы разных элементов. Например, на внешней оболочке атома натрия находится один электрон (рис. 3.1), а на внешней оболочке атома хлора – семь электронов. Оба атома обладают высокой химической активностью. *Если один электрон натрия становится* общим для атомов натрия и хлора, то каждый атом имеет устойчивую группу из восьми электронов на внешней оболочке, и оба атома связаны друг с другом, образуя хлорид натрия, хорошо известный как каменная соль (рис. 3.3).

Молекулы. Молекула – это наименьшая часть химического элемента или соединения, по своим химическим свойствам тождественная веществу в целом. Посредством соответствующих действий молекулу можно разделить на составные части. С точки зрения химии молекулами являются, например, H_2 и O_2 (газы), H_2O (жидкая вода) и NaCl (соль в твердом состоянии).

Разное физическое состояние (газообразное, жидкое или твердое) вещества зависит от движения молекул – все дело в степени нагревания. В газах молекулы разделены большими расстояниями и быстро движутся взад и вперед. В жидкостях молекулы располагаются ближе друг к другу, но все еще обладают значительной свободой перемещения. *В твердых телах взаимное притяжение*

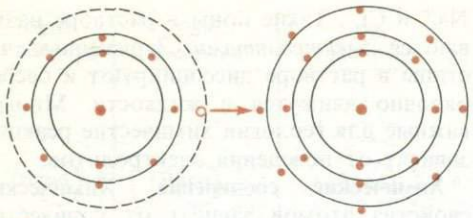


РИС. 3.3
Схематическое изображение атома натрия (слева), отдающего электрон атому хлора (справа); таким образом укомплектовывается до 8 электронов каждая из внешних электронных оболочек обоих этих ионов. Внешняя оболочка атома натрия с одним электроном аннулируется. В результате передачи электрона образуется положительно заряженный ион натрия (Na^+) и отрицательно заряженный ион хлора (Cl^-), которые затем объединяются со множеством других таких же ионов с образованием хлористого натрия, NaCl.

атомов достаточно велико для того, чтобы воспрепятствовать беспорядочному движению частиц.

Радиоактивность. Некоторые нестабильные химические элементы радиоактивны, т.е. самопроизвольно распадаются с образованием в качестве конечного продукта устойчивых химических элементов с менее сложной атомной структурой. Обычно этот процесс сопровождается испусканием субатомных частиц и выделением энергии, особенно тепловой. В результате изменяется число протонов и нейтронов в ядре, и, следовательно, один химический элемент превращается в другой.

Самые обычные радиоактивные элементы – это два изотопа урана (^{238}U и ^{235}U), торий, (^{232}Th), рубидий (^{87}Rb), изотоп калия (^{40}K) и один из изотопов углерода (^{14}C). У урана, в ядре которого содержится 92 протона, есть три природных изотопа с массой 234, 235 и 238 единиц соответственно. Таким образом, в ядре урана-238 имеется 146 нейтронов, в то время как в ядре расщепляющегося изотопа, урана-235, содержится 143 нейтрона, а в ядре урана-234 – только 142 нейтрона:

$$92 + 146 = 238$$

$$92 + 143 = 235$$

$$92 + 142 = 234$$

Один из изотопов урана (^{238}U), последовательно проходя несколько стадий, изменяется до радия (^{226}Ra). Радий в свою очередь, испуская ядра гелия (альфа-частицы с зарядом + 2) и гамма-излучение, превращается в нерадиоактивный изотоп свинца (^{206}Pb), который отличается от свинца, имеющего другое происхождение, атомным весом. Эти превращения происходят с характерной для каждого элемента постоянной скоростью и независимо от температуры, давления и химических условий окружающей среды.

ЭНЕРГИЯ

Энергия определяется по вызываемому ею изменению скорости или направления движения объекта, обладающего определенной массой. Другими словами, энергия – это способность совершать работу.

Энергия проявляется во множестве форм, переходящих одна в другую. К таким формам относятся тепловая энергия, энергия звука, электрическая, электромагнитная, гравитационная энергия, энергия упругого сжатия, химическая и ядерная. В одних случаях энергия является кинетической, в других – потенциальной. *Кинетическая энергия* – это энергия движения, которая проявляется в ветре, текущей воде, морских волнах, в падении обломков горных пород, в оползнях. *Потенциальная энергия* – это энергия, заключенная в объекте и обусловленная его положением относительно других материальных объектов. При движении, например при падении предмета, потенциальная энергия переходит в кинетическую. Порода, которая находится на горе, или скапливающаяся в водохранилище вода обладают потенциальной энергией, пропорциональной их высоте над уровнем моря.

Тепловая энергия. Тепло определяется

хаотическими колебаниями частиц в веществе. Температура объекта прямо пропорциональна средней величине кинетической энергии частиц, из которых он состоит. В твердом кристаллическом веществе, таком, как лед, молекулы занимают строго определенное положение в кристаллической решетке. Если температура льда повышается, молекулы приходят в возбужденное состояние и интенсивно колеблются в пределах геометрической кристаллической решетки. Когда температура достигает 0°С, колебания становятся столь сильными, что молекулам удается преодолеть электростатическое притяжение, которое удерживает их вместе, и лед в результате этого тает. После того как лед превратится в жидкую воду, дальнейшее прибавление тепловой энергии повышает температуру воды. При увеличении кинетической энергии вибрирующих молекул некоторые из них вырываются из жидкости и испаряются — происходит образование водяного пара. Если нагревание продолжается до температуры кипения (100°С), вся остальная жидкость превращается в водяной пар. При поддержании давления в замкнутом объеме температура пара может подняться намного выше обычной точки кипения воды, как, например, в кастрюле-скороварке, используемой для быстрого приготовления пищи. В природе такое влияние давления на температуру кипения наблюдается в гейзерах.

Тепло передается посредством *теплопроводности, конвекции* и *излучения*. Посредством теплопроводности тепло передается через газы, жидкости и твердые вещества за счет того, что энергия движения переходит от одной молекулы к соседней, движущейся медленнее (более холодной). Теплопроводность у разных веществ разная; металлы – хорошие проводники тепла, воздух и горные породы — плохие. Тем не менее из внутренних частей Земли к поверхности поступает заметное количество тепла.

При конвекции тепло переносится за счет циркуляции газов или жидкостей с разной плотностью, как, например в системах воздушного или водяного отопления. Конвекционный подъем легкого теплого воздуха и опускание сравнительно тяжелого холодного воздуха приводят к тому, что в атмосфере Земли возникают воздушные потоки и ветры, играющие большую роль в геологических процессах. Кроме того, известно, что конвекционный перенос тепла происходит в магматических очагах, связанных с деятельностью вулканов, и, как полагают, в нагретых до очень высокой температуры твердых веществах, но в этом случае крайне медленно. Изучение крупномасштабных движений литосферных плит Земли заставило предположить, что конвективные движения в мантии, возможно, являются той силой, которая вызывает перемещение плит.

При излучении тепло распространяется от любого относительно теплого предмета и передается более холодному при помощи электромагнитных волн определенной частоты, особенно хорошо через газы или вакуум, как в случае тепла, идущего от раскаленной печи или от Солнца. Тепло, которое Земля получает от Солнца, в свою очередь излучается ею в космическое пространство. Кроме того, излучение происходит и в твердых веществах, и если учесть, что температура в недрах Земли очень высока, то кажется вероятным, что бóльшая часть тепла из недр к поверхности передается посредством излучения электромагнитной энергии.

Электромагнитная энергия. Электромагнитная энергия – это энергия волн электромагнитного спектра, от коротковолновых высокочастотных гамма-лучей через видимый свет и тепловые волны до низкочастотных длинных радиоволн (рис. 3.4). Эти волны свободно проходят сквозь вакуум в виде порций энергии (квантов), но в различной степени перехватываются или поглощаются материальными объектами в соответствии с длиной волны и плотностью вещества. Все эти волны движутся со скоростью света. Для Земли главным источником электромагнитных волн является Солнце.

Энергия звука. Энергия звука – это форма кинетической энергии, которая распространяется за счет последовательной передачи толчка – импульса от одной мо-

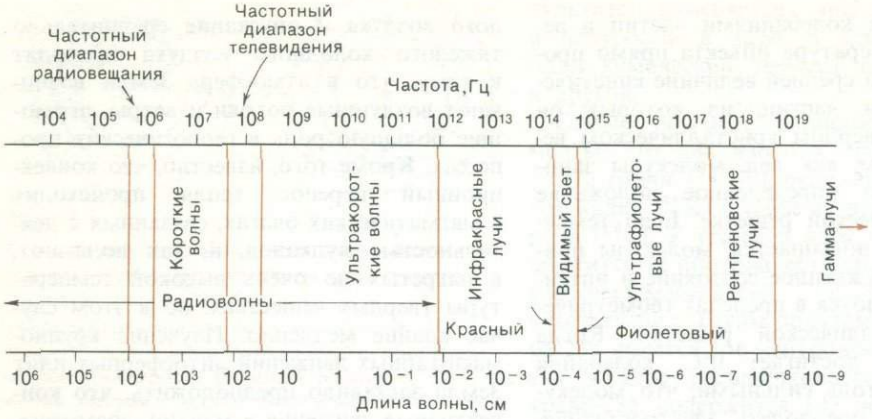


РИС. 3.4
Спектр электромагнитного излучения.

лекулы к другой по всему пути распространения, начиная с первичного импульса. Звуковые волны распространяются в газах, жидкостях и твердых веществах, но не проходят через вакуум. Звуки в слышимом диапазоне не играют в геологии большой роли, но низкочастотные колебания характерны для землетрясений. Скорость звуковых волн изменяется от небольших значений до нескольких километров в секунду, далеко не достигая скорости распространения света. Отраженные звуковые волны (эхо) используются для измерения глубины морских бассейнов, а маркированные во времени взрывы – для зондирования рыхлых отложений и твердых пород.

Электрическая энергия. Электрическая энергия представляет собой энергию, которая переносится потоком электронов, протонов или ионов через проводник или вакуум. Привычный нам электрический ток создается искусственно для удобства или по необходимости, но не имеет или почти не имеет аналогов в природе, за исключением молнии. Электрические токи, самопроизвольно возникающие в недрах Земли, все еще остаются загадкой.

Ядерная энергия. Ядерная энергия как источник энергии Солнца рассматривалась в гл. 2; она является результатом превращения вещества в энергию. Эта энергия передается Земле от Солнца через электромагнитное излучение. Более близким к нам источником ядерной энергии является естественная радиоактивность изотопов урана, тория и калия, которые при распаде превращаются в новые химические элементы с выделением тепла. Бóльшую часть внутреннего тепла Земли можно отнести за счет энергии, освободившейся при этом процессе ядерного распада. Ядерная энергия используется также в контролируемой форме для производства электроэнергии. В США действует более 70 атомных электростанций.

Гравитационная энергия. Гравитационная энергия обязана своим существованием взаимному притяжению всех материальных объектов друг к другу. Взаимное притяжение любых двух тел, как показывает изучение явлений инерции, прямо пропорционально произведению их масс и обратно пропорционально квадрату расстояния между ними. Каждому из нас хорошо известно влияние гравитационного поля Земли. Сила притяжения Земли является причиной веса тел и ускорения их при падении. Сила тяжести заставляет все продукты геологической эрозии неукоснительно перемещаться вниз.

Другие виды энергии. *Энергия упругого сжатия* – это форма потенциальной энергии, накапливающейся в упругом материале при его сжатии в условиях всестороннего давления. Примером может слу-

жить энергия газа, заключенного внутри вулкана и готового взорваться в результате расширения, если сдерживающая его преграда рухнет. В глубоких шахтах горные породы иногда раскалываются на мельчайшие обломки при представляющих большую опасность «горных взрывах». Точно так же вблизи разрывов породы подвергаются стрессу, до тех пор пока не будет достигнут предел их упругости, после чего породы разрушаются и происходит землетрясение.

Хорошо известна *химическая энергия*, содержащаяся в порохе, динамите и тротиле, в которых используется потенциально взрывчатая смесь химических ингредиентов. Энергия угля, природного газа и нефтепродуктов также относится к химической, но их горение (окисление) можно контролировать, получая при этом тепло и свет. В сущности, эти вещества представляют собой природные хранилища солнечной энергии.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ

Вещество состоит из атомов или субатомных частиц, из которых главными являются протоны, нейтроны и электроны. Протоны заряжены положительно, электроны – отрицательно, нейтроны не имеют заряда. Из протонов и нейтронов состоит атомное ядро, вокруг которого, на определенном расстоянии от него, вращается ограниченное число электронов, образуя так называемые электронные оболочки.

Количеством протонов и нейтронов в ядре определяется атомный вес элемента, а количеством протонов – его порядковый (атомный) номер. Восемьдесят семь природных элементов, встречающихся на Земле, имеют порядковые номера от 1 (водород) до 92 (уран). Лишь около дюжины элементов пользуются широким распространением.

Все элементы, например водород, углерод, хлор, уран, имеют разные изотопы, т.е. атомы с одинаковым количеством протонов (одинаковыми порядковыми номерами), но разным количеством нейтронов.

При нагревании, возбуждении электричеством или при растворении в воде атомы или группы атомов превращаются в ионы, приобретая или, наоборот, теряя электроны на внешней оболочке путем их захвата, передачи другим атомам или в результате совместного владения электронами.

Молекулы – это наименьшие частицы химического элемента или соединения, которые сохраняют все его химические свойства. Молекулами в зависимости от температуры (с которой связано молекулярное движение) могут быть образованы газообразные, жидкие или твердые вещества.

Радиоактивность – это самопроизвольный распад некоторых нестабильных элементов до более простых атомов в результате испускания образующих этот элемент частиц и выделения энергии, что наблюдается, например, в изотопах урана, тория, рубидия, калия и углерода.

Энергия в физическом смысле представляет собой способность производить работу; она проявляется в разных формах и может быть кинетической или потенциальной; это тепловая энергия, энергия звука, электрическая, электромагнитная, гравитационная энергия, энергия упругого сжатия, химическая и ядерная энергия. Внутриземная тепловая энергия, обусловленная радиоактивностью, так же как и другие виды тепловой энергии передаваемая путем теплопроводности, конвекции и излучения, имеет особенно большое значение для геологии наряду с неизбежным электромагнитным излучением, идущим от Солнца. Энергия звуковых волн выделяется при естественных и искусственных землетрясениях. Определенное место в геологии принадлежит также гравитационной энергии и энергии упругого сжатия.

ВОПРОСЫ

1. В чем различие между атомом и ионом одного и того же вещества?
2. По каким субатомным частицам определяется тип атома химического элемента?
3. Чем отличаются друг от друга атомы и молекулы?
4. Как измеряется энергия?
5. Перечислите типы энергии и расскажите, какое значение для геологии имеет каждый из них.
6. Рассмотрите взаимосвязь энергии и вещества. Можно ли создать энергию или она только сосредоточена в веществе?
7. Мы часто говорим об открытии новых источников энергии для будущего. Действительно ли это какой-то «новый» вид энергии во Вселенной или на Земле? Сравните ваш ответ с ответом на вопрос 6.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Freeman I. M., 1973, Physics: Principles and Insights, 2d ed., McGraw-Hill Book Company, New York.

Nechamkin H., 1968, The Chemistry of the Elements, McGraw-Hill Book Company, New York.

Orear J., 1967, Fundamental Physics, 2d ed., John Wiley and Sons, Inc., New York.

Sienko M. J., Plane R. A., 1974, Chemistry: Principles and Properties, 2d ed., McGraw-Hill Book Company, New York.



4 МИНЕРАЛЫ

Геологические преобразования вызываются физическим и химическим поведением вещества Земли в ответ на воздействие сил и факторов окружающей среды, к которым можно подходить как к геологическим, но в равной мере и как к физическим, химическим и биологическим в своей основе явлениям. Поэтому при изучении вещества, из которого состоит Земля, и происходящих в ней процессов приходится иметь дело с законами этих наук.

Изучение вещества Земли ведется в разном масштабе – от очень мелкого, соответствующего химическим элементам и их составным частям, до очень крупного, соответствующего континентальным массивам и плитам, вплоть до Земли в целом. Между этими крайними объектами геологи различают две важные группы образований: минералы и горные породы; последним будет посвящено несколько последующих глав.

МИНЕРАЛЫ

Минералы – это обособленные, обладающие кристаллической структурой частицы, которыми сложены почти все горные породы. Во многих типах горных

пород могут одновременно присутствовать несколько различных минералов, но порода может быть целиком образована и одним минералом, как, например, известняк или мрамор, состоящие из минерала кальцита. Значение минералов двоякое: во-первых, они позволяют классифицировать горные породы, во-вторых, указывают на условия их формирования.

Определение. Минерал – это природное неорганическое твердое вещество с кристаллической структурой, состоящее либо из одного элемента, либо из закономерного сочетания элементов и обладающее характерными физическими свойствами. Материалы искусственного или органического происхождения отсюда исключаются, а опал, ряд глинистых минералов и некоторые гидроокислы, не имеющие кристаллической структуры, представляют собой исключение.

Из данного определения минерала вытекает необходимость рассмотреть следующие вопросы:

1) химические соединения и типы химических связей;

2) кристаллическая структура и кристаллы;

3) физические свойства.

Химические связи. Рассматривая атомы, мы говорили о протонах, нейтронах и электронах. Число протонов в атоме определяет изотоп элемента и отчасти степень устойчивости атома. Роль электронов обусловлена их расположением на периферии атома. Здесь они выполняют роль контактов между соседними атомами и могут либо вызывать отталкивание атомов друг от друга, либо связывать их химическими связями. Если масса ядра может лишь слабо влиять на силу химической связи, то само наличие связи обусловливается электронами и характером их распределения вокруг атома. Характер распределения электронов определяет способность атома захватывать или отдавать электроны и тем самым ионизироваться. В зависимости от особенностей взаимного расположения соседних атомов различают четыре главных типа химических связей: *металлическую, ковалентную, ионную* и *вандерваальсовую.*

Металлическая связь. При металлической связи соседние атомы легко отдают один или больше электронов, но сами не способны к захвату добавочных электронов. Это приводит к тому, что положительно заряженные ионы оказываются в окружении свободных электронов; последние обладают высокой подвижностью, и это обеспечивает общую электрическую нейтральность атома. Как показывает название, эта связь встречается почти исключительно у металлов, таких, как золото, серебро, медь и др. Поскольку атомы металлов жестко не скреплены друг с другом, а удерживаются вместе лишь за счет электронной «склейки», металлы легко поддаются обработке и поэтому характеризуются как ковкие, гибкие и режущиеся.

Ковалентная связь. Ковалентная связь существует между атомами, которые с трудом отдают электроны, но могут легко захватывать один или больше электронов. При ковалентной связи электроны соседних атомов являются общими, так что по сути дела каждый атом приобретает один или больше дополнительных электронов и укомплектовывает свою внешнюю электронную оболочку. Показанные на рис. 4.1, *а* атомы углерода с 4 электронами на внешней оболочке и два атома кислорода с 6 электронами на внешних оболочках имеют по 2 общих электрона каждый. Общие электронные оболочки углерода и кислорода дополнены таким образом до 8. Такое сочетание дает более устойчивое соединение, чем углерод и кислород в своих элементарных формах, а именно двуокись углерода (CO_2) (рис. 4.1, *б*). Кристаллы двуокиси углерода (сухой лед) состоят из упорядоченно расположенных отдельных молекул. При переходе сухого льда в газообразное состояние упорядоченное расположение молекул нарушается, и они в беспорядочном движении рассеиваются в воздухе. Температура Земли слишком высока для образования кристаллов CO_2 естественным путем, но газообразная двуокись углерода имеется в воздухе, откуда она извлекается растениями и поглощается при некоторых геологических явлениях.

Примером соединения с ковалентной

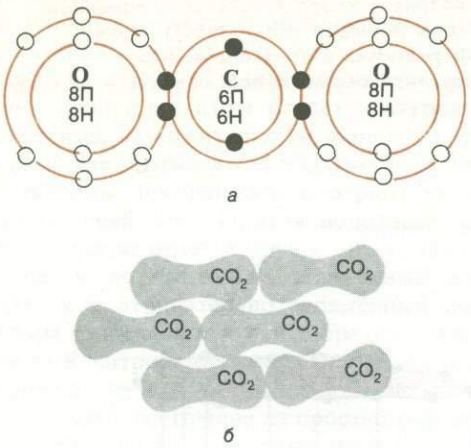


РИС. 4.1

Образование молекулы двуокиси углерода. *а* – как общие на рисунке изображены некоторые фиксированные электроны каждого отдельного атома; в действительности, однако, общими оказываются любые без различия электроны внешних оболочек; *б* – в твердых кристаллах двуокиси углерода отдельные молекулы расположены упорядоченно.

связью, имеющего более важное значение, чем CO_2, может служить дигидроген кислорода, или, попросту, вода. Вода – самая важная жидкость на земной поверхности; она участвует в различных важных геологических процессах. В молекуле H_2O с ковалентной связью (рис. 4.2, *а*) единственный электрон каждого из двух атомов водорода одновременно принадлежит одному атому кислорода, вследствие чего эффективно заполняются внешние оболочки всех трех атомов. Атомы водорода расположены симметрично вокруг атома кислорода. И хотя в целом молекула электрически уравновешена, пространственное расположение таково, что один край молекулы несет слабый положительный, а другой — равный ему отрицательный заряд (рис. 4.2, *б*). В результате этого молекула воды обладает электростатической полярностью, которая влияет на свойства воды как растворителя при геологических процессах.

Так как при ковалентной связи электроны прочно закреплены, она является, безусловно, ориентированной. Это сообщает многим твердым веществам с ковалентной связью жесткость, а также бóльшую прочность и твердость, чем у большинства чистых металлов. Прочное закрепление электронов приводит также к тому, что материалы с ковалентной связью обычно являются плохими проводниками электричества.

Ионная связь. Эта связь возникает между атомом, легко отдающим один или больше электронов и малоспособным

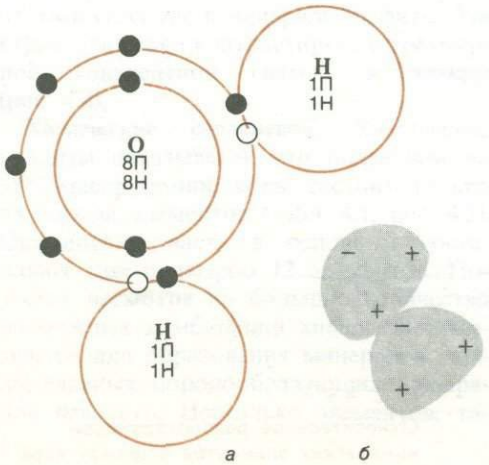


РИС. 4.2

Строение молекулы воды. *а* – электроны внешней оболочки кислорода дополнены единственными электронами (полые кружки) каждого из двух атомов водорода; *б* – молекулы жидкой воды поляризуются, что объясняется слегка неуравновешенным расположением электростатических зарядов протонов и электронов.

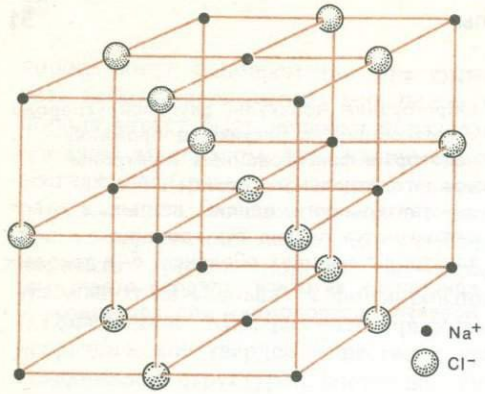


РИС. 4.3

Схема, показывающая расположение ионов натрия и хлора в кристалле каменной соли (минерал галит, NaCl). Ионы чередуются в трех плоскостях, ориентированных под прямым углом друг к другу.

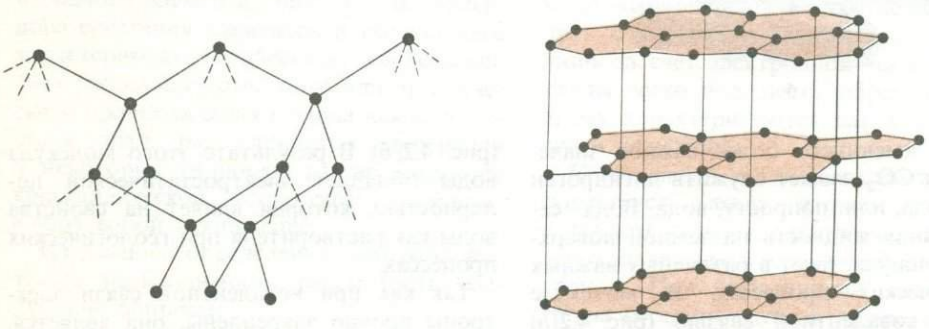


РИС. 4.4

а – кристаллическая решетка алмаза. Каждый атом углерода связан с четырьмя другими сильной ковалентной связью, которая обеспечивает исключительно высокую твердость алмаза (10). Компактной тетрагональной структурой объясняется высокий удельный вес алмаза (3,5). Из-за отсутствия свободных электронов алмаз является диэлектриком; *б* – кристаллическая решетка графита. Атомы углерода располагаются слоями, состоящими из гексагональных колец; каждый атом в слое ковалентно связан с тремя другими; между слоями связь слабая. Благодаря такого рода слоистой структуре графит обладает листоватой спайностью, твердостью 1–2 и удельным весом всего 2,2. Наличие относительно свободного электрона в каждом атоме делает графит хорошим проводником электричества.



РИС. 4.5

Относительное распространение химических элементов в земной коре.

к захвату дополнительных электронов, и атомом, который обладает высокой способностью к захвату электронов и нелегко их отдает. Следовательно, при ионной связи один атом отдает электроны, становясь положительным ионом, в то время как другой атом подхватывает эти электроны, превращаясь в отрицательно заряженный ион. Противоположные заряды притягиваются друг к другу; таким образом положительно заряженный ион натрия и отрицательно заряженный ион хлора притягиваются и образуют хлористый натрий (рис. 4.3). При этом, как правило, не возникают отдельные молекулы NaCl, состоящие из простых пар ионов Na^+ и Cl^-, а многочисленные ионы объединяются в упорядоченную систему и образуют пространственную решетку галита, в которой каждый ион натрия окружен шестью ионами хлора и каждый ион хлора в свою очередь окружен шестью ионами натрия (рис. 4.3). Соединение электростатически нейтрально; все положительные и отрицательные заряды взаимно компенсированы.

И опять-таки, поскольку электроны жестко закреплены, вещества с ионной связью в основном плохие проводники электричества. А жесткая решетка большинства материалов с ионной связью делает их относительно хрупкими по сравнению с металлическими соединениями.

Вандерваальсова связь. Вандерваальсова связь – это слабая электростатическая связь, которая может существовать между атомами или молекулами, например между ковалентно связанными слоями атомов углерода в минерале графите. Эта структура резко контрастирует с трехмерной ковалентной связью в алмазе (рис. 4.4).

Химические соединения. Химические анализы показывают, что более чем на 98% масса земной коры состоит только из восьми элементов (табл. 4.1, рис. 4.5). Оставшуюся часть в основном составляют еще примерно 12 элементов. Поэтому, несмотря на большое количество возможных комбинаций химических элементов для образования минералов, число главных породообразующих минералов невелико. Несколько элементов, таких, как золото, серебро, медь, сера, платина, углерод в форме графита и алмаза, могут встречаться в чистом виде, но большинство элементов встречается в виде химических соединений. Так как содержание кислорода в земной коре составляет по весу около 47%, химические соединения с ним других элементов должны быть и являются на самом деле наиболее обычными. Кремний и алюминий, занимающие второе и третье места, обеспечивают образование силикатных минералов. Силикаты – это соединения кремния и кислорода с другими элементами, такими, как алюминий, натрий, калий, железо и магний. Они образуют самую крупную группу минералов, как это видно из табл. 4.2.

Другие минеральные соединения вклю-

Таблица 4.1

Химический состав земной коры

Элемент	Символ	Вес. %
Кислород	O	46,60
Кремний	Si	27,72
Алюминий	Al	8,13
Железо	Fe	5,00
Кальций	Ca	3,63
Натрий	Na	2,83
Калий	K	2,59
Магний	Mg	2,09
Всего		98,59
Титан	Ti	0,440
Водород	H	0,140
Фосфор	P	0,118
Марганец	Mn	0,100
Фтор	F	0,070
Сера	S	0,052
Стронций	Sr	0,045
Барий	Ba	0,040
Углерод	C	0,032
Хлор	Cl	0,020
Остальные		0,353
Всего		100,000

[1] По данным Б. Мейсона: *B. Mason*, Principles of Geochemistry, New York: John Wiley and Sons, Inc., 1950.

Таблица 4.2

Наиболее распространенные породообразующие силикатные минералы

Нежелезомагнезиальные (сиалические), светлоокрашенные	Состав
Кварц	SiO_2
Плагиоклаз (полевой шпат)	$NaAlSi_3O_8 — CaAl_2Si_2O_8$
Ортоклаз (полевой шпат)	$KAlSi_3O_8$
Микроклин (полевой шпат)	$KAlSi_3O_8$
Мусковит (слюда)	$KAl_3Si_3O_{10}(OH)_2$
Железомагнезиальные (мафические), темноцветные или зеленые	
Ортопироксен (гиперстен)	$(Mg, Fe)SiO_3$
Клинопироксен (авгит)	$Ca(Mg, Fe)Si_2O_6$
Амфибол (роговая обманка)	$Ca_2(Mg, Fe)_5Si_8O_{22}(OH)_2$
Биотит (слюда)	$K(Mg, Fe)_3AlSi_3O_{10}(OH)$
Оливин	$(Mg, Fe)_2SiO_4$

чают карбонаты (CO_3^{2-}), сульфиды (S^{2-}), сульфаты (SO_4^{2-}), хлориды (Cl^-), фосфаты (PO_4^{2-}), гидроксиды (OH^-), нитраты (NO_3^-) и бораты (BO_3^-).

Постоянство состава. С помощью химических анализов установлено, что химический состав каждого минерального соединения может быть выражен химической формулой. Например, минерал галит (обычная столовая соль) имеет формулу NaCl. Эта формула остается в силе независимо от количества галита; его химический состав постоянен – один ион натрия на один ион хлора. (Ионом называют атом или группу атомов, электростатически заряженную благодаря потере или захвату одного или более электронов; при потере электрона возникает положительный заряд, избыточный электрон дает отрицательный заряд.)

Кристаллическая структура. Чтобы получить представление о кристаллической структуре, рассмотрим минерал галит (рис. 4.6). Сразу же бросается в глаза, что в образце галита все грани квадратные и углы прямые. Иными словами, три плоскости пересекаются у него под прямыми углами. Типичный образец галита обычно бесцветный или прозрачный, хотя встречаются белые, розовые, красные, голубые, зеленые и серые разности. Поверхность галита либо имеет стеклянный блеск, либо тусклая; удельный вес 2,1–2,3; минерал раскалывается на прямоугольные пластины. Состав галита – NaCl (хлористый натрий). В нем содержится одинаковое количество ионов натрия и хлора. Зададимся вопросом: как эти ионы расположены?

Ответ можно получить при исследовании в рентгеновских лучах. Фон Лауэ (1879–1959) и Рентген (1845–1923) предположили, что если рентгеновские лучи подобны световым лучам (за исключением очень маленькой длины волн), то они должны испытывать дифракцию и обнаруживать интерференцию (т. е. увеличение или уменьшение интенсивности в зависимости от того, совпадают или не совпадают фазы колебаний) при прохождении через кристалл. Проведенные рентгеновские испытания сфалерита (ZnS), галита и других минералов сразу же принесли успех. Упомянутые физики обнаружили, что при проецировании дифрагирующих в образце галита рентгеновских лучей на фотопластинку наблюдается симметричное расположение пятен, ныне известное как лауэграмма (рис. 4.7). Особенности расположения и интервалы дифракции в этой симметричной картине, полученной для галита, свидетельствуют о размещении ионов в трех ортогонально ориентированных относительно друг друга плоскостях. Ионы натрия и хлора чередуются в каждой из трех плоскостей, образуя так называемую *кристаллическую решетку* (рис. 4.3).

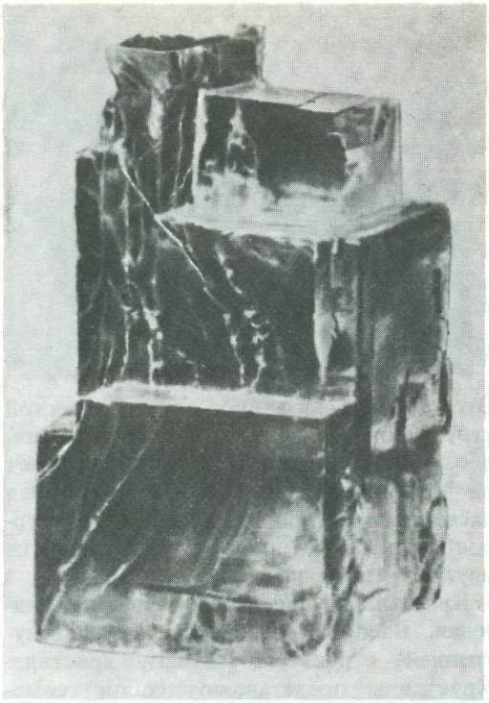


РИС. 4.6
Образец кристаллического галита (хлористого натрия) с хорошо выраженной спайностью по кубу. (Фотография Института естественных наук Уорда.)

Метод Лауэ, однако, применим не ко всем минералам, поэтому используются также другие рентгеновские методы. В методе вращения монокристалла последний медленно поворачивают вокруг одной из структурных осей, и дифракционные пятна располагаются на фотопленке параллельными рядами. При применении метода порошка получаемая дифракционная картина состоит из линий на фотопленке. Расположение и толщина линий зависят от типа кристаллической решетки исследуемого минерала.

Еще в одном рентгеновском методе применяется дифрактометр, с помощью которого на бумаге записывается вели-

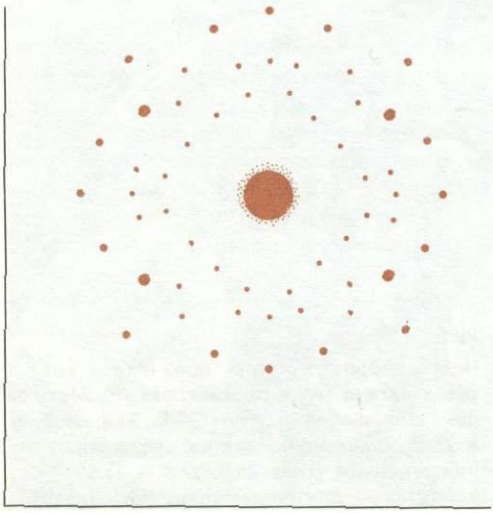


РИС. 4.7
Лауэграмма (по фотографии), показывающая четырехстороннюю *симметрию, полученную при преломлении* рентгеновских лучей в кубической решетке *галита.*

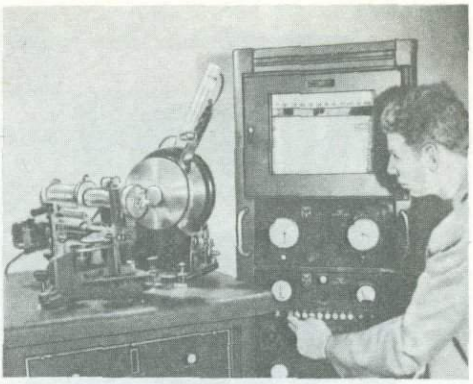


РИС. 4.8
Исследование минералов с помощью рентгеновского спектрографа.

чина дифракции, возникающей при медленном повороте на известные углы тонкого порошка минерала, исследуемого в рентгеновских лучах (рис. 4.8). Данные о внутренней рефракции поступают на счетчик и на записывающее устройство. Пики значений в этом случае аналогичны линиям в методе порошка; они соответствуют значениям углов, характерных для того или иного минерала (рис. 4.9).

Сейчас известна атомная структура сотен минералов. За редкими исключениями, атомы или группы атомов располагаются строго упорядоченно, с правильным чередованием, подчиняясь одному из многих математически возможных способов пространственной группировки. Это свойство, названное кристаллической структурой минералов, является их наиболее характерной чертой. Оно влияет на форму кристаллов, на то, как минерал раскалывается при разрушении, на твердость, удельную проводимость и многие другие физические свойства.

Кристаллы и кристаллографические сингонии. Внешним выражением этой внутренней структуры служит кристалл. Кристаллы представляют собой геометрически правильные твердые тела, ограниченные естественными плоскими поверхностями, или гранями (рис. 4.10–4.13). В их внешней форме отражена внутренняя кристаллическая структура. Изучение форм, образуемых гранями кристаллов,

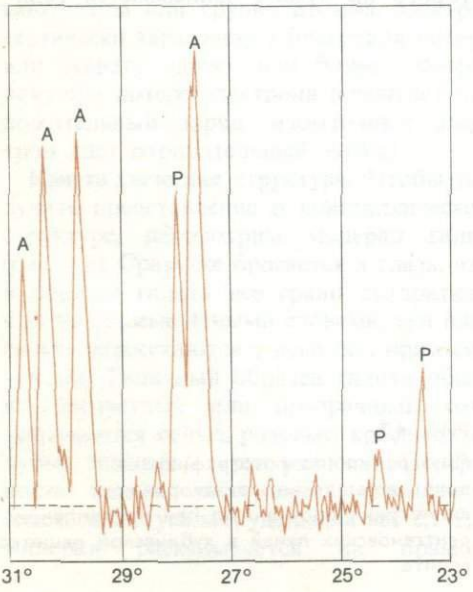
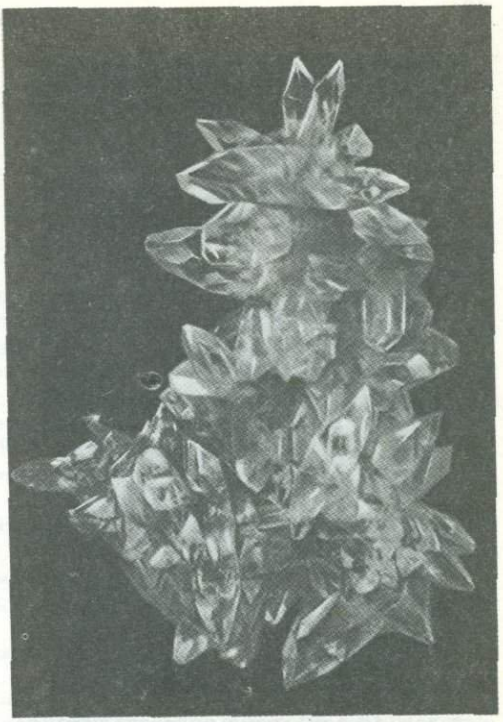


РИС. 4.9
Часть дифрактограммы, полученной для смеси авгита (A) и плагиоклаза (P). Четыре пика при значении углов 30,8, 30,3, 29,8 и 27,6° характерны для авгита, пики при значении углов 28,0, 24,4 и 23,6° характерны для плагиоклаза (битовнита).

РИС. 4.10

Бесцветные гексагональные кристаллы минерала «собачий клык» (разновидность кальцита). (Фотография Института естественных наук Уорда.)



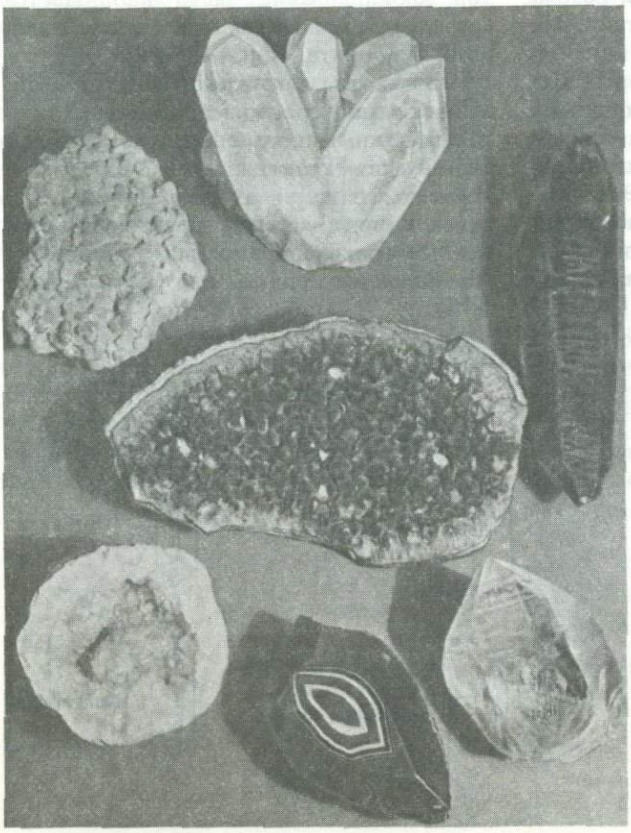


РИС. 4.11

Разновидности кварца. Вверху – друза бесцветных гексагональных кристаллов с *пирамидальными* верхушками, в центре – аметист, справа – кристалл дымчатого кварца, затем турмалинизированный горный хрусталь, агат (полосчатый), жеода кварца, гроздевидный халцедон. (Фотография Института естественных наук Уорда.)



РИС. 4.12
Кубические кристаллы галенита (сульфида свинца), наиболее важной свинцовой руды. (Фотография Института естественных наук Уорда).

и углов между гранями позволило создать классификацию кристаллов, разбив их на шесть сингоний (табл. 4.3, рис. 4.13).

Кристаллы-двойники. У некоторых минералов форма кристаллов и процесс их роста обнаруживают интересную особенность. В некоторых случаях два или больше кристаллов одного и того же минерала прорастают друг друга в определенной геометрической позиции; в результате образуются сдвойникованные кристаллы. Среди наиболее обычных минералов двойникование часто наблюдается у ортоклаза (рис. 4.14), плагиоклаза, кальцита, флюорита, гипса, пирита.

У плагиоклаза тонкие пластинки двойникуются поочередно то одними, то противоположными сторонами так, что наклон узких краев пластин чередуется. Из-за этого на краях появляется штриховка в виде системы близко расположенных тонких параллельных линий, напоминающих линованную бумагу или

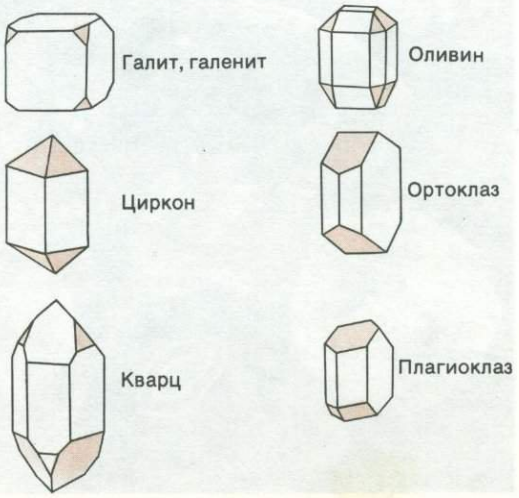


РИС. 4.13
Характерные кристаллы кубической, тетрагональной, гексагональной, ромбической, моноклинной и триклинной сингоний.

Таблица 4.3
Кристаллографические сингонии

Сингония	Характерные особенности	Типичные минералы
Кубическая	Три оси одинаковой длины, пересекающиеся под прямыми углами	Галит, галенит, флюорит, пирит, гранат, алмаз
Тетрагональная	Три взаимно перпендикулярные оси, из которых только две имеют одинаковую длину	Циркон, халькопирит
Гексагональная	Три равные оси в одной плоскости, пересекающиеся под углом 120°, и четвертая ось, перпендикулярная этой плоскости	Кварц, кальцит, турмалин
Ромбическая	Три оси неравной длины, пересекающиеся под прямыми углами	Барит, самородная сера, топаз, гиперстен
Моноклинная	Три неравные оси, из которых две перпендикулярны друг другу, а третья наклонена	Гипс, ортоклаз, авгит, роговая обманка
Триклинная	Три неравные оси, расположенные наклонно друг к другу	Плагиоклаз

края листов на обрезе книги. Под микроскопом у сдвойникованного плагиоклаза видно чередование светлых и темных полос (рис. 4.15).

Скопления кристаллов. Комбинации кристаллов определяют характерные структуры горных пород. Породы, сложенные многочисленными мелкими неориентированными кристаллами, имеют массивный облик. Другое распределение кристаллов создает волокнистую (как у алебастра, рис. 4.16), перистую, радиально-лучистую, слоистую, столбчатую, концентрическую, конкреционную («лукообразную»), дендритовидную (ветвистую) и другие виды структур.

Строение силикатов и кварца. Элементарным строительным блоком в силикатных минералах служит кремнекислородный тетраэдр, в котором атом кремния окружен четырьмя атомами кислорода. Этот блок с четырьмя отрицательными ионными зарядами дает пять типов комбинаций (табл. 4.4). Каждая такая комбинация, обладающая своей внутренней организацией, влияет на такие физические свойства, как геометрическая форма кристалла и характер спайности. Хорошим примером могут служить оливин и слюды. Оливин образован блоком SiO_4^{4-}, связанным с железом и магнием (Fe^{2+}, Mg^{2+}). Слюды образованы тетраэдрами SiO_4^{4-}, объединенными в листы или слои, которые связаны между собой калием (K^+), магнием (Mg^{2+}) или железом (Fe^{2+}). Связь между слоями слабее, чем внутри слоев, что благоприятствует проявлению в слюдах спайности по уже готовым плоскостям.

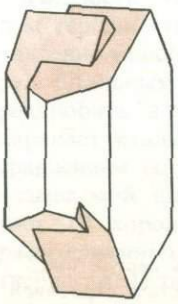


РИС. 4.14
Частично проросший двойник ортоклаза. Ср. с кристаллом на рис. 4.13.

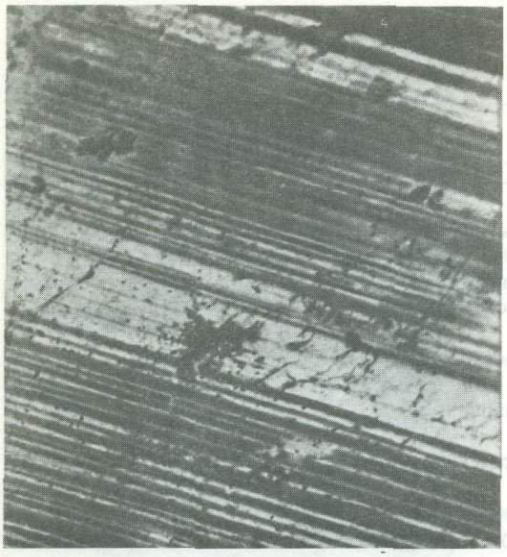


РИС. 4.15
Полисинтетическое двойникование плагиоклаза под микроскопом. (Фотография Геологической службы Канады.)

Решетка кварца, напротив, сложена исключительно молекулами SiO_2, не несущими свободного электростатического заряда; поэтому по всем направлениям его трехмерного каркаса связи оказываются относительно сильными. И соответственно у него отсутствует сколько-нибудь выраженная спайность, а вместо этого возникает лишь волнистый или зазубренный излом. Кварц обладает также большой твердостью.

Таблица 4.4
Структура силикатных минералов и кварца

Минерал	Кристаллическая структура
Оливин	Единичные тетраэдры SiO_4^{4-}
Пироксен (авгит)	Единичные цепи тетраэдров
Амфибол (роговая обманка)	Двойные цепи тетраэдров
Слюды (биотит, мусковит)	Листовая
Полевые шпаты (ортоклаз, плагиоклаз)	Бесконечный трехмерный каркас
Кварц	Бесконечный трехмерный каркас молекул SiO_2

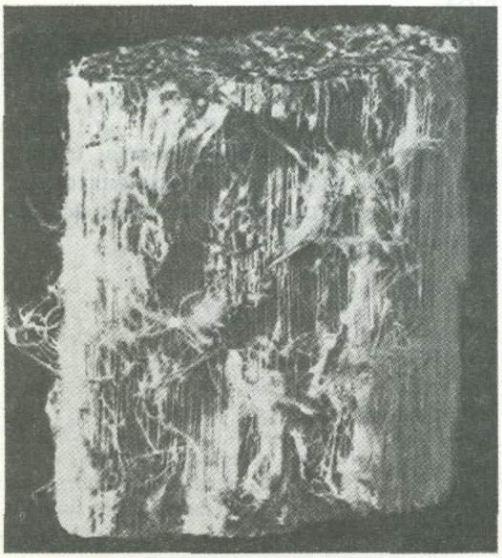


РИС. 4.16
Асбест – разновидность серпентина, обладающая волокнистым строением.

ФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА МИНЕРАЛОВ

К физическим свойствам, используемым для быстрого определения минералов, относятся *твердость, спайность, излом, цвет, блеск, цвет черты, удельный вес.* Другие свойства, такие, как *магнитность, растворимость* (в воде или кислотах), *прочность, вкус, ощущение на ощупь, запах, общий облик (габитус) кристаллов,* также используются, но более ограниченно. Знание физических свойств позволяет определять многие минералы на глаз или после простого физического или химического исследования.

Более точное определение возможно с применением поляризационного петрографического микроскопа. Для этого надо измельчить минерал до порошка или распилить его на очень тонкие прозрачные пластинки, положить их на предметное стекло и пропустить через них поляризованный свет. В поляризованном свете колебания происходят в одной плоскости, перпендикулярной лучу. У каждого прозрачного минерала своя реакция на поляризованный свет. Изучение под микроскопом непрозрачных, опаковых минералов, таких, как сульфиды металлов, требует применения отраженного света.

В трудных случаях для определения минералов можно использовать 1) дифракцию рентгеновских лучей для выяснения кристаллической структуры, 2) спектральный анализ или другие специальные анализы для определения слагающих минерал химических элементов, 3) дифференциальный термический анализ для измерения температур, при которых в процессе нагревания происходят изменения, имеющие диагностическое значение.

Твердость. Применительно к минералам термин «твердость» означает сопротивление минерала царапанью (но не удару). Стальным молотком можно легко раздробить алмаз, однако алмаз легко царапает сталь. Твердость определяется сравнением со стандартной шкалой – так называемой шкалой Мооса. Она включает 10 хорошо известных минералов, расположенных в порядке увеличения твердости: 1) тальк, 2) гипс, 3) кальцит, 4) флюорит, 5) апатит, 6) ортоклаз, 7) кварц, 8) топаз, 9) сапфир, 10) алмаз.

Для определения твердости каждый может воспользоваться либо названными минералами, либо другими обычными предметами, такими, как ноготь (твердость 2,25), медный цент (3), нож (около 5), кусок оконного стекла (5,5). Относительную твердость неизвестного образца можно определить, выяснив, какой эталон оставляет на нем царапину и какой эталон он царапает сам. При этом надо быть внимательным, чтобы не принять за настоящую царапину след, оставляемый более мягким, легко истирающимся минералом. Твердость зависит от характера внутренней атомной связи и кристаллической структуры.

Спайность. Спайностью называется способность минерала раскалываться вдоль определенных направлений. Она обычно узнается по плоским поверхностям, возникающим при раскалывании минерала (рис. 4.17–4.19). Минералы могут иметь спайность по одному направлению (как у слюд), двум (ортоклаз, рис. 4.17; пироксен, роговая обманка, рис. 4.18) или трем направлениям (кальцит, рис. 4.19; галит, рис. 4.6) или не иметь ее вовсе (кварц). Следует также обращать внимание на число плоскостей спайности, углы между ними, степень совершенства спайности (весьма совершенная, совершенная, средняя, несовершенная). Спайность всегда направлена параллельно реальной или потенциально возможной грани кристалла, но наличие граней не всегда указывает на скрытую возможность проявления спайности. Минерал, лишенный спайности, может только ломаться.

Излом. При отсутствии спайности минералы раскалываются по неправильным поверхностям. Часть минералов на изломе выглядит наподобие разбитого стекла; это раковистый излом. У других минералов наблюдается шероховатый (зазубренный), волокнистый или занозистый излом.

Цвет. Цвет минерала зависит от того, какой длины во́лны отражаются от его

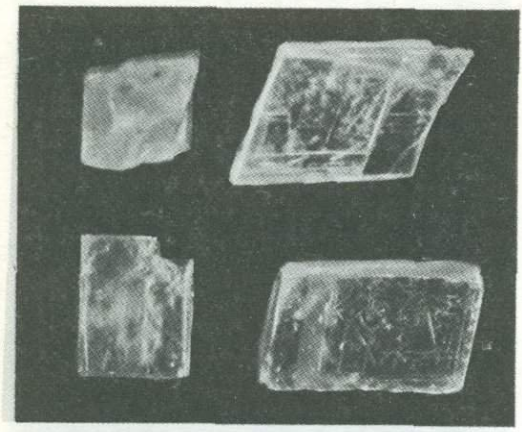


РИС. 4.17

Виды спайности. Вверху: ортоклаз – спайность по двум перпендикулярным направлениям, гипс – спайность весьма совершенная по одному, совершенная по другому и средняя по третьему направлению. Внизу: галит – спайность по кубу, кальцит – три косо пересекающихся (ромбоэдрических) направления спайности.

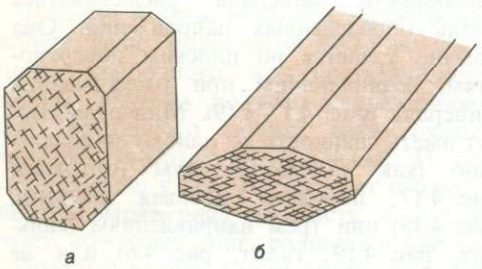


РИС. 4.18

Направление и углы спайности по отношению к форме кристаллов авгита (*а*) и роговой обманки (*б*).

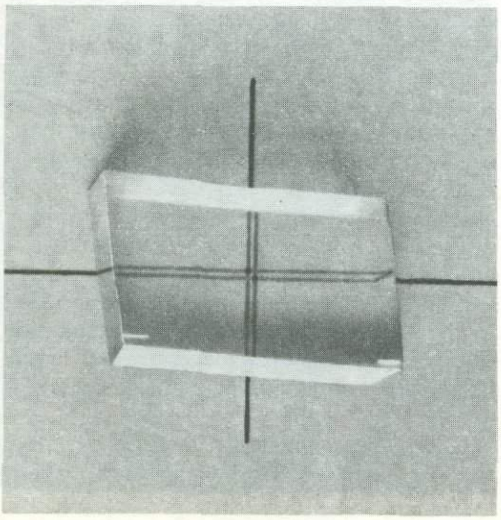


РИС. 4.19

Эффект двупреломления в пластине исландского шпата (разновидность кальцита), обладающего ромбоэдрической спайностью. Изображение пересекающихся в одной точке линий раздваивается вследствие разной скорости двух составляющих расщепленного луча. Это свойство позволяет использовать кальцитовые призмы в оптических инструментах. Двупреломление используется для определения многих минералов с помощью петрографического микроскопа. (По материалам Института естественных наук Уорда).

поверхности после поглощения волн другой длины. Многие минералы обычно белые или бесцветные, некоторые темно-зеленые или черные. Одни минералы, такие, как кварц, кальцит или галит, могут быть окрашены чуть ли не в любой цвет – белый, розовый, красный, голубой, фиолетовый, коричневый, желтый, зеленый, серый – благодаря присутствию посторонних элементов или нарушению атомной структуры. Другие минералы характеризуются лишь одним цветом, как, например, желтая самородная сера и медьсодержащий зеленый минерал малахит, или в крайнем случае обладают ограниченным набором цветов. Они обычно имеют характерные оттенки и легко могут быть узнаны.

Блеск. Блеск минерала является свойством его поверхности, как она видится при отражении от нее света. Блеск имеет градации от тусклого или землистого (как у глин), жирного, стеклянного, шелковистого до алмазного (как у алмаза) и металлического (как у пирита). Описываются также другие разновидности блеска, такие, как перламутровый, смоляной, полуметаллический.

Цвет черты. Черта – это цвет порошка минерала, полученного при растирании или царапании минералом по пластинке неглазурованного фарфора. Во многих случаях цвет черты менее подвержен вариациям и поэтому более надежен при определении минералов, чем цвет неповрежденного кристалла. В табл. 4.5 указан цвет черты некоторых минералов.

Удельный вес. Удельный вес минерала равен отношению его веса в воздухе к весу эквивалентного объема воды. Его легко вычислить, взвесив образец минерала сначала в воздухе, а затем в подвешенном состоянии в воде, с тем чтобы определить вес вытесненной им воды.

Удельный вес многих минералов колеблется в пределах от 2,5 до 3,3, и в обычной практике при взвешивании на руке чувствуется необычный вес лишь исключительно легких или очень тяжелых минералов. Необычно низкий удельный вес у графита (2,2). Минералы с высоким удельным весом всегда характеризуются высоким содержанием металла. Удельный вес пирита (FeS_2), например, колеблется от 4,9 до 5,2, галенита (PbS) – от 7,3 до 7,6, золота (Au) – от 16,0 до 19,0 (в зависимости от чистоты). Удельный вес представляет собой функцию химического состава минерала и, как показывают вышеприведенные примеры, упаковки атомов (плотной или свободной) во внутренней структуре.

Магнитность. Единственным минералом из числа достаточно распространенных, который обладает ясно выраженными магнитными свойствами, является магнетит (Fe_3O_4). Он обычно встречается в «черных песках» речных баров и океанских пляжей, в виде мелких зерен в кристаллических породах и в больших массах в ряде железорудных районов. Слабой магнитностью обладают и некоторые другие минералы.

Растворимость. Небольшое число минералов, например галит, легко растворяются в воде; большинство остальных или плохо растворимы, или совсем нерастворимы. Некоторые минералы растворяются в кислотах. В разбавленной соляной кислоте растворяется минерал кальцит ($CaCO_3$) с выделением пузырьков двуокиси углерода (CO_2).

Прочность. Прочность минерала соответствует силе его внутреннего сцепления. Большинство минералов хрупкие; они раскалываются с шумом. Селенит – одна из разновидностей гипса – гибкий, он сохраняет изгиб. Слюды – упругие или эластичные, они легко сгибаются, но затем распрямляются. Самородное золото, медь, серебро обладают ковкостью, их можно расплющить в тонкие листы.

Вкус, ощущение на ощупь, запах. Минералы могут быть солеными, кислыми, горькими; они бывают жирными и холодными на ощупь; могут иметь землистый запах.

Габитус кристаллов. Этот термин служит для обозначения обычной и характерной формы, в которой минерал, как правило, кристаллизуется. Например, у галита, как уже упоминалось выше, имеются три хорошо выраженные поверхности, пересекающиеся под прямыми углами (куб), магнетит кристаллизуется в форме октаэдров.

Таблица 4.5

Цвет черты в сравнении с цветом минерала

Минерал	Цвет минерала	Цвет черты
Кварц, кальцит, галит	Бесцветный или белый	Белый
Гематит	Красно-коричневый, черный, стальной (серый)	Красный (ржаво-красный)
Лимонит	Желто-коричневый, темно-коричневый, черный	Желто-коричневый
Пирит («золото дураков»)	Бледный латунно-желтый	Темно-зеленый
Сфалерит (цинковая руда)	Желтый до темно-коричневого	Светло-желтый

Выше отмечалось, что физические свойства минералов зависят от их внутренней кристаллической структуры и типа химической связи. Примером может служить отсутствие спайности у кварца, пластинчатое строение графита, контраст в твердости графита и алмаза, гексагональная форма снежинок, спайность слюд и полевых шпатов.

ИЗОМОРФНЫЕ СМЕСИ

Исключение из закона постоянства состава, устанавливаемого для большинства минералов, представляют изоморфные смеси. Они образуются при частичной подмене некоторых обычных компонентов минерала определенными, способными заместить их химическими элементами. Например, железо может заместить часть цинка в минерале сфалерите (сульфиде цинка – основной цинковой руде).

Наибольшее значение имеют изоморфные соединения силикатных минералов – плагиоклазов, оливина, амфиболов и пироксенов. Плагиоклазы образуют не-

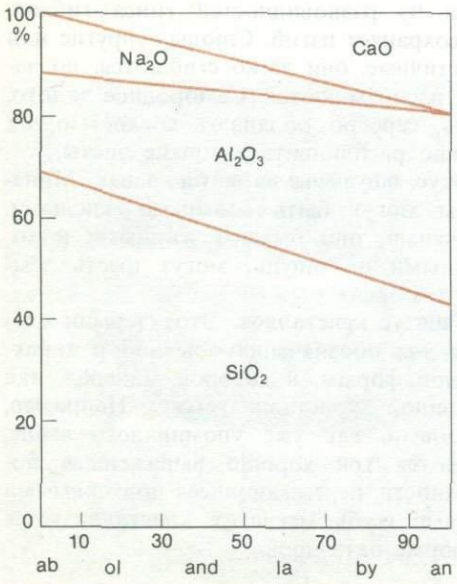


РИС. 4.20
Химический состав плагиоклазового ряда. ab – альбит, ol – олигоклаз, and – андезин, la – лабрадор, by – битовнит, an – анортит.

прерывный ряд минералов от натриевого альбита ($NaAlSi_3O_8$) до анортита с высоким содержанием кальция ($CaAl_2Si_2O_8$). Минералы этого ряда носят названия альбит, олигоклаз, андезин, лабрадор, битовнит, анортит. От альбита к анортиту возрастает содержание кальция и уменьшается содержание натрия (рис. 4.20). Содержания алюминия и кремния также меняются. В альбите содержится около 69% кремнезема, в анортите 43%, остальные минералы характеризуются промежуточными значениями.

В оливине, представляющем собой железомагниевый силикат $[(Mg, Fe)_2SiO_4]$, атомы железа и магния могут замещать друг друга в разных пропорциях. Замещение в широких пределах возможно у пироксенов и амфиболов (см. табл. 4.2).

Кальций, магний, двухвалентное железо и марганец замещают друг друга в гранате, так же как трехвалентный алюминий, трехвалентное железо и в какой-то степени хром.

По типу кристаллической структуры карбонатные минералы – кальцит ($CaCO_3$), доломит ($(Ca, Mg(CO_3)_2$), магнезит ($MgCO_3$) и сидерит ($FeCO_3$) – относятся к одной системе, однако изоморфизм между ними проявляется лишь в ограниченных пределах. Так, в кальците может находиться некоторое количество атомов магния или железа, но он не может последовательно переходить в доломит, магнезит или сидерит, так как различие в величине этих атомов не позволяет им свободно замещать друг друга в кристаллической решетке.

ПРОИСХОЖДЕНИЕ МИНЕРАЛОВ И ГОРНЫХ ПОРОД

Большинство минералов кристаллизуется из некоторых видов растворов. Они образуются в результате 1) остывания магмы (сложного раствора, состоящего из расплавленного материала горных пород в недрах Земли) или аналогичных ей растворов расплавленного вещества на земной поверхности, называемых лавой, 2) выделения из глубинных растворов, содержащих горячую воду или горячие газы, в том числе водяной пар, как в случае многих минеральных жил и руд металлов; 3) конденсации горячих паров при образовании минералов типа сублимационной серы вблизи жерл вулканов, 4) химических реакций с уже существующими минералами, как, например, при гидротермальном преобразовании полевого шпата в слюду или при окислении железосодержащих минералов в зоне химического выветривания у поверхности Земли, 5) замещения одного, более раннего минерала другим, 6) перекристаллизации ранее существовавших минералов с образованием новых соединений под влиянием изменившихся условий температуры и давления, 7) выпаривания водных растворов.

Большинство горных пород представляют собой агрегаты минералов. В зависимости от происхождения они разделяются на три главные группы: *магматические*, *осадочные* и *метаморфические*.

Магматические породы образуются при затвердевании магмы или лавы, зарождающейся в недрах Земли. Большинство осадочных пород образуется из продуктов выветривания более древних пород. Одни из них состоят из обломков и частиц этих пород, другие возникают при химическом осаждении, испарении соленой воды или накоплении органического материала. Метаморфические породы образуются в результате преобразования существовавших до этого осадочных или магматических пород под воздействием высокого давления, высокой температуры или химически активных растворов в недрах Земли.

Каждая из этих генетических групп горных пород (т.е. магматические, осадочные и метаморфические породы) подробно рассматривается в последующих главах.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ

Химические элементы – кислород, кремний, алюминий, железо, кальций, натрий, калий и магний – слагают более 98% земной коры. Эти и другие элементы объединяются в кристаллические соединения, или минералы. Кристаллы характеризуются строго закономерным расположением составляющих их атомов. Кристаллическая структура обусловливает физические свойства минералов. Силикатные минералы построены из тетраэдров SiO_4, соединенных друг с другом с помощью других элементов; кварц состоит только из молекул SiO_2. Химические элементы многих кристаллов связаны ионной или ковалентной связью.

Минералы определяются по цвету, блеску, спайности, излому, твердости, цвету черты, удельному весу, растворимости, магнитным свойствам, преломлению световых или рентгеновских лучей и с помощью других специальных методов исследования.

Наиболее распространенными породообразующими минералами являются полевые шпаты (ортоклаз, микроклин и плагиоклаз), кварц, пироксены, амфиболы, оливин и слюды (биотит и мусковит).

Большинство пород представляют собой агрегаты минералов; некоторые из них содержат стекло или органическое вещество. По происхождению горные породы делятся на магматические, осадочные и метаморфические.

ВОПРОСЫ

1. Перечислите типы частиц в атоме и объясните роль каждой из них.
2. Какие существуют типы химических связей и как они образуются?
3. Более 98% земной коры сложено восемью элементами. Назовите их в порядке значимости.
4. Исходя из предыдущего вопроса, объясните, почему силикатные минералы имеют наибольшее значение в земной коре.
5. В чем заключается значение кристаллической структуры минералов? При каких размерах структура играет важную роль?
6. Какие физические свойства позволяют быстро определять минералы?
7. Что такое изоморфные смеси?
8. Чем минералы отличаются от пород?

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Correns C. W., 1969, Introduction to Mineralogy, 2d ed., Springer-Verlag, Inc., New York.

Cox K. G., Price N. B., Harte B., 1974, An Introduction to the Practical Study of Crystal, Minerals, and Rocks, rev. 1st ed., John Wiley and Sons, Inc., New York.

Englich C. L., Jensen D. E., 1958, Getting Acquainted with Minerals, 2d ed., McGraw-Hill Book Company, New York.

Ernst W. G., 1969, Earth Materials, Prentice- Hall, Inc., Englewood Cliffs, N. J.

Frye K., 1974, Modern Mineralogy, Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs, N. J.

Hurlbut C. S., Jr., 1969, Minerals and Man, Random House, New York.

Hurlbut C. S., Jr., Klein C., 1977, Manual of Mineralogy, 19th ed., John Wiley and Sons, Inc., New York.

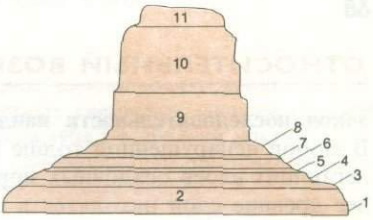
Mason B., Berry L. G., 1968, Elements of Mineralogy, W. H. Freeman and Company, San Francisco.

Pough F. H., 1955, A Field Guide to Rocks and Minerals, 2d ed., Houghton Mifflin Company, Boston.

Tennissen A. C., 1974, Nature of Earth Materials, Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs, N. J.

Turekian K. K., 1972, Chemistry of the Earth, Holt, Rinehart, and Winston, New York.

Vanders I., Kerr P. F., 1967, Mineral Recognition, John Wiley and Sons, Inc., New York.



5 ВОЗРАСТ ГОРНЫХ ПОРОД И ГЕОЛОГИЧЕСКОЕ ВРЕМЯ

По данным на сегодняшний день, возраст наиболее древних пород земного шара, определенный геохронометрическими методами, достигает примерно 3,8 млрд. лет. Многие метеориты датируются возрастом 4,55 млрд. лет. Как отмечалось в гл. 2, возраст некоторых лунных пород и метеоритов равен 4,7 млрд. лет, так что возраст Солнечной системы, включая Землю, может, вероятно, оцениваться в 5 млрд. лет. Земля настолько стара, что для геологов продолжительность геологического времени сравнима с огромной протяженностью пространства, установленной астрономами.

В практике полевых геологических работ изотопный возраст горных пород, выраженный в годах, часто меньше интересует исследователя, чем относительный возраст геологических тел, оцениваемый такими понятиями, как «моложе», «древнее», «одновременно». Этот возраст, устанавливаемый прямыми наблюдениями соотношения геологических тел в их естественном положении, будет рассмотрен нами в первую очередь.

ОТНОСИТЕЛЬНЫЙ ВОЗРАСТ ГОРНЫХ ПОРОД

Закон последовательности напластования. В любой ненарушенной толще полого залегающих слоев осадочных пород наиболее древние слои находятся в основании, а перекрывающие их слои вверх по разрезу становятся последовательно все моложе (рис. 5.1). Это правило остается в силе и для пород, смятых в складки, но в этом случае надо воссоздать первоначальное положение подошвы и кровли слоев по косой слоистости, знакам ряби или другим седиментационным признакам, особенно если слои стоят вертикально или даже, как это иногда бывает, перевернуты (т. е. при наклоне прошли через вертикальное положение). Закон остается в силе и для последовательности лавовых потоков и пород, залегающих над несогласием. Этот фундаментальный закон стратиграфии был установлен Стено в 1669 г.

Пальцевидное замещение. При прослеживании в поле линзовидных слоев часто наблюдается их пальцевидное проникание, которое может быть и многократным, в толщи иного состава (рис. 5.2). В таком случае и те, и другие слои имеют в принципе одинаковый возраст. Пальцевидное замещение легче всего возникает при наступании и отступании береговой линии.

Фациальные изменения. *В гл. 7 показано,* что осадочные породы изменяются по латерали за счет постепенного перехода от одного типа пород к другому, например от песчаников к глинам или от флювиальных красноцветов к морским песчаникам и глинам (рис. 5.3). Обе такие фации также являются одновозрастными.

Закон фаунистической (флористической) последовательности. Изучение окаменелостей показало, что формы растительного и животного мира, приспосабливаясь к окружающей среде, со временем прогрессивно развивались. В целом со временем они усложнялись. Многие организмы вымирали. Поэтому в базальных слоях мощных осадочных серий, как, например, в нижней части разреза, обнажающегося в стенках Большого каньона, содержатся сравнительно простые комплексы ископаемых, тогда как выше они становятся более разнообразными. С помощью детальных исследований установлено, что определенные комплексы ископаемых (фауны и флоры) характеризуют вполне определенные уровни стратиграфической колонки. Установив однажды относительный возраст ископаемых согласно закону о последовательности напластования, можно затем определить возраст осадочных пород на любом удалении путем сравнения, или корреляции, заключенных в них ископаемых. Короче говоря, ископаемые, первоначально датированные по породам в одном месте, сами используются для датировки других пород; Уильям Дженнингс Брайен на знаменитом процессе Скоупса в Теннесси назвал это «рассуждением по кругу». Вымершие организмы, такие, как трилобиты, динозавры, саблезубые тигры, характеризуют определенные ограниченные интервалы времени, на протяжении которых они существовали. Методом фаунистической последовательности возраст отложений лучше всего определяется на некоторой ограниченной площади, хотя этот метод может быть с надлежащей осторожностью применен также в межрегиональном и глобальном масштабах.

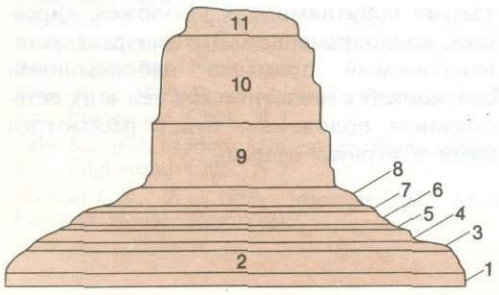


РИС. 5.1

Схематическая зарисовка слоистых пород в Моньюмент-Вэлли, шт. Аризона – Юта, иллюстрирующая закон последовательности напластования: породы становятся моложе от основания к кровле.

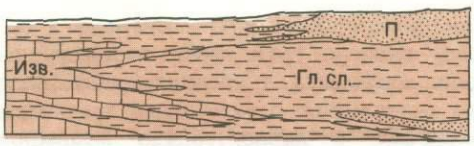


РИС. 5.2

Пальцевидное взаимопроникновение одновозрастных глинистых сланцев (Гл. сл.) и известняков (Изв.) в средней части рисунка и одновозрастных песчаников (П.) и глинистых сланцев вверху.

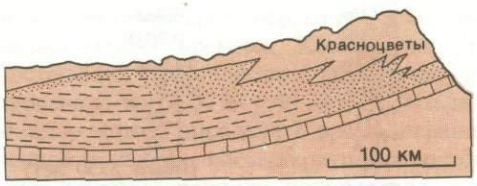


РИС. 5.3

Фациальные изменения в девонских породах шт. Нью-Йорк. Флювиальные красноцветные породы гор Катскилл (вверху справа) западнее переходят в одновозрастные с ними морские песчаники и глины, лежащие на более древних морских известняках.

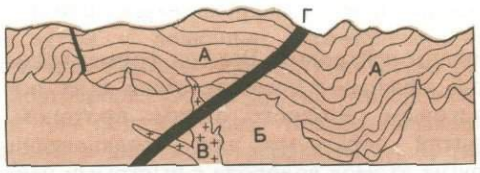


РИС. 5.4

Относительный возраст интрузивных пород. Смятые в складки и разбитые разрывами слои осадочных пород (А) прорваны магматическими породами (Б), которые некогда были расплавлены. В свою очередь породы Б прорваны интрузией В. Магматические породы, выходящие на поверхность (Г), пересекают все предыдущие породы. Последовательность образования пород А–Б–В–Г.

Интрузии магматических пород. Дайки и другие интрузивные породы, естественно, моложе тех пород, в которые они внедряются или которые они пересекают (рис. 5.4).

АБСОЛЮТНЫЙ ВОЗРАСТ ГОРНЫХ ПОРОД

Для определения возраста горных пород в годах применяется несколько различных геохронологических методов, основанных на явлении радиоактивного распада. При этом используются главным образом радиоактивные изотопы урана, тория, рубидия, калия, углерода и водорода – ^{238}U, ^{235}U, ^{232}Th, ^{87}Rb, ^{40}K, ^{14}C, ^{3}H. Для некоторых специальных целей применяются также многие другие изотопы; часть изотопов сейчас с этой точки зрения изучается, а существующие методы все время совершенствуются за счет введения новых приемов исследования.



РИС. 5.5

Кривая распада радиоактивных веществ, показывающая периоды полураспада.

Таблица 5.1

Радиоактивный распад

Материнский изотоп	Эмиссия[1]	Конечный продукт	Период полураспада, млрд. лет
^{238}U	8α + 6β + энергия	^{206}Pb	4,468
^{235}U	7α + 4β + энергия	^{207}Pb	0,7038
^{232}Th	6α + 4β + энергия	^{208}Pb	14,008
^{87}Rb	1β + незначительная энергия	^{87}Sr	48,8
^{40}K	(Захват электрона)	^{40}Ar	1,30
	(Бета-излучение)	^{40}Ca	1,30
^{14}C	(Бета-излучение)	^{14}N	(Всего 5730 лет)
^{3}H	1 нейтрон	^{2}H	(Всего 12,5 года)

[1] Альфа(α)-частица – ядро гелия, состоящее из 2 протонов и 1 нейтрона, бета(β)-частица – свободный электрон, обладающий большой скоростью.

Как было объяснено в гл. 3, перечисленные изотопы нестабильны; они спонтанно распадаются с характерными скоростями распада, которые могут быть выражены периодами полураспада (рис. 5.5). Сводка значений периодов полураспада и некоторые другие сведения об этих изотопах приведены в табл. 5.1. Для того чтобы определить возраст, необходимо найти отношение веса новообразованного элемента к весу материнского элемента. Считается, что возможная ошибка в большинстве случаев не превышает нескольких процентов.

Радиоактивные изотопы играют роль атомных часов, начавших отсчет времени с момента кристаллизации минерала. Ни один из долгоживущих, используемых в практике изотопов, приведенных в табл. 5.1, не успел исчезнуть полностью, а изотопы ^{14}C и ^{3}H постоянно обновляются в верхних слоях атмосферы. Некоторые быстро распадающиеся радиоактивные элементы, включая трансурановые, очевидно, исчезли за долгий период земного существования. Ряд их получен в лабораториях и при ядерных взрывах.

Использование трития. Тритий (^{3}H) представляет собой редкую неустойчивую форму водорода с двумя нейтронами в отличие от обычного широко распространенного водорода (^{1}H), у которого нейтроны отсутствуют, или дейтерия (^{2}H) с одним нейтроном. Все три формы водорода обладают в соответствии с их порядковым номером одним протоном. Тритий образуется при столкновении других атомов водорода с быстрыми нейтронами, высвобождающимися при бомбардировке космическими лучами в верхних слоях атмосферы. В ничтожно малых количествах его можно обнаружить в качестве составной части в воде (H_2O). Период его полураспада равен всего 12,5 года, вследствие чего его отношение к изотопу ^{1}H в жидких и твердых веществах быстро уменьшается. Тем не менее его можно использовать для изучения скорости движения подземных вод, скорости перемешивания морской воды или определения возраста не слишком старых слоев снежных полей.

Радиоуглеродный метод. Радиоактивный углерод (^{14}C) образуется в верхних слоях атмосферы при некоторых атомных реакциях, вызываемых ударами падающих космических лучей. В результате этого атом азота (^{14}N) – наиболее распространенный в атмосфере изотоп азота – получает дополнительный нейтрон, излучает протон и превращается в итоге в радиоактивный радиоуглерод (^{14}C). Радиоуглерод окисляется до CO_2, распространяется в воздухе и из воздуха усваивается растениями, а от них перехо-

дит к животным. При жизни организмов непрерывный обмен через двуокись углерода, содержащуюся в атмосфере, поддерживает равновесие с постоянным отношением радиоуглерода к обычному изотопу углерода (^{12}C). Когда организмы погибают, обмен прекращается и органический радиоуглерод, переходя в азот, начинает отсчет времени. Количество ^{14}C постепенно уменьшается с периодом полураспада всего 5730 ± 40 лет[1]. С его помощью можно определять время, ограниченное примерно восьмикратной продолжительностью периода полураспада, т. е. порядка 46 000 лет. За этим пределом содержание первичного углерода ^{14}C слишком мало́ для точного измерения, кроме некоторых особых случаев.

Либби карбонизировал свои пробы и затем с помощью экранированного счетчика Гейгера измерял количество радиоуглерода. Позже другие исследователи для подсчета либо преобразовывали пробы в двуокись углерода (CO_2), метан (CH_4) и ацетилен (HCCH); либо изготовляли жидкий фосфор, содержащий ^{14}C; либо растворяли фосфор в бензине с углеродом ^{14}C для получения сцинтилляции (световых вспышек, вызываемых изотопом ^{14}C); либо вели подсчет по сцинтилляции в кристаллах. Совершенно необходима надежная защита от космического излучения и попадания других случайных частиц. Самая новейшая техника позволяет успешно определять возраст в диапазоне до 100 000 лет в очень маленьких пробах.

Радиоуглеродный метод применим к древесине, древесному углю, торфу и другим богатым углеродом материалам, включая углеродсодержащие организмы, извлекающие из поверхностных вод растворенный в них углерод. Метод основан на допущении, что отношение между ^{14}C и ^{12}C в воздухе остается постоянным. Однако сравнение данных, полученных по ^{14}C, с датировками по древесным кольцам на западе США, в особенности для долгоживущих секвойи и калифорнийской сосны, показало, что содержание ^{14}C в воздухе изменилось по меньшей мере на несколько процентов за последние столетия. Сведения об изменениях за последние 6000 лет могут быть учтены при корректировке возрастов, полученных по ^{14}C. Аналогичным образом не получается точного совпадения радиоуглеродной хронологии с данными, полученными путем подсчета годичных слоев в перигляциальных озерных отложениях, накапливавшихся при отступании покровов материкового льда; это свидетельствует о том, что содержание углерода ^{14}C в воздухе за долгий срок колебалось, возможно, в диапазоне 10%.

Вероятными причинами этих колебаний в прошлом могли быть вариации солнечной активности (главного источника космического излучения на Земле), наблюдаемые изменения магнитного поля Земли (влияющие на движение космических лучей), временное связывание углерода, например при образовании торфа. Сжигание горючих полезных ископаемых древнего происхождения, лишенных изотопа ^{14}C, заметно увеличило начиная с 1900 г. отношение $^{14}C/^{12}C$, но атомные взрывы, производимые с 1945 г., и утечка ^{14}C из реакторов и ускорителей начали вызывать обратный эффект.

Несмотря на указанные колебания и связанную с этим неточность определений, радиоуглеродный метод интенсивно применяется и, судя по всему, будет применяться в геологии и археологии.

Уран-свинцовый, торий-свинцовый и изотопно-свинцовый (свинцово-свинцовый) методы. Один из изотопов урана, ^{238}U, распадается, проходя через ряд промежуточных элементов, включая радий, до ^{206}Pb. Другой изотоп, ^{235}U, также последовательно распадается до ^{207}Pb, а ^{232}Th – до ^{208}Pb. Обладая периодом полураспада 4468 млн. лет, один грамм ^{238}U за 1000 млн. лет превращается в 0,116 г ^{206}Pb; ^{238}U остается 0,865 г. За 2000 млн. лет это даст 0,219 г ^{206}Pb и 0,747 г сохранившегося ^{238}U и т. д. Этот процесс сопровождается уменьшением общего веса: оба компонента вместе весят меньше 1 г. Потеря веса происходит за счет атомов гелия (содержащих

[1] У. Ф. Либби, основатель метода, пользовался в 1952 г. цифрой 5568 ± 30 лет, и для более удобного сопоставления данных эта величина используется во всех последующих определениях, опубликованных в журнале «*Radiocarbon*».

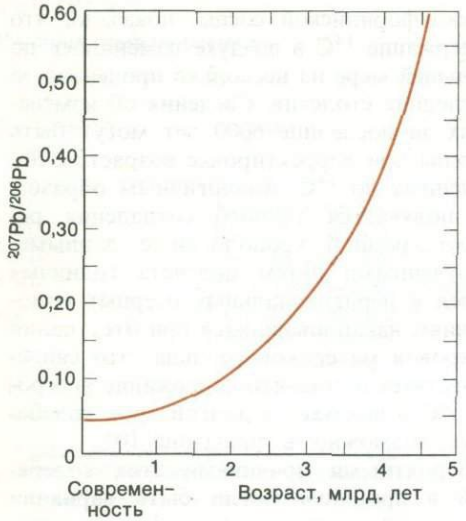


РИС. 5.6
График зависимости отношения $^{207}Pb/^{206}Pb$ от времени, позволяющий определить геохронологический возраст в интервале между принятым первоначальным значением (слева внизу) и 4,6 млрд. лет (справа вверху). Надо знать лишь количество изотопов свинца. (По Г. Фору: *Gunter Faure*, Principles of Isotope Geology, © 1977, fig. 12.4. Перепечатано с разрешения издательства «Джон Уайли энд санз».)

2 протона и 2 нейтрона), и часть массы расходуется на энергию излучения. Второй изотоп урана, ^{235}U, переходит в другой изотоп свинца, ^{207}Pb, со значительно большей скоростью распада, а ^{232}Th, обычный спутник урана, распадается до ^{208}Pb со значительно меньшей скоростью. Таким образом, отношение каждого радиогенного изотопа свинца к своему материнскому изотопу позволяет независимо определять возраст породы с первичными урановыми и ториевыми минералами, если не происходило удаления или привноса урана и свинца.

Кроме трех изотопов, указанных выше, у свинца есть еще изотоп ^{204}Pb. Как и любые другие изотопы, все четыре изотопа свинца определяются масс-спектрометрическими методами. На масс-спектрометре заряженные атомы и молекулы сепарируются в соответствии с их относительной массой при пропускании их в вакууме через контролируемые электрическое и магнитное поля.

Каждое определение возраста одним из уран-свинцовых или торий-свинцовым методом служит проверкой остальных определений. Более того, отношение разных изотопов свинца друг к другу обеспечивает дополнительный контроль согласованности результатов (рис. 5.6, табл. 5.2). Если замеренные возрасты совпадают, о них говорят как о *конкордантных* – они описываются кривой распада, называемой «конкордия» (рис. 5.7). Как можно видеть на рис. 5.8 и 5.9, из них можно извлечь пользу даже в случае несовпадения.

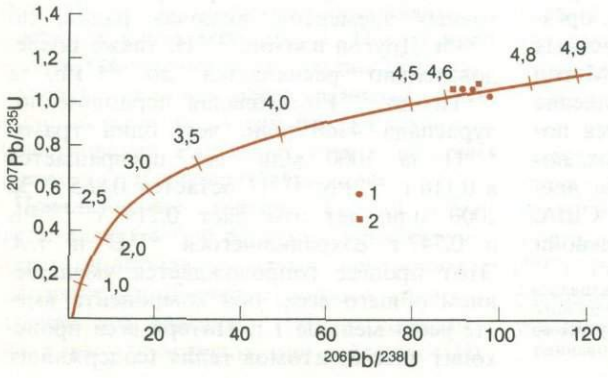


РИС. 5.7
Уран-свинцовая конкордия, показывающая, по существу, конкордантные возрасты тонкого лунного вещества и брекчии, собранных «Аполлоном-11». Указанный возраст от 4,6 до 4,7 млрд. лет соотносится с возрастом Солнечной системы. *1* – тонкий материал с поверхности Луны; *2* – брекчия. (По Д. Т. Эйшеру: *D. T. Eicher*, Geologic Time, 2 d ed., © 1976, fli. 6–7. Перепечатано с разрешения издательства «Прентис-Холл», Инглвуд-Клиффс, Нью-Джерси.)

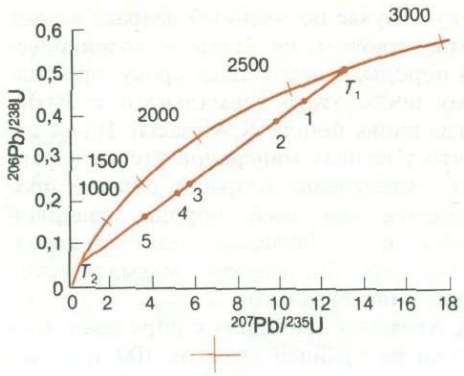


РИС. 5.8

Рассчитанный график конкордии. Пробы 1–5 указывают на растущие потери, но они лежат на прямой линии, пересекающей кривую времени в точках T_1 и T_2. Возраст в этих точках T_1 и T_2 может быть приблизительно оценен в 2600 и 400 млн. лет. Эти цифры, следовательно, соответствуют первичной кристаллизации и более позднему метаморфизму. (По Г. Фору: Gunter Faure, Principles of isotope Geology, © 1977, fig.12.7 Перепечатано с разрешения издательства «Джон Уайли энд санз».)

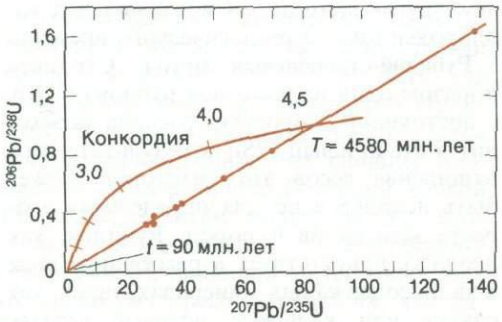


РИС. 5.9

График конкордии, показывающий историю свинца из базальтов Гавайских островов. Точка пересечения T указывает на время образования свинца. Так как базальты геологически молоды, свинец, видимо, происходит из первичной мантии и, таким образом, его возраст подтверждает другие данные о возрасте Земли. (По Г. Фору: Gunter Faure, Principles of isotope Geology, © 1977, fig. 14.5. Перепечатано с разрешения издательства «Джон Уайли энд санз».)

Таблица 5.2

Конкордантный анализ возраста уранинита, горы Блэк-Хилс, Южная Дакота[1]

Метод определения возраста	Вероятный возраст (10^6 лет)
$^{238}U/^{206}Pb$	1580
$^{235}U/^{207}Pb$	1600
$^{232}Th/^{208}Pb$	1440
$^{206}Pb/^{207}Pb$	1630

[1] По данным Г. У. Уэзерила: *G. W. Wetherill*, Trans. Amer. Geophys. Union, vol. 37, pp. 320–326, 1956.

Главное преимущество уран-свинцового метода – его пригодность для широкого диапазона времени, приблизительно от 100 млн. лет до более чем 5 млрд. лет, хотя настолько древних пород и не обнаружено. Его слабой стороной долгое время было отсутствие богатого ураном уранинита, или урановой смолки, в породах, возраст которых геологи хотели бы определить. Позже выяснилось, что в незначительном количестве уран обычно содержится в минерале цирконе ($ZrSiO_4$). Крошечные кристаллы циркона бывают рассеяны в гранитах и ряде других кристаллических пород, так что, дробя вмещающую породу и отбирая циркон, можно получить пробу, достаточную для определения возраста. Как правило, хватает пробы весом значительно меньше 1 г. Содержание изотопа свинца в миллионных долях от веса пробы измеряется на масс-спектрометре, а скорость эмиссии альфа-частиц (ядер гелия), выброшенных ураном и торием в пробе определенного веса, измеряется в течение нескольких часов или более длительное время счетчиком Гейгера. Относительное количество урана и тория измеряется спектрографическим методом. Полученные величины позволяют рассчитать возраст, используя соответствующее уравнение распада.

Проблема циркона заключается в его устойчивости. Жидкая гранитная магма, например внедряясь в сланцы, может ассимилировать из них древние кристаллы

циркона, не расплавив их, и удержать их при кристаллизации; благодаря этому из-за смешения обесцениваются любые попытки последующего измерения возраста гранита. Время от времени кристаллы циркона обнаруживают в некоторых песчаниках; но можно ли их использовать для определения возраста этих песчаников? Для уран-свинцового датирования можно использовать несколько других минералов, таких, как монацит (редкоземельный фосфат обычно с некоторым количеством $ThSiO_4$), сфен ($CaTiSiO_5$), апатит $[Ca_5(F,Cl)(PO_4)_3]$, но циркон предпочтительнее. Удалению и привносу постороннего свинца в цирконе препятствует, как полагают, больший размер атомов свинца по сравнению с атомами циркона и их более низкая (2 против 4) валентность.

Калий-аргоновый метод. Один из изотопов калия (^{40}K) радиоактивен. Он переходит с постоянной скоростью распада в аргон (^{40}Ar) при захвате электрона и в кальций (^{40}Ca) при испускании отрицательно заряженной бета-частицы без значительного изменения массы. Полученный этим путем ^{40}Ca неотличим от ^{40}Ca иного происхождения. Если температура не очень высока, большая часть аргона остается на месте своего образования внутри кристаллической решетки калиевых минералов. Источниками радиогенного аргона служат калийсодержащие минералы биотит, мусковит, ортоклаз, роговая обманка, глауконит (при условии достаточно большого возраста). После устранения с помощью тщательной аналитической обработки осложняющего влияния других изотопов, в том числе атмосферного аргона, отношение $^{40}Ar/^{40}K$ также оказывается пригодным для определения возраста. Поскольку калиевые минералы широко распространены и по скорости распада K/Ar-метод подходит для большинства пород, он очень популярен, несмотря на кропотливую лабораторную процедуру.

Главная проблема K/Ar-метода заключается в утечке аргона с места его образования, особенно в результате прогрева пород за счет погружения их на глубину или внедрения неподалеку интрузий. В этом случае полученный возраст может соответствовать не времени возникновения породы, а всего лишь сроку, прошедшему после этого термального события (когда вновь пошли K/Ar-часы). Из-за того что у разных минералов утечка варьирует, определение возраста обычно производится «по всей породе» (валовой пробе), в особенности для тонкозернистых кристаллических магматических пород типа базальтов.

K/Ar-метод применим к породам с возрастом по крайней мере от 100 тыс. лет до миллиардов лет. В большей степени, чем другие методы, он послужил для калибровки шкалы геологического времени.

Рубидий-стронциевый метод. Сходным образом один из изотопов рубидия, ^{87}Rb, с постоянной скоростью распада переходит в стабильный ^{87}Sr, в результате чего отношение весов этих изотопов может быть использовано для определения возраста минералов и пород. Рубидий, как правило, присутствует в рассеянном виде в калийсодержащих минералах, таких, как слюды или калиевые полевые шпаты. Атомы рубидия меньше атомов калия, и поэтому они замещают атомы калия в кристаллической решетке. Атомы стронция обладают еще меньшим размером.

В этом методе также применяются определения по валовым пробам. Отношение Rb/Sr, определяемое на масс-спектрометре, наносится в виде точек на так называемый график изохрон (рис. 5.10); по его наклону рассчитывается возраст. Как и в предыдущих методах, предполагается, что ни потерь, ни привноса не происходит. Отношение двух стронциевых изотопов $^{87}Sr/^{86}Sr$ может быть использовано для датировки термальных событий, в ходе которых при метаморфизме имели место потери, но только если это отношение было гомогенным по всей породе.

Метод датирования по следам распада. Петрографы с помощью микроскопа обнаружили, что определенные минералы имеют крошечные «следы» в виде линий и что число следов, видимо, связано с возрастом породы. Был сделан вывод, что эти следы оставлены нейтронами, вы-

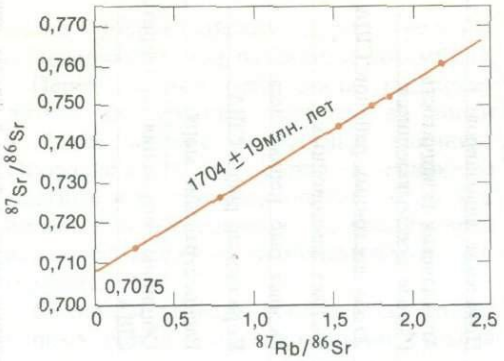


РИС. 5.10

Изохрона, полученная по валовой пробе для серии образцов из Садбери, Онтарио. Наклон графика позволяет определить возраст пород приблизительно в 1700 млн. лет. (По Г. Фору: *Gunter Faure*, Principles of Geology, © 1977, fig. 6.2. Перепечатано с разрешения издательства «Джон Уайли энд санз».)

брошенными атомами урана, и что они пропорциональны количеству присутствующего урана, как бы мало́ оно ни было. Как можно их использовать для определения возраста? Флейшер и Прайс (1964) вначале подсчитали число следов (треков), приходящихся на единицу площади, в химически обработанной тонкой пластинке, а затем подвергли эту пластинку искусственной бомбардировке нейтронами с заданной интенсивностью, во много раз превосходящей ту, что наблюдается в природе. Трудоемкий второй подсчет треков позволил сравнить естественную скорость с увеличенной искусственно скоростью и, следовательно, найти время, необходимое для получения подсчитанной вначале порции треков в данном конкретном минерале за счет естественного распада урана. Как и в случае с утечкой аргона, следы распада в большинстве минералов разрушаются при повторном нагревании пород выше примерно 400°С.

Установлено, что метод определения возраста по следам распада может применяться в диапазоне от 4000 до 1 млрд. лет. Контрольные определения другими геохронологическими методами показали, что его точность удовлетворительна. Сильная сторона метода состоит в том, что при отсутствии урана его можно применять для таких минералов, как слюды; к тому же он недорог.

Явлению следов распада близко осветление биотита вокруг определенных включений (например, циркона) с образованием так называемых плеохроичных ореолов. Ширина этих ореолов увеличивается с течением времени (в геологическом масштабе времени), но параметры этого процесса изучены недостаточно для определения возраста.

ШКАЛА ГЕОЛОГИЧЕСКОГО ВРЕМЕНИ

История. Изучение относительного возраста горных пород позволило европейским геологам уже в XV в. расположить выделенные подразделения в виде шкалы с наиболее древними подразделениями в основании и последовательно все более молодыми подразделениями выше – в том порядке, который теперь называют *стратиграфической колонкой*. Ранние классификации включали три главных подразделения: первичную, вторичную и третичную эры; много позже к ним была добавлена четвертичная эра. Однако породы, названные первичными и вторичными, в действительности не были ни первыми, ни вторыми, поэтому эти названия были отброшены, но термины «третичная» и «четвертичная» продолжали использоваться.

Упраздненные термины были заменены понятиями «палеозойская эра» (древняя жизнь) и «мезозойская эра» (средняя жизнь), взамен термина «третичная эра» был предложен термин «кайнозойская эра», или «кайнозой» (современная жизнь). Позже были выделены архейская (начало жизни) и протерозойская (протожизнь) эры для времени формиро-

Таблица 5.3. Шкала геологического времени с четырьмя вариантами оценки возраста в млн. лет

Процент времени	Эра	Период	Эпоха	Харланд, Смит, Уилкок, 1964	Эшер, 1976	Армстронг, 1978	Рубинштейн, Габуния, 1978	Примечательные события
	Кайнозой	Четвертичный	Современная Плейстоцен	1	2		Неоген	Обширное оледенение
			Плиоцен	11	5			
1,4			Миоцен	25	23		26	Лавы Колумбийского плато
		Третичный	Олигоцен	40	38		Палеоген	
			Эоцен	60	54			
			Палеоцен	70	65	65	67	Появление млекопитающих
	Мезозой	Меловой						Складчатость Скалистых гор Мексиканский залив достиг шт. Иллинойс
3,5				135	136	143	137	
		Юрский		180	190	212	195	Складчатость Сьерра-Невады
		Триасовый		225	225	> 247	240	Появление динозавров
	Палеозой	Пермский		270	280	289	285	Аппалачская складчатость Разные пресмыкающиеся
		Пенсильванский[1]			325	341		Уголь восточных районов США
		Миссисипский		350	345	367	360	Расцвет земноводных
7,5		Девонский		400	395	416	410	Расцвет рыб, первые леса
		Силурийский		440	430	> 446	440	Коралловые рифы США
		Ордовикский		500	500	> 509	500	Распространение моря
		Кембрийский		600	570	~ 575	570	Обширные опускания на территории США
87,6	Докембрий	Только региональные названия		Древнейшие породы: в Гренландии 3,8 млрд. лет Метеориты: 4,55 млрд. лет Образование Земли: 4,6 млрд. лет или больше				

[1] Пенсильванский и миссисипский периоды вместе соответствуют каменноугольному периоду в шкалах, принятых в СССР и Европе.– *Прим. перев.*

вания допалеозойских пород, условно объединяемых под названием докембрия.

Перечисленные эры стали подразделяться на периоды, периоды на эпохи и более мелкие возрастные единицы. *Подразделения докембрия – в основном* местные или провинциальные, тогда как более молодые единицы, за небольшими исключениями, имеют общемировое применение.

Системой названа естественная толща горных пород с определенными верхней и нижней границами, обычно отмеченными отчетливой сменой литологии или резкими изменениями фауны, а иногда перерывами и несогласиями. Время, соответствующее системе, *носит название периода.* Все системы получили свои названия либо от местностей, где они были выделены, либо по характерным литологическим *особенностям.* Например, девонская система и период названы по графству Девоншир в Англии, пермская система – по городу Пермь в Предуралье, СССР; меловая система получила свое название по типичной для нее породе – мелу. Бо́льшая часть палеозойских и более молодых систем была выделена в Западной Европе в первой половине XIX в., так что стратиграфическая геология – наука относительно молодая.

Принципиальным добавлением к шкале *геологического времени в последние десятилетия* было введение неравномерно распределенных по ней возрастных реперов, полученных радиоактивными геохронологическими методами. Так как определения возраста выполнены в основном для магматических пород, границы которых по большей части, к сожалению, не совпадают с границами геологических периодов, то они требуют известной корректировки с учетом относительной мощности *осадков и других критериев. Следовательно,* возраст выделеных подразделений не точен.

Современная шкала геологического времени. Приведенная в табл. 5.3 шкала геологического времени представляет собой внушительный результат всех прошлых усилий. Она включает подразделения с выверенными значениями возраста, что можно было сделать благодаря данным изотопного датирования.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ

Относительный возраст горных пород определяется по последовательности напластования, взаимопроникновению друг в друга пород разного состава, магматическим интрузиям, последовательности фаун и флор.

Измерение изотопного возраста минералов и горных пород основано преимущественно на использовании явления радиоактивности. Для коротких диапазонов времени используются тритий (^{3}H) и радиоуглерод (^{14}C); для длительных диапазонов – методы уран-свинцовый ($^{238}U/^{206}Pb$ и $^{235}U/^{207}Pb$), свинцово-свинцовый ($^{207}Pb/^{206}Pb$), торий-свинцовый ($^{232}Th/^{208}Pb$), калий-аргоновый ($^{40}K/^{40}Ar$) и рубидий-стронциевый ($^{87}Rb/^{87}Sr$). Может быть использован также подсчет следов распада (треков) с дополнительной специальной бомбардировкой образца нейтронами.

Тритий образуется при столкновении атомов водорода ^{1}H с нейтронами. Его период полураспада равен всего 12,5 года, поэтому его применение ограничено такими задачами, как установление характера движения подземных вод и перемешивания морской воды или определение возраста снега в снежных полях.

Радиоуглерод, образующийся из азота в верхних слоях атмосферы, распадается с периодом полураспада 5570 лет. Он используется преимущественно для определения возраста древесины, древесного угля, торфа и углеродсодержащих организмов.

Область применения уран-торий-свинцовых методов, первоначально ограниченная уранинитом и урановой смолкой, была расширена за счет других минералов, прежде всего циркона с очень небольшим содержанием урана и ассоциирующегося с ним тория. Атомы ^{238}U, ^{235}U и ^{232}Th распадаются с разными

скоростями до изотопов ^{206}Pb, ^{207}Pb и ^{208}Pb соответственно. Разделение этих изотопов производится на масс-спектрометре. Отношения $^{238}U/^{206}Pb$, $^{235}U/^{207}Pb$, $^{232}Th/^{208}Pb$ и $^{206}Pb/^{207}Pb$ обеспечивают определение геологического возраста. При этом используются графики конкордии.

Один из изотопов калия переходит в аргон со скоростью, которая подходит для определения возраста по отдельным калиевым минералам или по валовой пробе. Главная проблема заключается в утечке радиогенного аргона или загрязнении атмосферным аргоном.

Рубидий-стронциевый метод основан на распаде рубидия до стабильного стронция с периодом полураспада около 50 млн. лет. Отношение $^{87}Rb/^{87}Sr$, измеренное по валовой пробе, должно быть нанесено на график для определения изохрон.

Метод следов распада требует сравнения числа естественных микроскопических следов распада (треков), приходящихся на единицу площади, с числом следов распада, полученных за счет искусственной бомбардировки нейтронами с заданной интенсивностью.

Современная шкала геологического времени включает эры, периоды, эпохи, расположенные в их естественной последовательности и привязанные к временны́м подразделениям, определенным радиометрическими методами.

Древнейшие из известных на Земле породы имеют возраст почти 3,8 млрд. лет; это меньше, чем возраст некоторых метеоритов (4,7 млрд. лет) и некоторых лунных пород (до 4,7 млрд. лет). Соответственно возраст Солнечной системы оценивается величиной порядка 5 млрд. лет.

ВОПРОСЫ

1. В чем главная разница между понятием «время» в его обычном, повседневном смысле и понятием «геологическое время»?
2. Опишите в общих чертах основные методы, используемые для определения относительного возраста горных пород.
3. Какие допущения должны быть сделаны при определении возраста горных пород изотопными методами?
4. Методы изотопного датирования имеют ограничения. Назовите хотя бы один из методов и обсудите его ограничения.
5. На чем базируется каркас шкалы геологического времени?
6. Какие трудности возникают при калибровке шкалы геологического времени с помощью техники изотопного датирования?
7. Изотопное датирование играет решающую роль в определении возраста горных пород, образовавшихся в раннем докембрии. С чем это связано?

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Armstrong R. L., 1978, Pre-Cenozoic Phanerozoic time scale – Computer file of critical data and consequences of new and in-progress decay-constant revisions, in: The Geologic Time Scale, Amer. Assn. Petroleum Geologists, Tulsa, Okla., pp. 67–91.

Cohen G. V., Glaessner M. F., Hedberg H. D. (eds.), 1978, The Geologic Time Scale, Amer. Assn. Petroleum Geologists, Tulsa, Okla.

Dott R. H., Jr., Batten R. I., 1976, Evolution of the Earth, 2d ed., McGraw-Hill Book Company, New York.

Eicher D. I., 1976, Geologic Time, 2d ed., Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs, N. J.

Faul H., 1966, Ages of Rocks, Planets, and Stars, McGraw-Hill Book Company, New York.

Faure G., 1977, Principles of Isotope Geology, John Wiley and Sons, New York.

Hamilton E. I., 1965, Applied Geochronology, Academic Press, London.

Harland W. B., Francis W. H. (eds.), 1971, The Phanerozoic time scale – A supplement, Geol. Soc. London, Spec. Pub. 5.

Harland W. B., Smith A. G., Wilcock B. (eds.), 1964, The Phanerozoic time scale – A symposium, Geol. Soc. London Quart. Jour., vol. 120, Supp.

Harper C. T. (ed.), 1973, *Geochronology*: Radiometric Dating of Rocks and Minerals, Dowden, Hutchinson and Ross, Inc., Stroudsburg, Pa.

Lambert R. St. J., 1971, The pre-Pleistocene Phanerozoic time scale – A review, in: The Phanerozoic Time Scale – A Supplement, Geol. Soc. London, Spec. Pub. 5, pp. 9–31.

Rubinstein M. M., Gabunia L. K., 1978, On dating of the Paleogene, in: The Geologic Time Scale, *Amer. Assn. Petroleum Geologists, Tulsa, Okla.*, pp. 205–211.

Shaw A. B., 1964, Time in Stratigraphy, McGraw-Hill Book Company, New York.

York D., Farquhar R. M., 1972, The Earth's Age and Geochronology, Pergamon Press, Ltd., Oxford.



6 МАГМАТИЗМ И МАГМАТИЧЕСКИЕ ПОРОДЫ

Вулканические извержения – одно из наиболее разрушительных и устрашающих явлений природы. Как примеры магматической деятельности они наблюдались и регистрировались столетиями.

Термин *вулканизм* происходит от слова Вулькано – названия небольшого вулканического острова (жерла) из группы Липарских островов у берегов Италии (рис. 6.1). Считалось, что здесь находилась кузница Вулкана, легендарного древнеримского бога огня и металлических ремесел. Больше известен соседний с ним действующий вулкан Стромболи – своего рода маяк Средиземного моря, 900-метровая гора, выбрасывающая облака пара днем и светящаяся ночью отраженным светом раскаленной лавы в ее воронкообразном вершинном кратере. Вулкан Этна, гора высотой 3300 м на близлежащем острове Сицилия, активен начиная с XIII в. до настоящего времени. Глубина кратера Этны около 450 м. В 1169 г. при грандиозном извержении Этны был уничтожен город Катания; затем последовали другие извержения, продолжающиеся до настоящего времени.

В континентальной части Италии ареной многочиленных извержений в историческое время была территория Флегрейских Полей, расположенных к западу от Неаполя, и вулкан Везувий к востоку от Неаполя (рис. 6.1). В Монте-Нуово (Новая Гора) при вспышке активности в 1538 г. за неделю образовался новый вулканический конус высотой 160 м, за-



РИС. 6.1
Карта южной Италии, на которой показано местонахождение вулканов Везувия, Стромболи, Вулькано и Этны.

тем извержение прекратилось. Извержение Сольфатары произошло в XII в., но до сих пор здесь продолжается выделение сернистых газов. Деятельность Везувия будет описана на последующих страницах.

МАГМА

Первая стадия магматической деятельности – образование магмы, тела расплавленных пород в недрах Земли. В течение всей геологической истории в недрах Земли за счет высокой температуры происходило плавление пород с образованием жидкой магмы. Магматический расплав может содержать взвешенные кристаллы и растворенные газы, в особенности водяной пар. При излиянии магмы на поверхность Земли образуется лава. При остывании и кристаллизации магмы образуются магматические породы.

Источники тепла. Из практики проходки глубоких шахт и нефтяного бурения хорошо известно, что глубины Земли разогреты. Температурный градиент, показывающий скорость увеличения температуры с глубиной, от места к месту меняется, но для доступных глубин он обычно колеблется от 20 до 30°С на 1 км. Предполагают, что главным источником внутреннего тепла служит радиоактивность. Как упоминалось в гл. 3, радиоактивность сопровождается излучением элементарных частиц или лучей, кинетическая энергия которых при поглощении их окружающими породами переходит в тепло. По данным Уэзерила (1966), 1 г ^{238}U дает 0,71 кал, 1 г ^{235}U – 4,3 кал, 1 г ^{232}Th – 0,20 кал и 1 г ^{40}K – 0,21 кал в год.

Общее количество тепла, поступающего на поверхность из недр Земли и излучаемого во внешнее пространство, составляет примерно $7 \cdot 10^{12}$ кал/с со всей поверхности Земли. Это – большое количество тепла, хотя оно и меньше 1% поступающей на Землю солнечной энергии. Даже небольшая доля тепла, поступающего из глубин к поверхности Земли, способна обеспечить всю магматическую деятельность. Имеются, следовательно, естественные потери энергии? Этот избыток термальной энергии подталкивает нас на поиски экономически выгодных методов ее использования в более широких масштабах по сравнению с уже работающими на паре и горячей воде силовыми установками в Италии, Исландии, Японии и Калифорнии.

Подъем магмы. Для плавления пород требуется определенное пространство, так как при этом их объем увеличивается примерно на $^1/_{10}$ по сравнению с объемом в твердом состоянии. Увеличенная

в объеме и, следовательно, более легкая магма гидростатически, за счет веса твердых пород вокруг нее и сверху, выжимается вверх по трещинам. Она может затвердеть при медленном остывании ниже земной поверхности или прорваться наружу в виде вулканических извержений трещинного или центрального типа и застыть быстрее.

ИНТРУЗИВНЫЙ МАГМАТИЗМ, ИЛИ ПЛУТОНИЗМ

Полевые наблюдения показывают, что бóльшая часть магмы ($^{9}/_{10}$ или больше) не изливается на поверхность в виде вулканического материала, а затвердевает под землей. Образовавшиеся таким образом на глубине тела называют интрузиями, так как они внедряются (интрудируют) в другие породы, где остывают и кристаллизуются. На поверхность интрузии выступают после длительной эрозии и удаления перекрывающих их пород. Становление интрузий может происходить на сравнительно малых глубинах или в виде очень глубоко залегающих плутонических масс (Плутон – легендарный бог подземного мира).

Неглубокие (гипабиссальные) интрузии. Форма гипабиссальных интрузий приспосабливается к структуре вмещающих пород, в которые они внедряются (рис. 6.2). В зависимости от формы выделяется несколько разновидностей интрузий, причем наиболее обычными из них являются *дайки, силлы, лакколиты* и *некки.* Многие интрузии просто заполняют трещины, дискордантные по отношению к вмещающим породам; так возникают дайки (рис. 6.3). Другие «втискиваются» согласно (конкордантно) между пластами горных пород и образуют силлы. Лакколиты обладают плоским дном и куполообразно выгнутой кровлей (рис. 6.2). Некки, или вулканические пробки, образуются при застывании магмы в вертикальных жерлах вулканов, идущих вниз от кратера.

Размеры гипабиссальных интрузий сильно варьируют. Мощность даек колеблется от 1 мм и меньше до десятков (реже сотен) метров; в длину они достигают

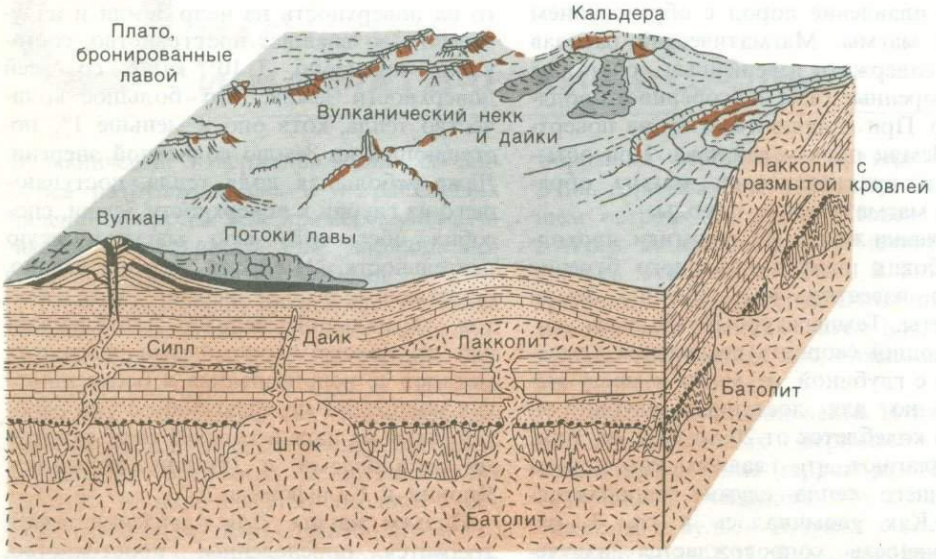


РИС. 6.2

Блок-диаграмма, показывающая структурные соотношения различных типов интрузивных и эффузивных пород. (По Ф. П. Янгу.)



РИС. 6.3
Дайка с апофизами (светлое), внедрившаяся вдоль трещины в горных породах. Мощность основного тела дайки достигает 30 см. Корнуолл, Англия. (Фотография Геологической службы и Геологического музея, Лондон.)

десятков километров[1]. В некоторых случаях образуются рои даек, заполняющих параллельные, пересекающиеся или радиально расположенные разрывы (рис. 6.4). Силлы обычно имеют толщину от нескольких метров до сотен метров. Они занимают площадь от долей квадратного километра до сотен квадратных километров. Размер некков в поперечном сечении в основном колеблется от 0,1 до 0,5 км, редко достигая 2 км.

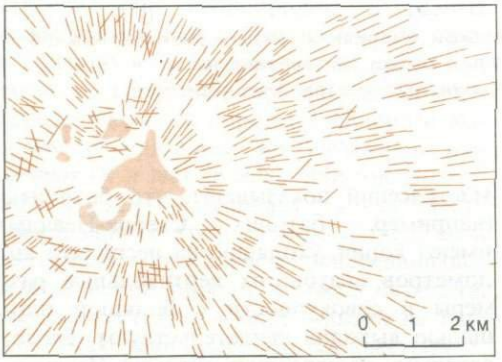


РИС. 6.4
Радиальные дайки в районе Санлайт, шт. Вайоминг. Радиальная система даек указывает, что источник магмы располагался в центре, и от него магма распространялась в стороны на несколько километров по системе расходящихся трещин. (По Парсонсу.)

БАТОЛИТЫ

Батолиты – это наиболее крупные глубинные, или плутонические, массивы. Они представляют собой тела крупнозернистых интрузивных магматических пород, которые приурочены к ядрам современных гор или уцелевших от размыва остатков древних горных систем. Согласно определению, площадь их выходов должна превышать 100 км^2; подобные им, но меньшие по размеру тела называют *штоками*.

Что касается возраста, то батолиты известны от раннего докембрия (несколько миллиардов лет назад) до миоцена (примерно от 25 до 13 млн. лет назад), но могут существовать и более поздние, как раз в силу своей молодости еще не вскрытые эрозией.

[1] Иногда и сотен километров, как, например, Великая дайка в Африке.– *Прим. ред.*

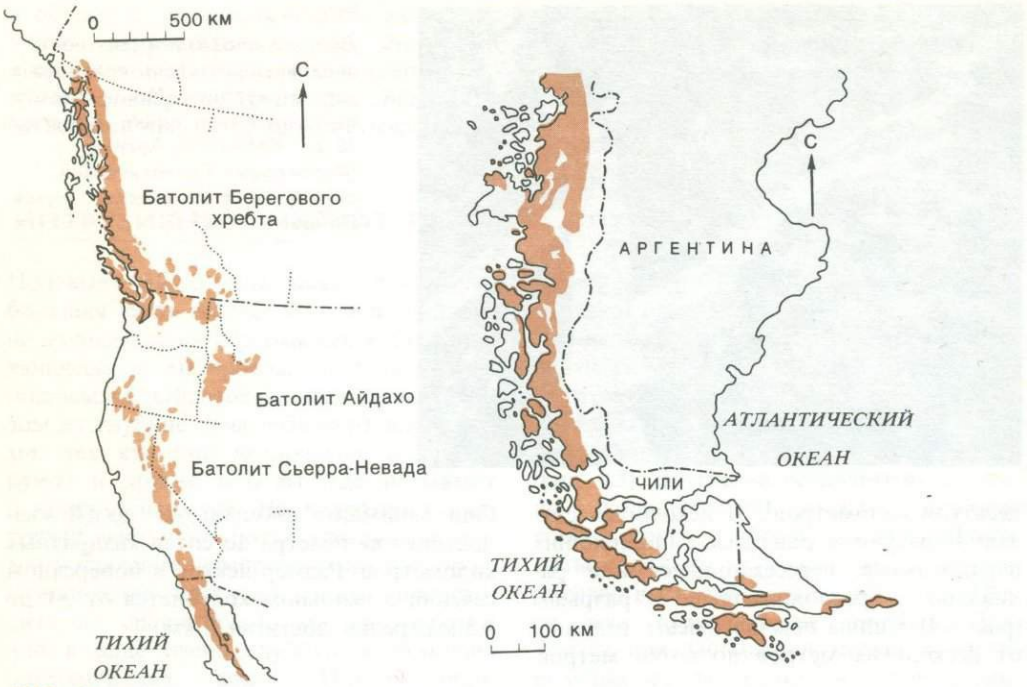


РИС. 6.5

Батолитовые интрузии в западных районах Северной Америки и южных районах Южной Америки, внедрившиеся вдоль осей древних горных систем; их верхние части уничтожены в ходе последующей длительной эрозии. (По картам Американского геологического общества.)

Размер. Батолитам свойственны очень крупные размеры. Система батолитов непрерывно протягивается, например, по всей длине Анд от мыса Горн до Панамы на расстояние около 8000 км. Из них три единичных массива, один в Перу и два в Чили, обнажаются на отрезках длиной более 1300 км каждый. Батолит Берегового хребта Британской Колумбии имеет около 2000 км в длину и от 130 до 200 км в ширину. Батолиты центральных районов шт. Айдахо, Сьерра-Невады и Нижней Калифорнии достигают в длину около 700 км и в ширину 100–130 км каждый (рис. 6.5). Все они образовались из богатого кремнеземом материала, поступившего по зонам субдукции вниз в верхнюю мантию, где он был расплавлен и в виде магмы снова поднялся вверх.

Форма. Гравиметрические данные и данные о распространении волн от землетрясений показывают, что батолиты (например, батолит Сьерра-Невады) имеют корни, уходящие на несколько километров вглубь; их вертикальные размеры в совокупности с большой площадью выходов свидетельствуют, следовательно, об огромных объемах. Их кровля, или верхняя поверхность, имеет форму широкого свода, хотя в деталях она неровная и волнистая. Стенки круто наклонены во внешнюю сторону, но во многих случаях контакт между магматическими породами батолитов и вмещающими породами не резкий. Вместо этого батолиты бывают окаймлены зоной жил и послойных внедрений магматических пород, проникающих в измененные вмещающие породы. Иногда в краевых частях батолитов наблюдаются скопления *включений* из материала вмещающих пород. Одни включения свежие, имеют угловатую форму, тогда как другие пере-

полнены новообразованными минералами, округлены в результате оплавления на краях или размягчения при высокой температуре и вытянуты в направлении движения магмы.

Структурные соотношения. Удлиненные батолиты в ядрах горных систем имеют тенденцию располагаться параллельно региональным структурам этих систем, как это наблюдается, например, в Береговом хребте Британской Колумбии и в Андах. Однако батолиты могут пересекать складки и разрывы; в таких случаях очевидно, что они внедрились уже после формирования этих нарушений в ходе основной складчатости.

Состав. Батолиты почти целиком сложены крупнозернистыми, богатыми кремнеземом породами, по химическому составу очень близкими к среднему составу осадочных пород. Это наводит на мысль, что по крайней мере часть их возникла из материала осадочных пород. Крупные батолиты имеют, как правило, сложное строение – они неоднородны в разных своих частях. Вследствие изменений, происходящих в составе магмы во время или после ее внедрения, последними обычно кристаллизуются породы с наиболее высоким содержанием кремнезема и щелочных (K и Na) полевых шпатов. Возможен и другой вариант, когда часть обогащенного кремнеземом и щелочами материала, прежде чем присоединиться в виде новой порции к массе батолита, выдавливается из земной мантии на глубине нескольких десятков километров.

Образование. Пока еще до конца не ясно, каким образом освобождается пространство для таких гигантских объемов магмы. Одни геологи считают, что при подъеме сильно нагретой магмы ею поглощаются и затем в ней растворяются (ассимилируются) большие порции породы. При этом процессе, названном *магматическим обрушением*, крупные блоки породы отчленяются от кровли, которая дробится и обрушается. Обломки падают в более легкий магматический расплав и там частично растворяются или опускаются на глубину. За счет этого магматический резервуар, естественно, расширяется, и магма продвигается дальше вверх в земную кору. Наличие частично ассимилированных пород, в которые происходило внедрение, в значительно удаленных от краев внутренних частях батолитов доказывает, что обрушение в действительности происходит; однако количественная роль этого процесса остается неясной. Видную роль может играть механическое разрушение пород кровли, так как они, несомненно, подвергаются воздействию огромных растягивающих, сжимающих и скручивающих сил.

Другие геологи полагают, что батолиты внедряются наподобие инъекции, с силой. Это – подходящее объяснение для случаев согласного залегания батолитов в региональной структуре. Большая масса магмы просто вдавливается в более древние породы, с силой раздвигая их в стороны при своем движении вверх. Если легкая магма поднимается сквозь более тяжелые вмещающие породы, сила внедрения может быть обусловлена гравитацией. Поскольку большинство крупных батолитов связано с зонами деформации земной коры, магматическое тело может также выжиматься под действием деформирующих сил.

Некоторые геологи придерживаются мнения, что гранитные породы батолитов формируются на месте посредством «гранитизации», при которой глубоко погруженные осадочные породы, вулканические туфы (окаменевший вулканический пепел) и лавы вначале подвергаются перекристаллизации и затем, продолжая изменяться под действием горячих растворов и мигрирующих ионов, преобразуются, даже без полного расплавления, в гранулированную (зернистую) массу, имеющую форму батолита и гранитный состав. В мягком, структурно податливом состоянии такая масса может вести себя в определенной мере как магма. Полосчатые породы у краев батолитов с постепенными переходами от слоя к слою, своеобразные структурные особенности и реликтовые текстуры свидетельствуют в пользу гипотезы гранитизации. Но наблюдаемые в других случаях резкие секущие контакты, признаки обрушения и механического скучивания, относительно массивный характер предположительно

интрузивного тела, состав и последовательность кристаллизации слагающих его минералов противоречат этой теории.

Из-за противоречивости аргументов вопрос об относительном значении магмы и гранитизации при образовании батолитов продолжает широко обсуждаться. Если гранитная магма образуется непосредственно при частичном или полном плавлении пород с участием водяного пара под большим давлением, как в лабораторных экспериментах, то отпадает проблема замещения других пород. Более того, возможны оба процесса – и гранитизация, и внедрение магмы.

Изучается связь батолитов с тектоникой плит. Приуроченность батолитов к зонам деформации вблизи краев плит позволяет выдвинуть предположение об их генетической связи с процессом накопления мощных осадочных толщ и последующей складчатостью. Мощность осадочных и эффузивных магматических пород морского дна, связанных с глубоководными желобами и зонами субдукции, достигает 10 км и больше. Предполагается, что погружающиеся в этих зонах осадочные и эффузивные породы при движении плит подвергаются горизонтальному сжатию с образованием горных цепей, по оси которых происходит внедрение батолитов. Согласно одному из взглядов, батолитовая магма образуется при частичном или полном плавлении силикатной фракции такой большой массы, погруженной на большую глубину. По этой концепции Андский батолит сформировался в зоне субдукции (протягивающейся вдоль побережья Тихого океана), погружающейся под умеренным углом под континент.

ЭФФУЗИВНЫЙ МАГМАТИЗМ (ВУЛКАНИЗМ)

Вулканизм – одно из самых впечатляющих явлений природы. Он геологически конструктивен, так как создает вулканические горы, лавовые поля и плато. Хотя в каждом отдельном месте извержения происходят только спорадически, где-то на Земле почти всегда отмечается вулканическая деятельность. Особенно примечательны спрединговые океанические хребты и островные дуги вблизи зон субдукции. Вулканизмом отмечены, таким образом, как возникающие, так и исчезающие участки в системе спрединга. Вулканизм проявляется и в виде отдельных вулканических аппаратов центрального типа, и в форме трещинных излияний.

ВУЛКАНЫ

Типы вулканов. Вулканы можно разделить на эффузивные (со спокойным характером излияний), эксплозивные, или взрывные, и вулканы промежуточного типа. Они могут принимать форму лавовых или шлаковых конусов, сложных конусов; могут быть действующими, спящими и потухшими. Состав изливающейся лавы колеблется от основного (мафического) до кислого.

При спокойных излияниях, как на Гавайях, образуются пологие конусы, сложенные базальтовой лавой, называемые также щитовыми вулканами. С другой стороны, фонтанирующая лава дает шлаковые конусы или конусы разбрызгивания со склонами крутизной 30–35°, как на острове Уизард на озере Крейтер, шт. Орегон (рис. 1.2). У вулканов, выбрасывающих лаву и шлак поочередно, возникают сложные конусы, или стратовулканы, сложенные чередующимися слоями, со склонами средней крутизны (обычно 20–30°). Примерами могут служить Везувий, Этна, Майон, Рейнир, Шаста. У немногих вулканов с вязкой лавой образуются пробкообразные куполы, а иногда и своеобразные «иглы»; примером может служить некогда существовавшая «игла» вулкана Мон-Пеле на острове Мартиника.

Кратеры и кальдеры. Кратер вулкана

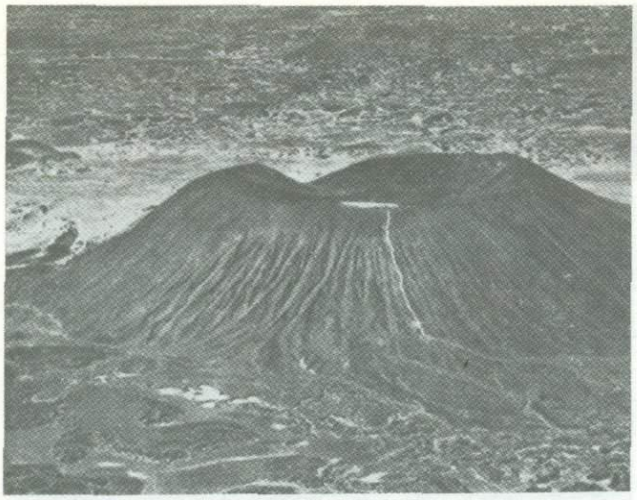


РИС. 6.6
Кратер Амбой в округе Сан-Бернардино, Калифорния; кратер расположен в вершинной части низкого шлакового конуса. (Фотография компании «Спенс эйр фотос».)

представляет собой чашеобразное или воронкообразное отверстие, через которое выбрасывается вулканический материал (рис. 6.6). Размер кратеров колеблется от нескольких метров до 1 км. В верхней части кратер может иметь расширение, образующееся при взрывах за счет соскальзывания вулканического материала внутрь со стенок воронки, плавления и поглощения лавовым столбом в кратере вышележащего материала, проседаний внутри подводящего канала.

Термин «кальдера» возник при описании громадного углубления на Канарских островах, названного La Caldera, имеющего более 5 км в диаметре и окруженного утесами высотой почти 1000 м. Теперь термин применяется для обозначения крупных депрессий в вулканических областях, которые иногда имеют гигантские размеры. Например, диаметр кальдеры Аниакчак на Аляске достигает 10 км. Одна из кальдер Мауна-Лоа имеет 6 км в длину и 3 км в ширину; кальдера Килауэа имеет 3,7 км в длину и 2,5 км в ширину. Обе эти кальдеры на Гавайях образовались в результате обрушения вершин гор вслед за оттоком лавы на глубине. Кальдера Катмаи на Аляске сформировалась в 1912 г. вследствие провала верхней части горы, вызванного плавлением на глубине, выбросом пемзы и лавинообразным обрушением внутренних стенок кратера. Кальдера озера Крейтер в Орегоне, достигающая 8 км в диаметре (рис. 1.2), образовалась при обрушении бывшей вершины Мезама после выброса примерно 70 км^3 пемзы.

Хоуэл Уильямс (1941), занимавшийся изучением вулканов, считает, что, за небольшими исключениями, они не «смахивают» прочь свои головы», а скорее оказываются «выпотрошенными», и их вершины проваливаются вниз. Свое мнение он основывает на том факте, что выбросы вокруг большинства кальдер почти целиком состоят из пемзы, а не из обломков более древних пород, которые должны были бы разлетаться при взрыве.

Размещение. Из 600 известных сейчас вулканов, действовавших в историческое время, две трети сосредоточены в островных дугах вокруг Тихого океана (рис. 6.7) или на континентальной стороне границ между плитами. Примером могут служить Марианские острова, Филиппины, Япония, Курильские и Алеутские острова, Центральная Америка, Анды. Второй пояс концентрации вулканов, в котором сосредоточена примерно четверть их общего количества, протягивается от Италии, Греции и Турции через Южную Азию к Индонезии. Вулканы третьей группы, связанные со срединно-океаническими спрединговыми хребтами, расположены в Исландии, на островах Азорских, Асунсьон и Тристан-да-Кунья. Четвертая группа включает цепочки вул-

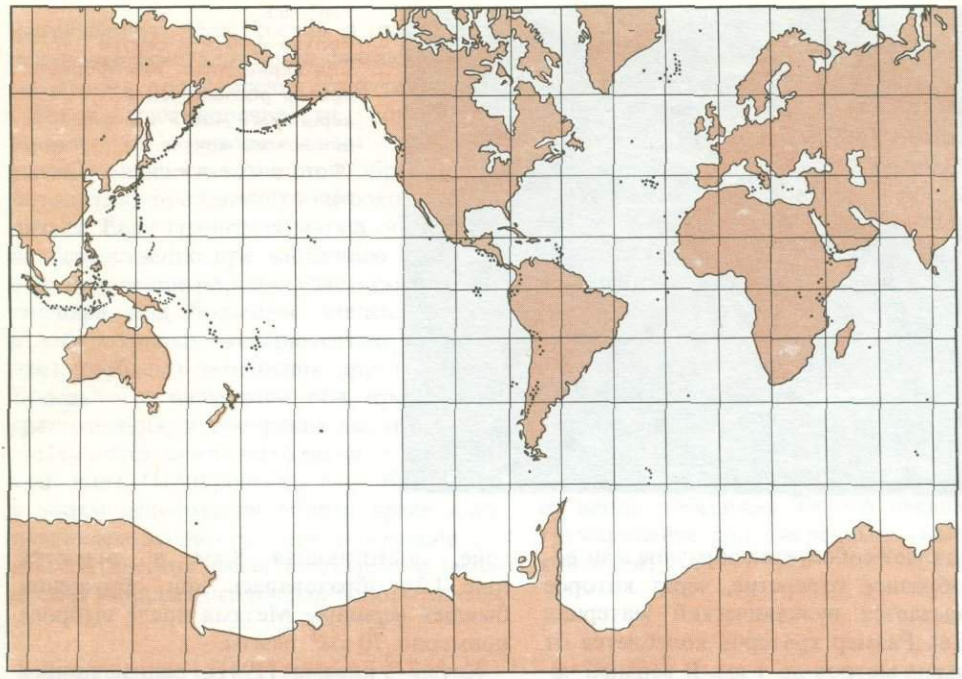


РИС. 6.7

Размещение на земном шаре известных действующих вулканов. (По Г. А. Макдоналду: *Gordon A. Macdonald*, Volcanoes, © 1972, fig. 14.1. Перепечатано с разрешения издательства «Прентис-Холл», Инглвуд-Клиффс, Нью-Джерси.)

канических островов в Тихом океане, и в первую очередь Гавайские острова. Кроме этих наземных вулканов, в том числе и вулканов островных дуг, в акватории Тихого океана насчитывается, по данным Менарда, около 10 000 подводных вулканов высотой не менее 1 км. Большинство из них никогда не поднимались выше уровня моря, но часть из них некогда были вулканическими островами, теперь погруженными вследствие движения плит.

Судьба вулканов. Как только вулканический материал попадает на земную поверхность, он тут же становится объектом медленных процессов выветривания и эрозии. Особенно уязвим пирокластический материал вследствие своей характерной структуры, большой площади поверхности и высокой пористости. Потоки лавы, дайки и вулканические некки более устойчивы, но также не вечны.

Размыв дождевой водой и потоками, сопровождающийся деятельностью ледников, подземных вод и ветра, постепенно разрушает вулканические конусы (рис. 6.8), и в конце концов от них остаются группы невысоких холмов или даже равнина вокруг остатков некка и похожие на крепостные стены фрагменты ранее существовавшего и ныне почти уничтоженного вулканического конуса (рис. 6.9).

Проседание и взрывы также вносят свой вклад в разрушение конусов действующих вулканов. У спящего вулкана могут быть вспышки активности, которые восстанавливают его и компенсируют ущерб, нанесенный предшествовавшей эрозией. В море склоны вулканических построек подвергаются атаке волн; небольшие конусы могут быть разрушены за несколько месяцев. Но несмотря на эти разрушительные процессы, большие объемы вулканических пород сохраняются продолжительные отрезки геологического времени.



РИС. 6.8
Вулкан Илиамна на Аляске. Несмотря на продолжающееся до сих пор выделение пара, *конус вулкана уже глубоко* эродирован. На переднем плане и справа видны выемки, обусловленные деятельностью ледников. (Фотография компании «Спенс эйр фотос».)

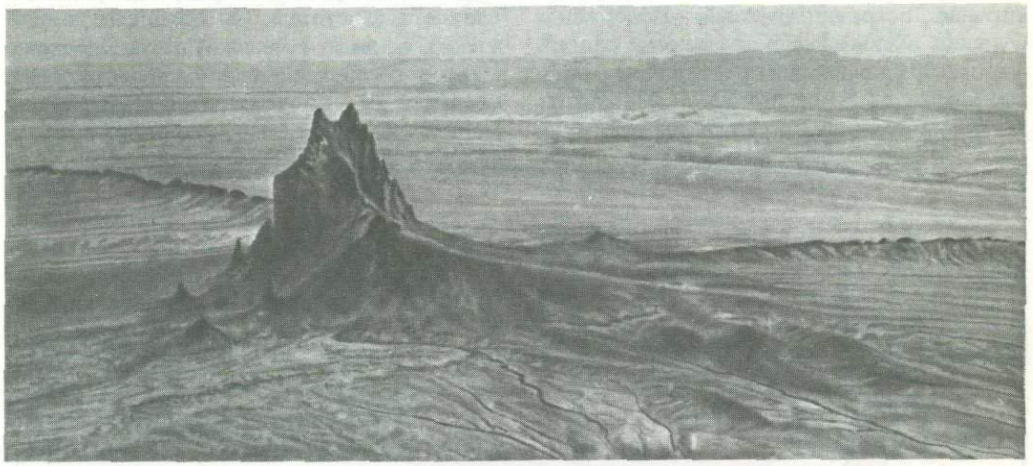


РИС. 6.9
Скалы в северо-западных районах шт. Нью-Мексико – останцы древнего, ныне глубоко эродированного вулкана. Крепкий центральный ствол вулкана более устойчив, чем окружающие породы, так же как вертикальные дайки (заполненные лавой трещины), образующие теперь похожие на стены гребни (справа и слева). Эти *устойчивые породы отпрепарированы в рельефе под действием дождевых вод и потоков.* Скалы возвышаются примерно на 500 м над окружающей равниной. Конус, некогда скрывавший эти породы, теперь фактически уничтожен. (Фотография компании «Спенс эйр фотос».)

ПРИМЕРЫ ВУЛКАНОВ

Суртсэй, 1963 г. В ноябре 1963 г. на Срединно-Атлантическом хребте к юго-западу от Исландии возник новый щитовой вулкан Суртсэй; его рождение *сопровождалось эффектными взрывами.* При взаимодействии раскаленной лавы с морской водой выбрасывались фонтаны обломков. Облака водяного пара, насыщенные пылью, поднялись до высоты *16 км (т.е. до 5 км в стратосферу для*

этой широты). Лавовые потоки появились через четыре месяца, и течение их прекратилось в мае 1965 г. За это время вулкан Суртсэй вырос до 190 м в высоту при 2 км в поперечнике; площадь его достигла почти 3 км^2. Из обломочного вулканического материала в полукилометре от вулкана за 4 месяца 1965 г. сформировался второй остров площадью 0,2 км^2. Он был разрушен волнами пять месяцев спустя.

Хельгафьелл, 1973 г. Вулканическое извержение спящего вулкана Хельгафьелл на острове Хеймаэй 23 января 1973 г. напомнило исландцам картину извержения 1963 г., когда возник вулкан Суртсэй. Остров Хеймаэй расположен на Срединно-Атлантическом хребте в 20 км южнее Исландии и примерно в 10 км северо-восточнее острова Суртсэй. Извержение вулкана Хельгафьелл началось ранним утром 23 января и предварялось роем слабых землетрясений 22 и 23 января. Сильнейшее из них оценивается в 2,7 балла по шкале Рихтера – сила весьма умеренная. Из кратера были выброшены лава и пепел; лава вытекала также из трещины длиной 3 км, которая рассекла остров, имеющий в поперечнике всего 4 км. По официальным данным, весь остров был засыпан тонким пеплом и более 1/10 его поверхности было покрыто лавой. Вторжение лавы заставило жителей покинуть город Вестманнаэйяр с населением 5000 человек. Потоками лавы вода в районе порта была разогрета до 44°С. 19 февраля одна сторона конуса обрушилась, открыв путь новым лавовым потокам, перекрывшим руины.

Парикутин, Мексика, 1943–1952 гг. В Мексике находится несколько действующих вулканов (рис. 6.10). У недавно возникшего вулкана Парикутин яркая девятилетняя история. Он возник однажды утром в виде горячего пятна посреди маисового поля и к утру следующего дня превратился в конус высотой 10 м. К концу первой недели конус вырос до высоты

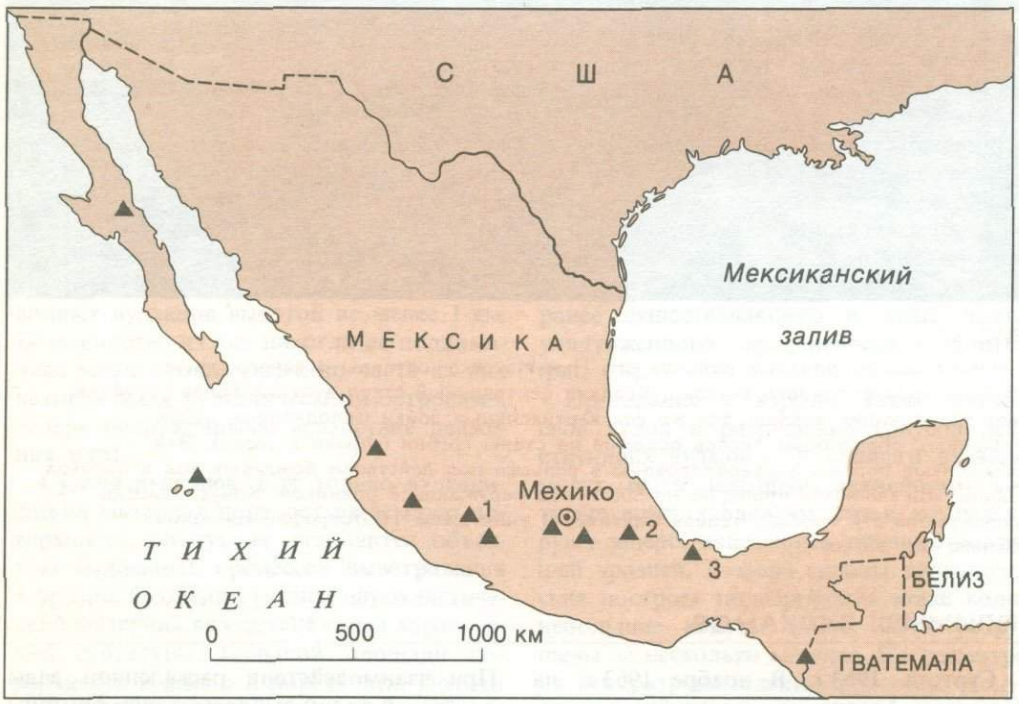


РИС. 6.10

Активные в историческое время вулканы Мексики: *1* – Парикутин; *2* – Попокатепетль; *3* – Оризаба.

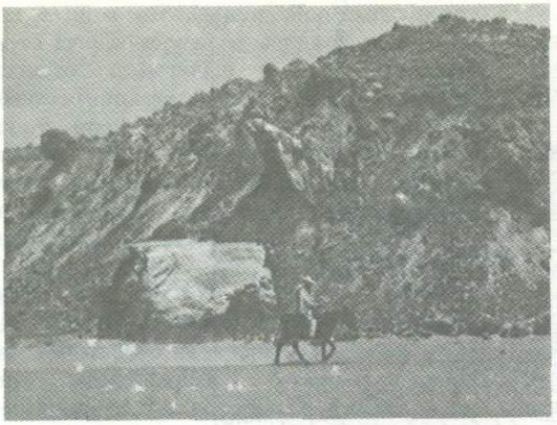


РИС. 6.11
Надвигающийся фронт лавового потока вулкана Парикутин, Мексика. Все еще жидкая внутри потока лава проталкивает вперед разламывающуюся корку. Последняя обрушивается и скатывается перед фронтом наступающей лавы, как перед гигантским бульдозером, и затем захороняется под надвигающимся потоком. Пространство на переднем плане покрыто осевшим из воздуха пеплом. (Фотография У. Ф. Фошага.)

110 м. За первый год он достиг высоты 325 м. В конце концов площадь эллиптического основания конуса составила примерно 600 × 900 м, высота 420 м и диаметр кратера 270 м. У основания конуса несколько раз вырывались лавовые потоки (рис. 6.11), растекавшиеся на площади около 2,3 км^2. Окружающая территория на большом пространстве была покрыта темным вулканическим пеплом. Суммарный объем шлака, лавы и пепла оценивается величиной около 0,8 км^3. Измерениями в 1945 г. было установлено, что приблизительно 1% от общего веса выброшенного материала приходился на долю водяного пара. Геологами на месте в деталях зафиксирована вся история вулкана от его рождения до угасания.

Мауна-Лоа и Килауэа, Гавайские острова, с 1825 г. Эффектные извержения Гавайских вулканов способствовали дальнейшему проникновению человеческой мысли в суть вулканических процессов. На протяжении столетия вулкан Килауэа славился своим кипящим лавовым озером Халемаумау (рис. 6.12), возникавшим время от времени в вершинной кальдере, имеющей 2,4–4 км в поперечнике и глубину около 100 м. Глубина озера жидкой лавы менялась в зависимости от уровня поверхности расплавленной лавы. В 1924 г. лавовое озеро исчезло под землей, и произошло необычное для этого вулкана эксплозивное извержение, вызванное проникновением подземных вод в зону горячей магмы.

Внушительный объем сведений о вулкане Килауэа и его гигантском соседе

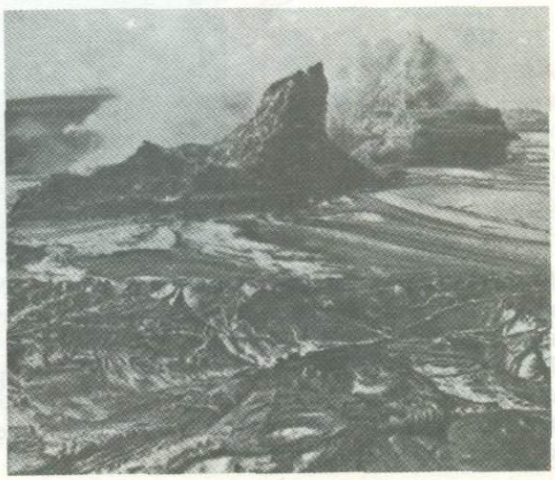


РИС. 6.12
Жидкое лавовое озеро в кратере Халемаумау – огненной воронке внутри кальдеры Килауэа на Гавайях. (Фотография Т. А. Джеггера, Гавайская вулканологическая обсерватория.)

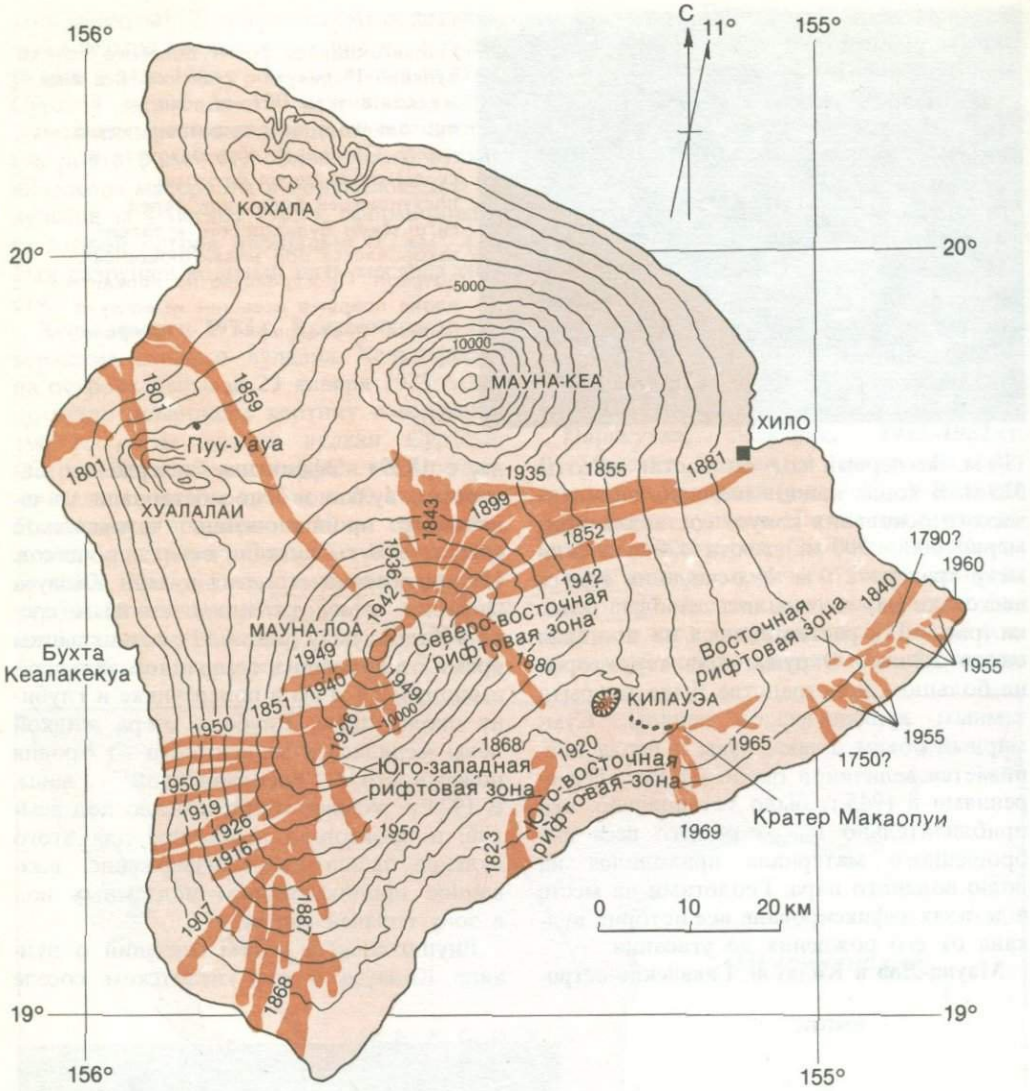


РИС. 6.13.

Карта о. Гавайи с пятью крупными вулканами, которыми образован остров, и излившимися в историческую эпоху потоками лавы. Изогипсы проведены через 1000 футов. Отсчет от среднего уровня моря. Рельеф по данным Геологической службы США. (Перепечатано с разрешения издательства «Юниверсити оф Гавайи пресс» из книги: *Gordon A. Macdonald, Agatin T. Abbott*, The geology of Hawaii, Volcanoes in the Sea, 1970, © by University of Hawaii Press.)

Мауна-Лоа был получен Гавайской вулканологической обсерваторией, сооруженной в 1912 г. на краю кальдеры Килауэа. Мауна-Лоа и Килауэа – только два действующих вулканических центра из пяти лавовых конусов, которыми образован остров Гавайи (рис. 6.13).

Мауна-Лоа поднимается со дна океана с глубины около 5300 м и возвышается на 4500 м над уровнем океана; таким образом, общая высота вулкана достигает приблизительно 10 000 м. Его объем превышает $21 \cdot 10^3$ км^3, т.е. больше объема любого из всех остальных вулканов

на земном шаре. Мауна-Лоа имеет широкую куполообразную вершину и пологие склоны, сложенные тонкими потоками базальтовой лавы. Лава, надстраивающая гору, прежде чем затвердеет, свободно стекает по пологим склонам. Бóльшая ее часть поступает из трещин: из одной на юго-западе и другой – на востоке-северо-востоке.

На вершине Мауна-Лоа находится кальдера длиной 6 км и шириной 1,8–3 км; ее стенки местами поднимаются на 200 м. Дно кальдеры рассечено в длину несколькими субпараллельными трещинами, по которым временами свежая лава поднимается до бортов кальдеры и иногда переливается через ее край. При извержениях некоторое количество лавы выбрасывается фонтаном вверх на высоту нескольких сот метров (рис. 6.14). Но чаще лава изливается по трещинам ниже по склону и длинными тонкими потоками устремляется вниз. В 1919 и 1926 гг. потоки, вырвавшиеся на поверхность на отметке около 2500 м, достигли берега моря, удаленного на 20 км, через две недели. Почему это заняло столько времени?

Килауэа – небольшой щитовой вулкан высотой около 1350 м над уровнем моря, расположенный на восточном склоне вулкана Мауна-Лоа, вершина которого находится на расстоянии 33 км (рис. 6.15). Его кальдера имеет поперечник 2,4–4 км и глубину 100 м. Размер периодически действующей лавовой воронки Халемаумау на дне кальдеры чуть больше 0,8 км в поперечнике (рис. 6.16).

У Килауэа наблюдается циклическая активность, включающая: 1) медленный подъем подземного столба лавы, 2) слабое сводообразное выгибание вверх средней части твердого лавового щита, 3) быстрое опускание лавового столба вследствие оттока в дайки и за счет излияний на склонах, 4) быстрое опускание купола. Как вы представляете себе причины куполовидного выгибания? Такие циклы имели место в 1924, 1959–1960, 1969–1970 и 1977 гг. Лава, прорывы которой наблюдались начиная с 1959 г. и были приурочены к вытянутой в восточном направлении трещинной зоне, перекрыла площадь около 45 км^2 и, снова и снова достигая моря, нарастила площадь суши.

Мон-Пеле, остров Мартиника, 1902 г. Катастрофическое извержение вулкана Мон-Пеле на острове Мартиника, одном из островов Малой Антильской вулканической островной дуги в Карибском море



РИС. 6.14

Фонтан лавы, выброшенной 7 июня 1950 г. на высоту 2600 м из жерла, расположенного на юго-западной трещине вулкана Мауна-Лоа. Расплавленная лава поступала в виде нерегулярно повторявшихся выбросов; часть ее затвердевала в форме шлака и капель, остальная масса стекала вниз, образуя при застывании волнистую поверхность (видна на переднем плане). (Фотография Макдоналда, Геологическая служба США.)

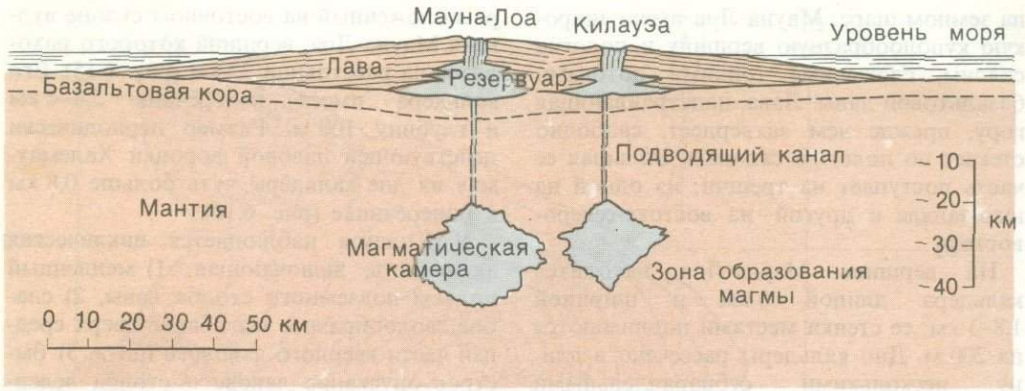


РИС. 6.15

Гипотетический разрез через вулканы Мауна-Лоа и Килауэа на Гавайях, показывающий возникновение магмы в мантии и неглубоко расположенные резервуары, в которых накапливается магма и которые периодически то увеличиваются в объеме, то сжимаются по мере нарастания и падения активности. Перед извержением лавы происходит подъем земной поверхности и увеличивается ее наклон во внешнюю сторону; после извержения происходит опускание и изгиб поверхности внутрь. (По Макдоналду, 1961.)

(рис. 6.17), произошло в 1902 г. До этого, в 1792 и 1851 гг., здесь отмечались средние по силе извержения. Весной 1902 г. чрезвычайно вязкая лава поднялась в кратере; при этом образовалась куполовидная массивная корка, закупорившая отверстие подводящего канала. Перегретый водяной пар, сдерживаемый этой пробкой, периодически вырывался из-под нее, увлекая вместе с собой горячие, насыщенные пеплом *палящие тучи*, которые, обладая большей, чем воздух, плотностью, скатывались вниз по склону. На Мон-Пеле они обычно быстро перемещались в западном направлении вниз по склону горы в долину. 8 мая произошел особенно мощный взрыв, и палящая туча устремилась к югу на Сен-Пьер – город с 28 000 жителей. Горячее пепловое облако, температура которого оценивается в 600°С, пронеслось над городом с яростью огненного урагана. За одну ми-

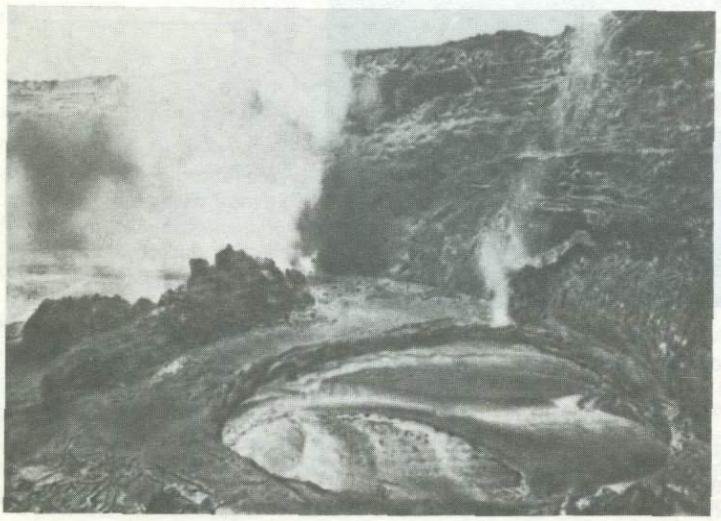


РИС. 6.16

Небольшое, около 15 м в поперечнике, круглое лавовое озеро у основания стены кратера Халемаумау, сентябрь 1920 г. Перегретый водяной пар, поднимающийся по находящимся под озером трещинам, не дает ему *застыть*. (*Фотография* Т. А. Джеггера, Гавайская вулканологическая обсерватория.)

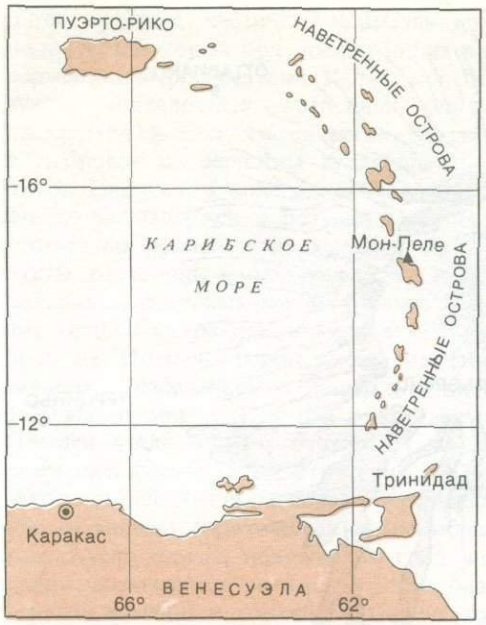


РИС. 6.17
Географическое положение вулкана Мон-Пеле на острове Мартиника.

нуту погибли все жители (кроме одного узника, находившегося в подземной тюрьме), город был сожжен, а корабли, стоявшие в гавани, опрокинуты или сожжены.

В октябре 1902 г. пробка была вытолкнута и распалась на куски, но из трещины в вершинной части горы стала подыматься мощная и очень вязкая «игла», скальный монолит, который к весне 1903 г. достиг высоты более 300 м. Казалось, что его гладкие, с вертикальными бороздами стенки образовались в результате пластической формовки, которой подвергалась почти что твердая, похожая на тесто лава при выжимании иглы вверх. Затем, в течение года игла распалась, превратившись в груду обломков.

Слабые извержения Мон-Пеле повторялись с 1929 по 1933 г. Временами образовывались пробки в виде небольших куполов и даже невысокие иглы, и все это сопровождалось выбросами пара и огненных палящих туч. Эта вполне безвредная манера поведения напоминает безобидное подпрыгивание крышки кипящего чайника.

Кракатау, Индонезия, 1883 г. Остров Кракатау, расположенный у западной оконечности острова Ява, послужил ареной одного из величайших на земном шаре эксплозивных извержений. Он приурочен к гребню широкой доисторической кальдеры. В 1877 г. в районе вулканического острова Раката начались землетрясения, частота которых постепенно возрастала до мая 1883 г., когда Кракатау начал выбрасывать вулканический пепел. Сила извержения росла и достигла максимума в августе 1883 г. Серией гигантских взрывов, продолжавшихся три дня, была снесена часть острова и выброшена огромная масса пемзы. Облака, наполненные удушающей вулканической пылью, затмили днем небо над Батавией (теперешней Джакартой), удаленной на 160 км; затем при конденсации пара выпал грязевой дождь. Тонкая вулканическая пыль взвилась на десятки километров вверх, в стратосферу. За две недели пыль разнесло по всему земному шару, и она придала необычную окраску восходам и закатам Солнца. Судя по 65-метровой толщине несортированного и неслоистого пласта пемзы на острове Раката, общее количество изверженного материала составило около 20 км^3. Пемза выпала на площади радиусом 15 км.

Взаимодействие горячей лавы с морской водой, проникшей в кальдеру,вызвало взрыв, который слышали в Австралии,

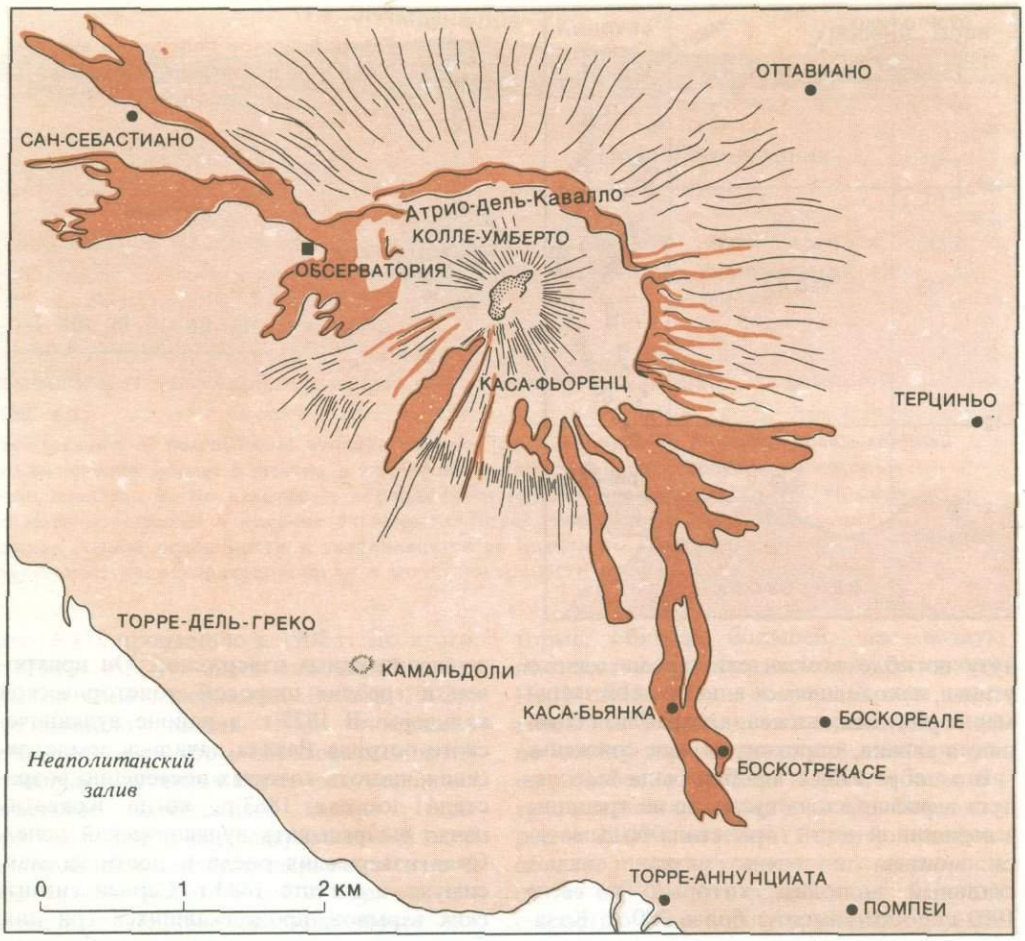


РИС. 6.18
Карта с изображением Везувия внутри вала Соммы. (По Перрэ.)

в 5000 км от Кракатау. Вызванные землетрясением морские волны – цунами высотой 40 м обрушились на соседние индонезийские острова, сея повсюду смерть и нанося большой материальный ущерб прибрежным деревням.

После того как подземный резервуар с насыщенной газами лавой был в результате этих взрывов опорожнен, поверхность быстро просела и образовался бассейн шириной около 6 км и глубиной 230 м в 1883 г. и 300 м в 1923 г. Очевидно, в возникновении цунами решающую роль играли спорадические фазы проседания, вторжение морской воды и последующие взрывы. Вследствие возобновившейся между 1927 и 1933 гг. активности на морском дне вырос шлаковый конус Анак-Кракатау. Слабые извержения отмечались также в 1972 г.

Везувий, Италия, с 79 г. Для Везувия, вероятно, наиболее знаменитого из мировых вулканов, мы располагаем длинным списком извержений в историческое время. Вулкан высотой 1400 м расположен у Неаполитанского залива, в 11 км от Неаполя (рис. 6.18). Он является наследником более древнего вулкана Соммы – горы с выемкой на месте вершины, утратившей свою верхнюю часть в доисторические времена. В настоящее время вершина Соммы представлена

лишь гребнем, частично окаймляющим полость, в которой при последующих извержениях вырос Везувий. В 79 г. н. э. Везувий, считавшийся погасшим, снова ожил. Началось с сейсмических толчков и выбросов из вершины вулканического пепла. Наконец, в ходе одного катастрофического извержения Везувий выбросил громадные облака в форме цветной капусты, состоящие из горячих газов, насыщенных вулканическими частицами. Черное облако с градом обломков опустилось на Помпеи, город с двадцатитысячным населением, расположенный в 10 км от жерла. Как раз в это время Помпеи были заново отстроены после разрушительного землетрясения 63 г. Масса людей была мгновенно удушена или отравлена горячим пепловым облаком. Куски пемзы, похожие на град частицы, называемые *лапилли* (от лат. – маленький камень), и тонкий вулканический пепел падали, пока не погребли город под слоем толщиной 6 м. Ливень на покрытых пеплом горных склонах превратил этот только что выпавший пепел в бурлящие потоки грязи, которые погребли близлежащий город Геркуланум.

В последующем отмечалось около 12 сильных извержений Везувия. В промежутках между ними люди, пренебрегая опасностью, снова селились на его плодородных склонах. Сильное извержение 1631 г. дало лавовые потоки, струи горячих газов и еще один разрушительный душ из вулканического пепла. Часть этого пепла выпала в Константинополе (теперешнем Стамбуле) на удалении 1300 км. Сильные извержения произошли также в 1872 и 1906 гг. (рис. 6.19). Везувий активен с промежутками начиная с 1906 г. В 1913 г. внутри прежней выемки образовался небольшой конус из лавы и шлака. В 1927–1929 гг. новые порции лавы переливались через край внутренней стенки Соммы, стекая по внешним склонам на расстояние 1–3 км. В 1944 г. лава, поднявшись по трещинам в дне кратера, заполнила воронку, выплеснулась за кромку и стекла вниз по склону горы через деревню Сан-Себастиано. Двумя днями позже выброшенный взрывами темный пепел распространился, по наблюдениям персонала армии США, над Неаполем и укрыл руины Помпей новым слоем почти полуметровой толщины.

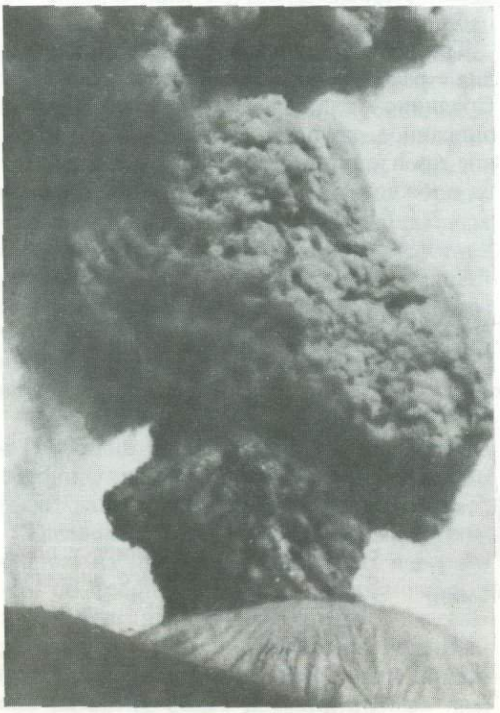


РИС. 6.19
Облако водяного пара и вулканического пепла над Везувием 14 апреля 1906 г. Поперечник облака в наиболее широкой части достигал 1 км. (Фотография Перрэ.)

ТРЕЩИННЫЕ ИЗЛИЯНИЯ

Платобазальты. Около $2{,}6 \cdot 10^6$ км^2 суши покрыто древними, доисторическими потоками лавы, поступавшей в больших объемах преимущественно не из вулканов, а из трещин подобно современным лавовым потокам Исландии. Лавовые потоки плато Декан в Индии покрывают площадь $5 \cdot 10^5$ км^2 и имеют среднюю мощность около 1000 м при максимальной мощности 3000 м. Эрозионные останцы, разбросанные у краев этого плато, указывают на то, что первоначально лавой была покрыта в два раза бóльшая территория.

Аналогичные продукты трещинных излияний на северо-западе США занимают площадь $4 \cdot 10^5$ км^2 и имеют среднюю мощность около 1000 м (рис. 6.20). Лавовые покровы еще большей мощности (5000 м) обнаружены на полуострове Кивино и острове Айл-Ройал на севере шт. Мичиган, в северном Висконсине и на северном побережье озера Верхнего. Из других мест можно назвать Аргентину, Бразилию, Исландию, Эфиопию, Сибирь, Северную Ирландию и Гренландию; следовательно, этот тип извержений заслуживает внимания.

Породы всех упомянутых областей характеризуются, подобно лавам Гавайских островов, относительно низким содержанием кремнезема (около 50%) и высоким содержанием двухвалентного железа (8–12%). Они, по-видимому, образовались из очень жидкой лавы, поскольку отдельные потоки можно проследить на расстоянии многих десятков километров. Мощность отдельных потоков обычно колеблется от 5 до 15 м, редко превышая 100 м. Они накапливались десятками – пласт за пластом (рис. 6.21). Х. С. Вашингтон, изучавший эти лавы в течение многих лет, назвал их плáтобазальтами, но не в связи с их гипсометрическим положением, которое чрезвычайно изменчиво, а из-за их обычно плоской поверхности. Однако в центральных районах шт. Вашингтон некоторые пласты базальтов были наклонены и смяты в складки при более поздних тектонических движениях.

Породы, кристаллизующиеся в самих трещинах, служащих подводящими каналами для наземных излияний, можно наблюдать в виде роев даек в стенках каньонов или в тех местах, где языки лавовых потоков размыты. В большинстве лавовых полей подводящие трещины или дайки выражены неясно или скрыты от наблюдения.

Трещинные излияния Исландии. Исландия расположена непосредственно на Срединно-Атлантическом хребте. Хорошо описанное крупное трещинное извержение произошло в 1783 г. из трещины Лаки в южной Исландии. Лава поступала из

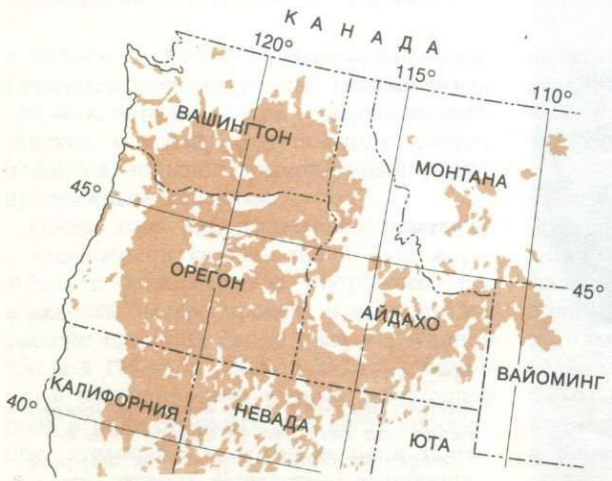


РИС. 6.20
Карта лавовых полей на северо-западе США. Возраст лав – от раннего до позднего кайнозоя. Почти все лавы имеют базальтовый или андезитовый состав. (По Геологической карте США; Геологическая служба США.)

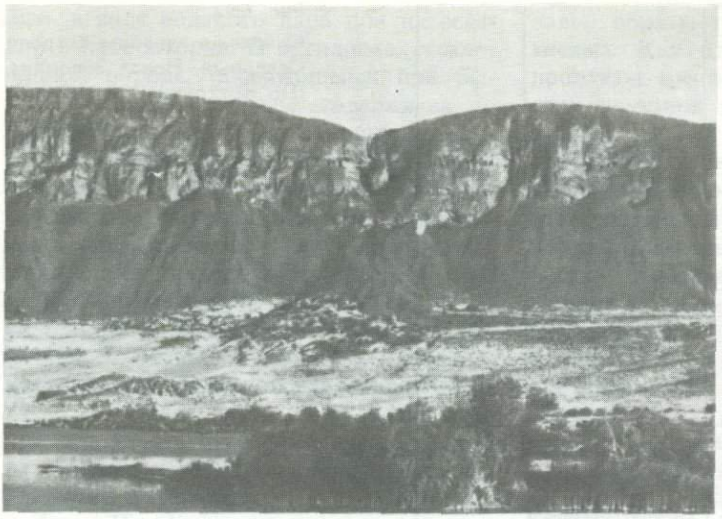


РИС. 6.21
Обнажение потоков лавы в восточных районах шт. Вашингтон. Слоистое строение обрыва – результат наслоения последовательных потоков мощностью 15–30 м каждый. В подошве обрыва образовались делювиальные конусы. (*Фотография* Департамента охраны и развития природы шт. Вашингтон.)

трещины длиной 30 км, и на протяжении двух месяцев в ходе трех основных извержений излилось около 12 км^3 базальтовой лавы. Довольно подвижная лава заполнила соседнюю долину реки Скафтау глубиной 170 м и «затопила» около 915 км^2 низменности. Потоки лавы в виде лопастей растекались на расстояние до 15–25 км от жерла, а некоторые спускались еще дальше вниз по долинам рек. *Когда излияния начали иссякать*, давление газов, вероятно в связи с частичной кристаллизацией магмы на глубине, поднялось настолько, что насыщенная газами лава вырвалась по трещине, образовав на поверхности лавового плато примерно двадцать небольших шлаковых конусов. Пепел базальтового состава объемом около 3 км^3, выпавший в окрестностях, покрыл пастбища, уничтожил тысячи голов домашнего скота, вызвал голод и смерть более 10 000 человек.

Сходное извержение вулкана Эльдгья в Исландии произошло в 950 г., когда из *трещины длиной 30 км излилось около* 8 км^3 лавы, покрывшей площадь 700 км^2.

Трещинные извержения взрывного типа. Одним из примеров взрывного извержения по трещинам может служить извержение вулкана Таравера в 1886 г. на севере острова Северного Новой Зеландии (рис. 6.22). Извержение произошло в районе развития более древних кислых лав, разбитых многочисленными трещинами. Базальтовая магма поднялась по трещине северо-восточного простирания и вырвалась на поверхность. В течение двух часов на отрезке длиной 30 км действовала дюжина кратеров. Трещина пересекала три небольших озера, и в этих местах взрывами выбрасывались рыхлые озерные отложения, а также уже к тому времени пропаренные и поэтому размягченные *более древние лавы*. Образовалась новая впадина в рельефе шириной 1,5–3,0 и длиной 5 км. Позже она была затоплена водами озера Ротомахана. Один из кратеров в этой затопленной впадине имел длину 3 км. Другие кратеры имели около 270 м в ширину, 120 м в глубину и 400–800 м в длину, а длина провала Таравера достигала 1,6 км. Выброшенный из кратеров красный и черный базальтовый шлак – обычный продукт вулканических извержений – выпал на площади около 10 000 км^2 слоем толщиной до 75 м (вблизи трещины). Основные взрывы продолжались в течение *двух часов*, а *через 24 ч они полностью* прекратились. В окрестностях озер перегретые подземные воды, внезапно превратившиеся в пар, добавили мощи этим яростным, хотя и непродолжительным взрывам. Такого типа взрывы, обусловленные наличием воды, называют *фреатическими* (от греч. phreon – родник).

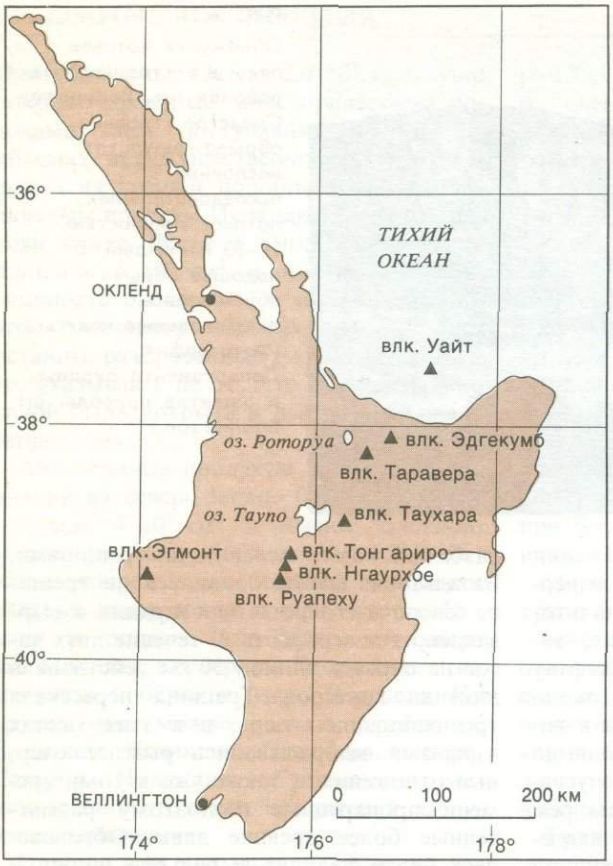


Рис. 6.22
Основные вулканы острова Северный, Новая Зеландия. (По Коттону.)

ПРОДУКТЫ ВУЛКАНИЧЕСКИХ ИЗВЕРЖЕНИЙ

Газы и их роль. Вулканы выбрасывают материал во всех трех агрегатных состояниях: газообразном, жидком и твердом. Основной газ, обычно составляющий 75–90% общего количества газов,– это водяной пар. Другие газы включают азот, кислород, водород (который, сгорая, дает воду), двуокись углерода, окись углерода, сероводород, хлор, фтор, серу, двуокись серы, борную кислоту, аммиак, метан, аргон или продукты их реакций.

Газы выполняют несколько важных функций. 1. Во время кристаллизации магмы на глубине они обеспечивают подъем давления до критической величины и в конце концов вызывают взрыв; вырываясь на поверхность, они выбрасывают сгустки[1] или фонтаны жидкой лавы и куски твердых пород разной величины (рис. 6.23). 2. Вследствие расширения газов, захваченных лавой, последняя насыщается пузырьками и вспенивается; такая сильно пористая лава называется вулканическим *шлаком*, а в застывшем состоянии – *пемзой*. 3. Высвобождающиеся на глубине газы могут вступать в реакции с породами, через которые они движутся, образуя новые минералы. 4. На поверхности из газов путем возгонки[2] образуются самородная сера, хлориды металлов, сульфиды ртути, мышьяка, сурьмы, железа и некоторые другие соединения. 5. Выход горячих газов на поверхность в фумаролах, сольфатарах и горячих источниках может продолжаться долгое время после прекращения излияния лавы.

Любая застывшая лава содержит водород и кислород, которые можно выде-

лить в виде водяного пара при нагревании в лаборатории. В обсидиане, стекловидной породе, образующейся при быстром застывании лавы, содержится по меньшей мере несколько весовых процентов воды. Одна из разновидностей вулканического стекла – перлит, или смоляной камень, при нагревании за счет расширения пара разбухает как кукурузные хлопья; из него получается хороший изоляционный материал. Вода, следовательно, должна рассматриваться как первичный компонент магмы. Поверхностные или близповерхностные воды также могут вовлекаться в вулканический процесс, участвуя во фреатических взрывах вроде тех, что произошли в вулканах Кракатау и Таравера.

Лавы. По своему химическому составу лавы образуют ряд от основных до кислых. Как отмечалось выше, жидкие продукты трещинных извержений Гавайских вулканов имеют базальтовый (основной) состав. Вязкость этих лавовых потоков вначале бывает очень низкая, и они свободно текут, но, остывая, они затвердевают; при этом образуется хрупкая твердая корка (рис. 6.24), а затем полностью отвердевшая масса. Пока растворенные в лаве газы имеют свободный выход, извержение протекает относительно спокойно, хотя временами вспенивание приводит к выбросу лавовых фонтанов и разбрызгиванию шлака вокруг жерла. Лавы срединно-океанических спрединговых хребтов также имеют базальтовый состав. Такими распространяющимися в горизонтальном направлении ла-

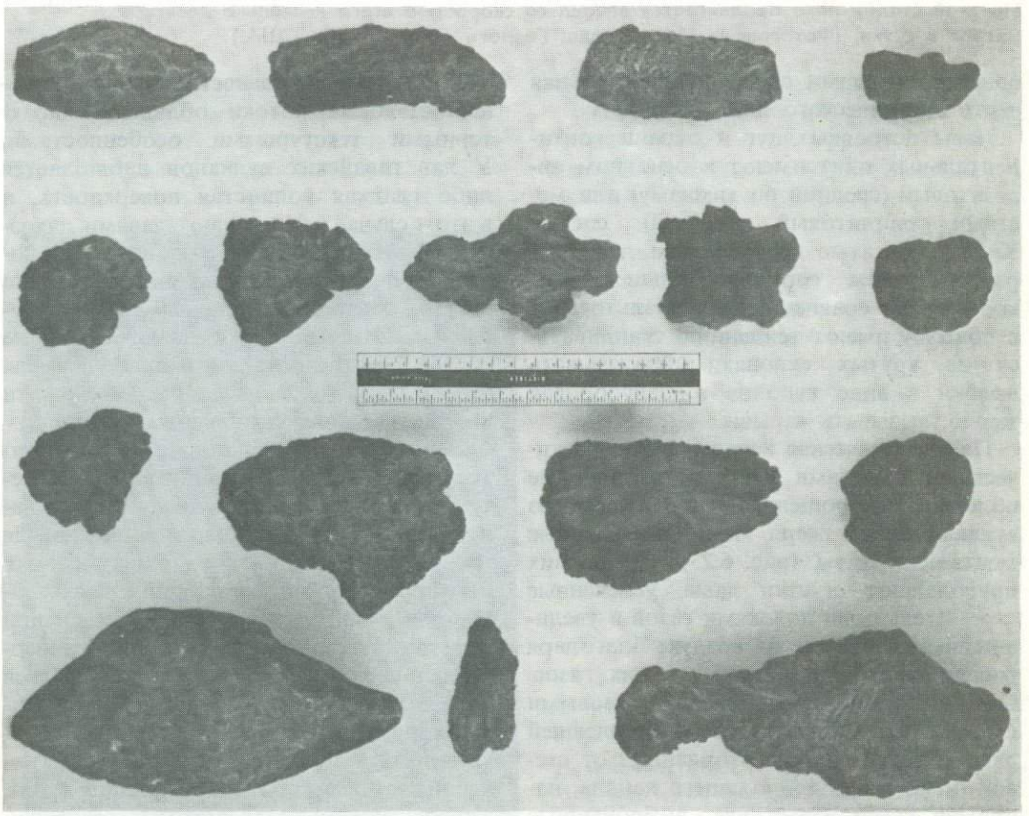


РИС. 6.23

Вулканический шлак и бомбы. Характерная веретенообразная форма бомб возникает при вращении во время полета в воздухе еще в не затвердевшем состоянии; сферические комки расплющиваются при ударе о землю.



РИС. 6.24

Наступающий фронт потока лавы, приближающийся к берегу моря, на западном склоне вулкана Мауна-Лоа, июнь 1950 г. Раскаленная добела, все еще жидкая внутри лава снова и снова устремляется вперед, взламывая затвердевающую корку. Глыбы раздробленной корки (типа аа) скатываются вниз и скапливаются перед фронтом потока. На этой стадии лава продвигается вперед со скоростью всего несколько десятков метров в сутки. (Фотография Макдоналда, Геологическая служба США.)

вовыми потоками сложена значительная часть океанического дна.

Лавы островных дуг и окраин континентальных плит имеют в основном андезитовый (средний по химизму) или местами риолитовый (кислый) состав. Кислые, богатые кремнеземом лавы характеризуются гораздо большей вязкостью по сравнению с базальтовыми и поэтому имеют тенденцию скапливаться на крутых склонах, образовывать пробки в виде куполов и, закупоривая жерло, вызывать взрывы.

Пирокластические породы. Пирокластическими породами называются твердые обломки, выброшенные при взрыве из вулканических жерл или захваченные фонтанами лавы (рис. 6.23). Среди них преобладают сгустки лавы, увлеченные стремительными потоками газов и увеличившиеся в объеме на воздухе благодаря расширению содержащихся в них газов. Обычно они переполнены газовыми пузырьками. Обломки уже затвердевшей лавы и других пород, оторванных от стенок подземного подводящего канала, например куски известняка, выброшенные Везувием, обычно составляют не более нескольких процентов от общего количества выброшенного пирокластического материала.

1 Stratigraphy

Текстурные особенности лавовых потоков. Лавовые потоки обладают характерными текстурными особенностями. У лав гавайских вулканов наблюдается либо гладкая волнистая поверхность, и в этом случае их называют лавами пахоэхоэ (рис. 6.25), либо грубая неровная поверхность, образованная беспорядочно нагроможденными шлаковидными глыбами застывшей корки лавы, и в этом случае они носят название *аа-лавы* (рис. 6.11, 6.27). В настоящее время эти названия используются повсеместно.

Некоторые потоки обладают столбчатой отдельностью, возникающей в результате уменьшения объема при остывании (рис. 6.26), другие характеризуются гребнями выдавливания, выпуклостями и гофрировкой на поверхности лавы, лавовыми полостями, образующимися при вытекании жидкой лавы из-под затвердевшей корки, наличием слепков деревьев (рис. 6.27), воронкообразными капельными конусами, формирующимися на покрытой коркой поверхности лавы при падении на нее небольших порций лавы, выбрасываемой маленькими газовыми струями.



РИС. 6.25

Волокнистая лава типа пахоэхоэ вулкана Килауэа, Гавайские острова. Этот вид текстуры образуется, когда ровные слои лавы при остывании загустевают наподобие тянучки и в таком виде окончательно затвердевают. (Фотография Менденхола, Геологическая служба США.)

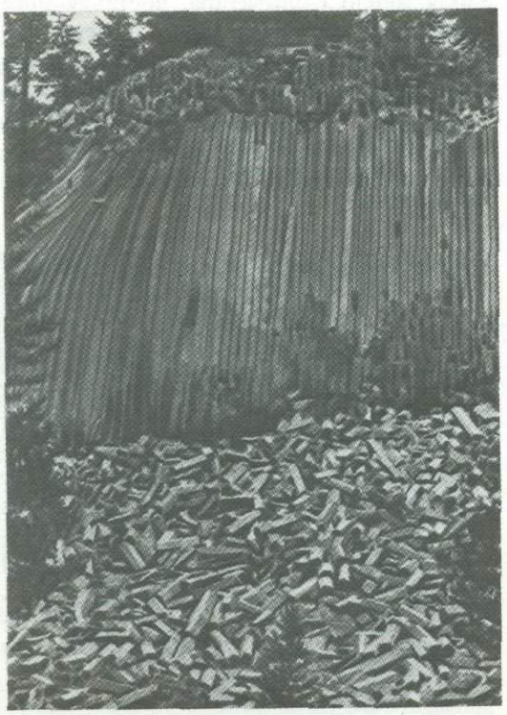


РИС. 6.26

Девилс-Постпайл («Чертов палец») в районе Маммот-Лейкс, Калифорния. Столбчатая отдельность в этих магматических породах является результатом усадки при остывании. Отдельные колонны имеют 15–20 м в длину и до 1 м в толщину. (Фотография компании «Фрэшерз».)

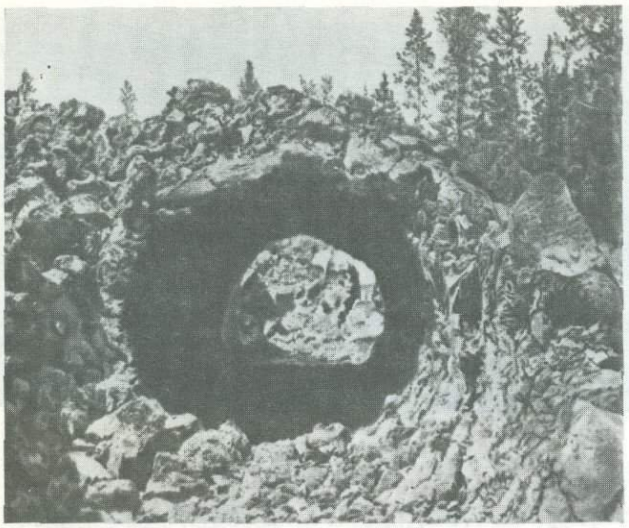


РИС. 6.27
Слепок со ствола упавшего дерева в аа-лаве в окрестностях города Бенд, Орегон. (Фотография Департамента шоссейных дорог шт. Орегон.)

ФУМАРОЛЫ И СОЛЬФАТАРЫ

Фумаролы – это жерла, через которые вырываются водяной пар и другие разогретые газы. Обычно они встречаются рядом как с действующими вулканами, так и с вулканами, находящимися в стадии покоя. Их температура колеблется от 100 до 650°С. Хотя большую часть пара дают нагретые подземные воды поверхностного происхождения, присутствие других компонентов указывает на магматический источник некоторых газов.

Сольфатары – это фумаролы, выделяющие сернистые газы. Обычным продуктом является сероводород, который на воздухе окисляется с образованием воды и самородной серы, содержание которой вблизи сольфатар может достигать промышленного значения. Хорошо известно находящееся в Италии к востоку от Неаполя жерло Сольфатара, поставляющее соединения серы. Последнее извержение этого вулкана произошло в 1198 г. С тех пор шло выделение больших количеств пара и соединений серы. Промышленная разработка вулканических эманаций с извлечением серы ведется в Италии, Мексике, Японии.

МАГМАТИЧЕСКИЕ ПОРОДЫ

Магматические породы образуются при затвердении магмы в глубинах земли или излившейся на поверхность лавы и выброшенного пирокластического материала. Поскольку эти процессы происходят в широком диапазоне условий, состав и структура возникающих пород очень разнообразны.

Широко распространены, особенно в батолитах, магматические породы, содержащие около 70–75% кремнезема, повышенное по сравнению со средним количество Al, Na и K и небольшой процент Fe и Mg. Главными минералами в порядке их значения являются ортоклаз, натриевый плагиоклаз и кварц; в меньшем количестве присутствуют роговая обманка или пироксен и биотит или мусковит. Магматические породы другого типа, такие, как базальты, содержат меньше кремнезема (примерно 50%) и большое количество Ca, Mg и Fe. Главными минералами являются кальциевый плагиоклаз, пироксен, оливин и биотит.

Гранит – кремнеземистая (кислая), базальт – основная (мафическая, базитовая) порода. Кислые магматические породы обычно имеют светлую окраску, тогда как основные – темные. Удельный вес кислых пород меньше, чем основных.

Многие магматические породы, такие, как андезиты или гранодиориты, обладают химическим и минеральным составами, промежуточными между составами кислых и основных пород. Некоторые основные породы с низким содержанием полевого шпата или вообще лишенные его называются *ультраосновными* (ультрамафическими, ультрабазитовыми). Примером могут служить дуниты (почти целиком состоящие из оливина) и перидотиты (состоящие из оливина и пироксена).

СТРУКТУРЫ МАГМАТИЧЕСКИХ ПОРОД

Под структурой магматических пород понимают величину и форму минеральных зерен или кристаллов, если они имеются, и особенности их расположения. Тип структуры зависит от скорости остывания. Выделяются следующие основные типы структур магматических пород: *стекловатая, тонкозернистая, крупнозернистая, порфировая, пегматоидная, пирокластическая, миндалекаменная.*

Стекловатая структура. Стекловатая структура образуется либо в лавовых потоках, либо в обломках, выброшенных в воздух при взрывах, когда остывание происходит настолько быстро, что атомы внутри этой массы не имеют возможности сгруппироваться в виде кристаллов минералов. Стекло с его беспорядочной некристаллической атомной структурой представляет собой, в сущности, переохлажденную жидкость. Примером широко распространенной стекловатой магматической породы может служить обсидиан (рис. 6.28). При разбухании лавы в естественных условиях еще до ее затвердения за счет расширения содержащихся в ней газов вулканическое стекло становится пористым и либо *пемзовидным* (при наличии многочисленных мелких пустот), либо *шлаковидным* (в случае более крупных пустот).

Тонкозернистая структура. Тонкозернистая структура относится к типу кристаллических структур, но зерна минералов при этом слишком малы, чтобы их можно было наблюдать невооруженным глазом. Такая структура возникает при умеренной скорости остывания в лавовых потоках, силлах или в длинных узких дайках, внедряющихся на небольшой глубине. Приповерхностные слои многих потоков лавы, имеющей тонкозернистую структуру, могут быть шлаковидными,

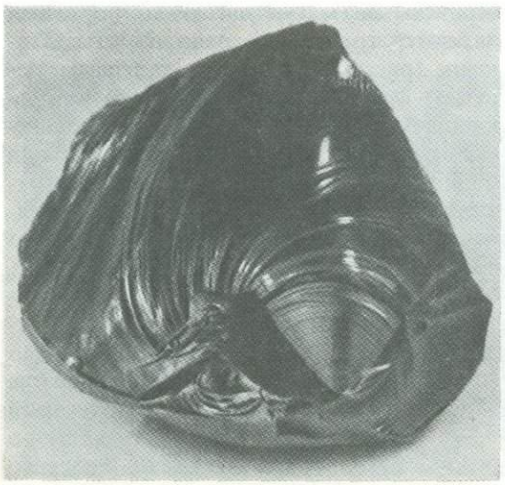


РИС. 6.28
Обсидиан – стекловатая вулканическая порода. Эта разновидность естественного стекла образуется при очень быстром остывании лавы, когда кристаллы не успевают развиться. (Фотография Института естественных наук Уорда.)

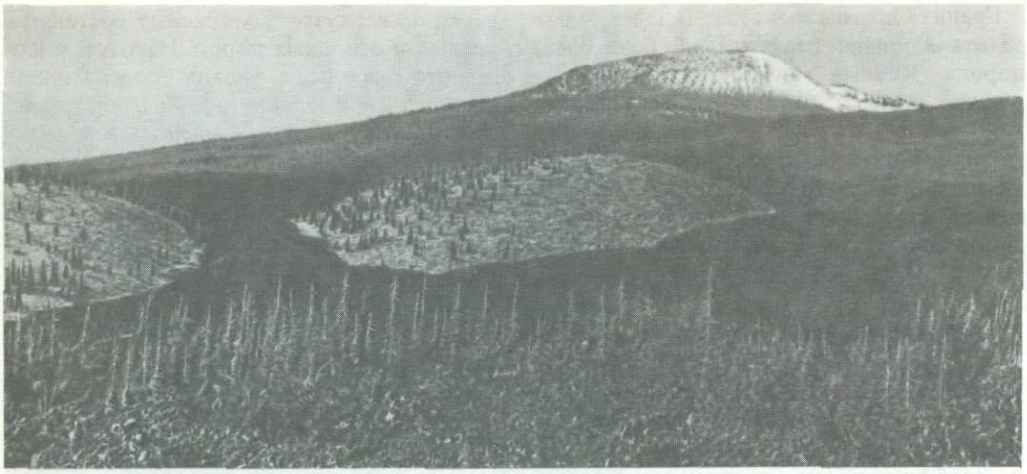


РИС. 6.29

Путь потока базальтовой лавы. Базальты – темные тонкокристаллические излившиеся магматические породы, образовавшиеся при застывании основной лавы. Этот поток лавы с глыбовым строением излился из кратера Белнап (расположен за пределами рисунка справа) на водоразделе Каскадных гор в шт. Орегон. Холм (в центре) окружен потоком. Известно, что поток геологически очень молод, так как он ложится на поверхность, выработанную ледником; его возраст, вероятно, не превышает нескольких тысяч лет. (Фотография Департамента шоссейных дорог шт. Орегон.)

а частично могут обладать и стекловатой структурой.

К наиболее обычным тонкозернистым магматическим породам относятся *базальты* (рис. 6.29). Они имеют темно-серый цвет и сложены преимущественно кальциевым плагиоклазом (лабрадором), пироксеном и иногда оливином. Базальты устойчивы к истиранию и поэтому, если их добыча обходится дешево, широко используются как бутовый камень.

Другие тонкозернистые породы отличаются от базальтов минеральным и химическим составом. Одни из них – *андезиты*, получившие название по Андам, где они пользуются широким распространением, – состоят из примерно равного количества среднего плагиоклаза (андезина) и роговой обманки или пироксена. Светлые тонкозернистые магматические породы с высоким содержанием полевого шпата и кварца получили название *риолитов* (липаритов), а в случае отсутствия кварца – *трахитов*.

Крупнозернистая структура. Крупнозернистые магматические породы образуются при медленном остывании магмы на значительной глубине, когда кристаллы успевают вырасти до таких размеров, что их легко различать и определять на глаз без помощи микроскопа. Возможность образования крупных кристаллов в богатой водяным паром или легко текучей магме выше, чем в относительно вязкой магме.

Самыми распространенными крупнозернистыми магматическими породами являются граниты и гранодиориты. *Граниты* (рис. 6.30) сложены калиевым полевым шпатом (ортоклазом или микроклином) и кварцем с небольшим количеством слюды, роговой обманки или обоих этих минералов. Может присутствовать и натриевый плагиоклаз. В среднем по составу граните содержится около 60% полевого шпата, 30% кварца и 10% остальных минералов. Так как относительное количество и размер зерен отдельных минералов меняются, известно множество разновидностей гранитов. Многие граниты имеют розовато-серый цвет благодаря высокому содержанию розового или красноватого полевого

шпата. Кварц в гранитах обычно бесцветный. Слюда в одних гранитах представлена бесцветным или белым мусковитом, в других гранитах развит зеленовато-черный биотит или мусковит и биотит вместе. В одной из разновидностей гранитов темная роговая обманка встречается вместе с биотитом или замещает его. В серых гранитах полевой шпат имеет белую или светло-серую окраску, и темные минералы на этом фоне очень заметны. Сочетание светлоокрашенных полевых шпатов с темными вкраплениями биотита или роговой обманки придает гранитам вид «соли с перцем». Граниты широко используются как строительный и декоративный материал, материал для памятников, как бутовый камень.

К породам с крупнозернистой структурой относятся гранодиориты, диориты, габбро, ультраосновные породы, сиениты. *Гранодиориты* состоят из кварца, промежуточного по составу плагиоклаза, небольшого количества ортоклаза, а также небольшого, но меняющегося количества мафических минералов – роговой обманки, пироксена или слюды. *Диориты* – это, по существу, комбинация среднего плагиоклаза (обычно андезина) и роговой обманки, пироксена или биотита; в небольшом количестве могут присутствовать также некоторые другие минералы. *Габбро* представляют собой плутонические породы темного цвета, содержащие кальциевый плагиоклаз (обычно лабрадор), пироксен (обычно авгит) и оливин и такие акцессорные минералы, как магнетит и апатит. К ультраосновным породам относятся лишенные полевого шпата *пироксениты, горнблендиты, перидотиты* и *дуниты*. Пироксениты сложены в основном пироксеном, горнблендиты – роговой обманкой, перидотиты – главным образом оливином с некоторым количеством пироксена, роговой обманки или биотита; дуниты почти целиком или даже целиком состоят из оливина. Ультраосновных пород в земной коре немного, но перидотиты и дуниты, вероятно, в изобилии присутствуют в мантии. *Сиениты* представляют собой сравнительно редкие щелочные (с K и Na) полевошпатовые породы, лишенные кварца.

Порфировая структура. Породы с порфировой структурой состоят из крупных кристаллов, называемых *фенокристаллами*, или *фенокристами*, заключенных в более мелкокристаллической массе или стекле (рис. 6.31). Порфировая структура указывает на две стадии остывания и кристаллизации: на первой стадии в магме начинается рост хорошо образованных крупных кристаллов, затем следует стадия, во время которой успевают образоваться лишь мелкие кристаллы или же кристаллы не образуются вообще. Такая двухстадийная история породы связана с перемещением частично раскристаллизованной магмы с глубины, где шло медленное остывание, к поверхности или на поверхность, где происходит быстрое охлаждение. Порфировой структурой обладают многие лавовые потоки.

Пегматоидная структура. Пегматоидная структура возникает при кристаллизации из магматических растворов, особенно

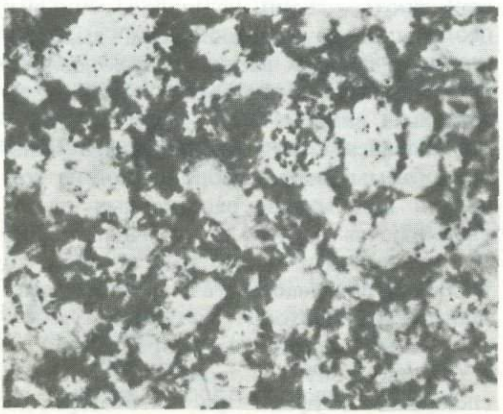


РИС. 6.30

Гранит – зернистая кристаллическая кремнеземистая (кислая) магматическая порода, образующаяся в земной коре на таких глубинах, где очень медленное остывание магмы благоприятствует росту крупных кристаллов. Светлоокрашенные минералы – полевой шпат и кварц, темноцветные – роговая обманка и биотит.

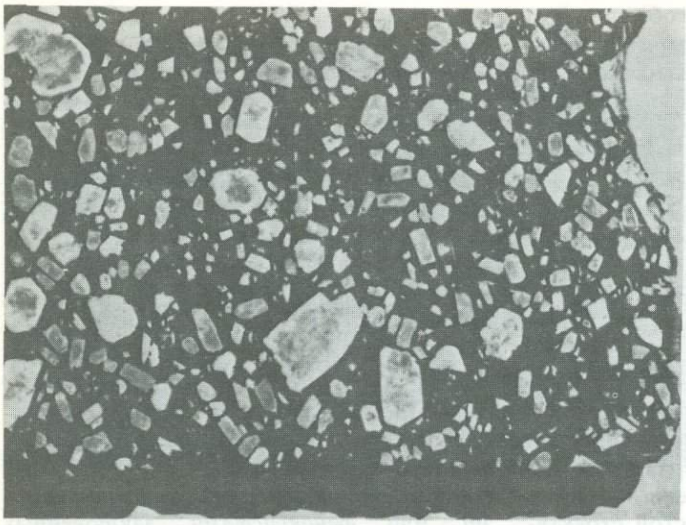


Рис. 6.31
Лава с порфировой структурой, Баннокберн, шт. Онтарио. Крупные кристаллы полевого шпата погружены в очень тонкозернистый кристаллический матрикс. Эти две группы разных по величине кристаллов образовались в разное время и в разных условиях. Фенокристаллы (крупные кристаллы) выделились из магмы первыми на большой глубине. Позже магма в виде потока лавы излилась на поверхность, где произошла быстрая кристаллизация матрикса.

богатых летучими компонентами. В таких растворах кристаллы имеют возможность вырасти в длину до нескольких *сантиметров, нескольких метров* и изредка десятков метров. Самые распространенные минералы пегматитов – ортоклаз, кварц, слюда, но в этих своеобразных породах в виде минералов встречаются также сложные соединения лития, бора, фтора, тантала, ниобия, циркония, фосфора и тория. Пегматиты служат промышленным источником полевого шпата, мусковита, драгоценных минералов (турмалина, топаза, берилла, циркона), редкоземельных элементов, а также прекрасных коллекционных образцов минералов. Для характеристики пегматитов, как правило, используются названия пород или минералов, например гранитный пегматит, кварц-мусковитовый пегматит. В некоторых пегматитах, называемых письменным гранитом, прорастания кварца и полевого шпата напоминают древнюю клинопись.

Пирокластическая структура. Пирокластическая структура возникает при выбросах лавовых фонтанов или раздробленного вещества при взрывах. Частицы, как правило, состоят преимущественно из пемзовидного или шлаковидного стекла (рис. 6.32). По размеру они колеблются от огромных блоков через вулканические бомбы, шлак, лапилли, вулканический песок и вулканический пепел до вулканической пыли. Пирокластические породы классифицируются по *форме и размеру частиц, как это указано* в табл. 6.1.

Пемза пирокластического происхождения используется в качестве абразивного материала в моющих средствах и как составная часть блоков из легкого бетона. Шлак используется для покрытия дорог в тех областях, где под рукой находятся его месторождения.

Миндалекаменная структура. Миндалекаменная структура возникает в том случае, когда газовые пустоты в шлаковидной лаве заполняются минеральным веществом. Из минералов, заполняющих пустоты в базальтах, наиболее часто встречаются кварц, халцедон, кальцит, цеолиты и другие минералы, выделившиеся из горячих водных растворов. Источником таких растворов обычно служит сама лава.

Спекшийся туф. В ряде случаев большие объемы пемзы, выброшенной из трещин в виде серии раскаленных лавин, оказываются настолько горячими и настолько мощными, что из их нижних горизонтов отжимается газ, частицы уплощаются и происходит спекание (агглютинирование) массы с превращением ее в лавоподобную породу, называемую спекшимся туфом или игнимбритом.

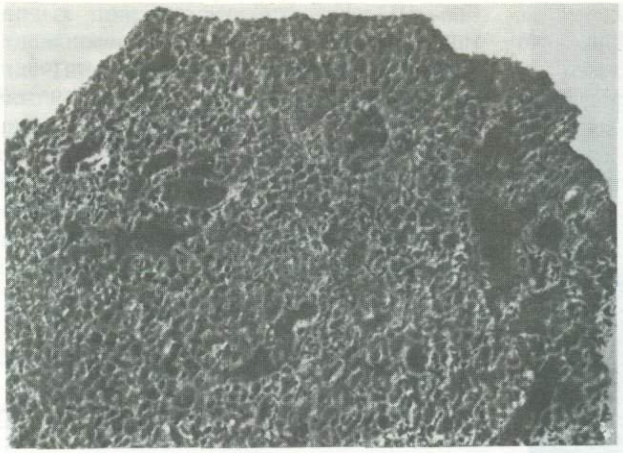


РИС. 6.32
Вулканический шлак – форма застывания пенистой лавы; многочисленные пустоты возникли в результате расширения газовых пузырьков в лаве до ее затвердевания при остывании.

Таблица 6.1

Пирокластические магматические породы

Вид материала	Рыхлые	Сцементированные
Крупные, обычно угловатые куски	Блоки	Агломерат (вблизи жерла)
Округлые частицы от нескольких сантиметров до 1 м или больше в диаметре; некоторые веретенообразной формы	Бомбы	
Частицы размером с гальку и частицы, по размеру и форме похожие на жареные кукурузные зерна	Шлак и лапилли	Вулканическая брекчия
Частицы песчаной размерности	Вулканический песок и крупный пепел	
Частицы пылевой размерности	Тонкий пепел и вулканическая пыль	Вулканический туф

Раздутые свободные частицы иногда, независимо от размера, неточно называют пемзой.

В районе Таупо – Роторуа на острове Северном Новой Зеландии объем такой массы оценивается в 830 км^3, а покрытая ею площадь составляет 13 000 км^2. В восточных районах Калифорнии так называемые туфы Бишоп распространены на площади 1000 км^2 и имеют среднюю мощность 170 м. Много местонахождений спекшихся туфов обнаружено на западе США. В них наблюдается столбчатая отдельность и их легко принять за потоки лавы.

ТЕКСТУРЫ МАГМАТИЧЕСКИХ ПОРОД

Под текстурой понимают крупные черты строения магматических пород, такие, как форма, условия залегания, наличие столбчатой отдельности и полосчатости течения, а также петроструктурные особенности. Столбчатая отдельность (рис. 6.26) развита во многих лавовых потоках плоской формы, силлах и дайках, в которых усадка, обусловленная остыванием, вызывает образование трещин, перпендику-

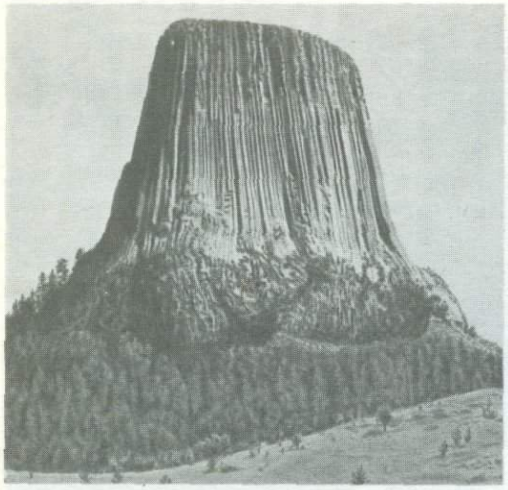


РИС. 6.33
Национальный природный памятник *Девилс-Тауэр («Башня дьявола»)* высотой 265 м в северном Вайоминге. Гигантская столбчатая отдельность образовалась в результате усадки при охлаждении. Толщина отдельных колонн в среднем 2 м, но некоторые из них достигают толщины 5 м. (Фотография Службы национальных парков.)

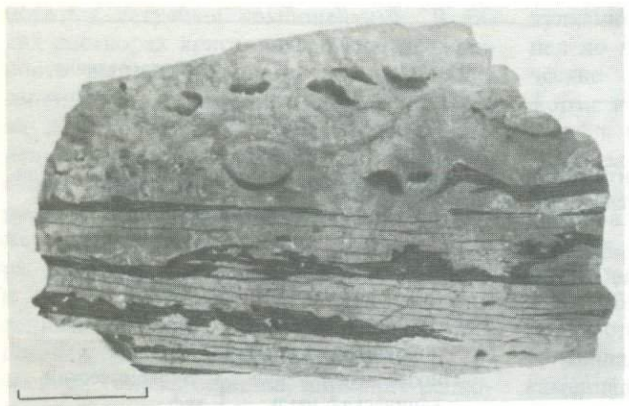


РИС. 6.34
Полосчатость течения в лаве риолитового (липаритового) *состава. Серые поля* – тонкокристаллическая масса, *черные полосы – обсидиан* (стекло). Серповидные фигуры наверху – частично замкнутые пустоты. Риолит (липарит) – излившийся эквивалент интрузивного гранита.

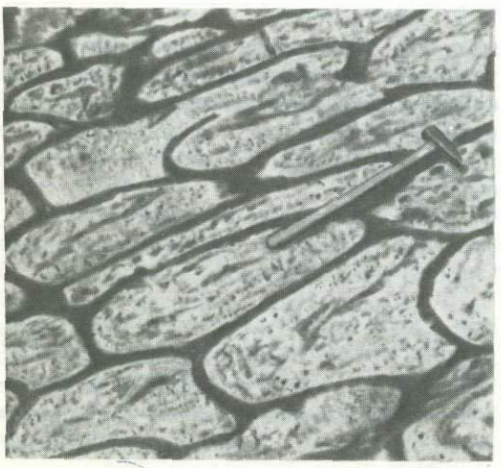


РИС. 6.35
Подушечная текстура в докембрийских базальтах подводного происхождения, Северо-Западные Территории, Канада. Этот *вид текстуры образуется при подводных* излияниях, когда происходит моментальная *закалка лавы*. (Фотография Геологической службы Канады.)

лярных поверхности остывания. Грубая отдельность наблюдается в породах Девилс-Тауэра («Башни дьявола») в Вайоминге (рис. 6.33). В плоских силлах трещины располагаются вертикально (палисейдский тип отдельности), в вертикальных дайках они горизонтальны. Полосчатость (или текстуры течения) обычно характерна для лавовых потоков, которые увлекают с собой пузырьки газов, призматические или игольчатые кристаллы, материал разного состава и цвета, располагающийся по мере движения лавы вдоль линий потока (рис. 6.34). При подводных излияниях, как, например, на срединно-океанических хребтах, в результате мгновенной закалки лавы в холодной воде образуется эллипсовидная подушечная отдельность (рис. 6.35).

КЛАССИФИКАЦИЯ ГОРНЫХ ПОРОД И ПРИЧИНЫ ИХ РАЗНООБРАЗИЯ

Магматические породы классифицируются, исходя из их структуры и минерального состава. Упрощенная схема классификации представлена в табл. 6.2. Разнообразие химического и минерального составов магматических пород может быть связано либо с первичной дифференциацией магмы, либо с последующими изменениями в магме под влиянием процессов, происходящих на глубине.

Выводы, которые могут быть сделаны на основании изучения лав. Самые распространенные лавы обладают базальтовым составом с содержанием кремнезема 50%, значительным содержанием алюминия, кальция, железа и магния и небольшим количеством натрия, калия, титана и фосфора. Базальты занимают большие площади в северо-западных районах США, в Индии, Бразилии и других странах. На срединно-океанических спрединговых хребтах базальты образуются вследствие подъема основной магмы по рифтовым трещинам. Базальтовый панцирь, связанный со спредингом прошлых эпох, подстилает тонкий чехол осадков на океаническом дне.

Температура плавления базальтов на поверхности Земли равна примерно 1200°С. На глубине температура плавления несколько повышается из-за давления, вызванного весом вышележащих пород.

Широко распространенная андезитовая лава содержит 60–65% кремнезема. Главные области ее развития – островные дуги и окраины Тихого океана.

Различие в составе и ареалах распространения базальтов и андезитов отражает различное происхождение их родоначальных магм. Судя по данным, которые получены по землетрясениям, предваряющим извержения вулканов с базальтовым составом лавы на Гавайях, базальтовая магма образуется на глубинах от 50 до 65 км или глубже в верхней мантии. Ее источником, возможно, служит низкоскоростной слой, в котором скорость распространения волн от землетрясений уменьшается в связи, вероятно, с частичным плавлением пород. Предполагается, что эта часть мантии сложена смесью пироксена, граната и небольшого количества других минералов. Для образования из этих минералов базальтовой магмы требуется только селективное плавление части этой смеси и в особенности любых водных соединений, которые могут здесь присутствовать.

Связь с тектоникой плит. Предполагают, что магма, из которой получаются циркумтихоокеанские и островодужные андезиты, образуется за счет плавления материала океанической коры (включающей базальты и океанические осадки), затягиваемой при субдукции вниз, в верхнюю мантию под океаническими желобами. Поэтому разница между базальтами и андезитами в основном рассматривается как первичная, обусловленная различием исходного материала и местом возникновения.

Источником первичного исходного ма-

Таблица 6.2
Классификация магматических пород

Структура	Минеральный состав: Кварц, ортоклаз, натриевый плагиоклаз, немного темноцветных минералов	Разные полевые шпаты, кварц, до 1/4 темноцветных минералов	Средний плагиоклаз, от 1/4 до 1/2 темноцветных минералов	Кальциевый плагиоклаз, в изобилии темноцветные минералы	Мафические минералы, полевой шпат отсутствует
Крупнозернистая	*Гранит*	*Гранодиорит*	*Диорит*	*Габбро*	*Дунит, перидотит, пироксенит*
Тонкозернистая	Риолит	Дацит	*Андезит*	*Базальт*	
Стекловатая	*Обсидиан* →				
Порфировая	← Любые из вышеуказанных →				
Пузырчатая	←	*Пемза* →	← *Шлак* →		
Пирокластическая (обломочная)	Рыхлый вулканический пепел, лапилли, бомбы; литифицированные туфы и брекчия				
Среднее содержание кремнезема SiO_2, %	72	66	57	48	42
Другие вариации химического состава	← Увеличение содержания Al, K, Na Увеличение содержания Ca, Mg, Fe →				

териала для определенного типа пород, сложенных почти целиком серпентином (серпентиниты) и ассоциирующихся с подводными излияниями базальтов в срединно-океанических спрединговых хребтах, служат, вероятно, оливин- и пироксенсодержащие породы верхней мантии.

Изменения, происходящие в магме. Существенные изменения в составе магм вызваны реакциями, дифференциацией и смешиванием. Реакционный принцип, разработанный Боуэном (1928), предусматривает реакции между кристаллами и жидкой магмой (табл. 6.3). Железомагниевые минералы образуют дискретный реакционный ряд, начинающийся с оливина и заканчивающийся биотитом. Из магмы, богатой магнием и железом, вначале кристаллизуется оливин. Оставшаяся жидкая магма при остывании реагирует с кристаллами оливина, образуя пироксен, с пироксеном – образуя амфибол, с амфиболом – образуя биотит. Если реакции не доходят до конца, в ядрах более поздних кристаллов сохраняются остатки оливина, пироксена или амфибола.

Полевые шпаты плагиоклазового ряда образуют непрерывный реакционный ряд

от богатого кальцием анортита до натриевого альбита. Изменения в этом изоморфном плагиоклазовом ряду происходят постепенно, а не в виде прерывистого процесса. При незавершенных реакциях образуются зональные кристаллы плагиоклаза с андезином внутри, окруженным каймой олигоклаза.

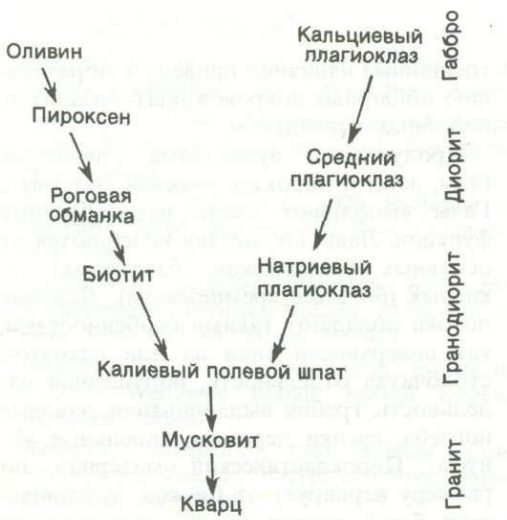
Минералы, расположенные в табл. 6.3 на одном уровне, имеют тенденцию кристаллизоваться приблизительно одновременно, отсюда ассоциация пироксена и лабрадора в базальте, амфиболов и андезина в андезите, биотита и олигоклаза или альбита (совместно с ортоклазом) в граните.

В 1962 г. Барт, известный норвежский петролог, добавил третий ряд – непрерывный реакционный ряд, включающий калиевые полевые шпаты, взаимодействующие с минералами плагиоклазового ряда.

Когда кристаллизация минералов этих реакционных рядов близка к завершению, может кристаллизоваться кварц. Остаточные водяной пар и горячие водные растворы могут продолжать взаимодействовать с минералами, что ведет к образованию таких минералов, как хлорит, серпентин, цеолиты; кроме того, эти растворы могут вызывать замещение ранее образовавшихся пород или проникать в трещины и формировать пегматитовые дайки, кварцевые жилы и рудные тела.

Таблица 6.3

Бинарный реакционный ряд[1]



[1] По *Н. Л. Боуэну, Т. Барту: N. L. Bowen*, The Evolution of the Igneous Rocks, Dover Publications, Inc., New York, 1956; *T. F. W. Barth*, Theoretical Petrology, 2d ed., John Wiley and Sons, New York, 1962. [*Имеется* перевод: *Н. Л. Боуэн*, Эволюция изверженных пород.– М.-Л.: Гос. научно-техн. горно-геол. нефт. изд., 1934; *Т. Барт*, Теоретическая петрология.– М.: ИЛ, 1956.– *Прим. перев.*]

Магматическая дифференциация. Магматической дифференциацией называется совокупность процессов, приводящих к разделению единой гомогенной магмы на фракции, из которых формируются разные типы магматических пород. Главными процессами при этом являются *фракционная кристаллизация, осаждение кристаллов* (или флотация – всплывание кристаллов), *фильтрующее выжимание, гравитационное разделение* в жидком состоянии, *отделение несмешивающихся фракций, истечение газа* (дегазация), *ассимиляция*.

Фракционная кристаллизация вызывает разделение магмы на две фракции – кристаллы и расплав. Ранняя кристаллизация оливина, пироксена и лабрадора в базальтовой магме, например, обедняет оставшийся расплав магнием и кальцием, но обогащает кремнеземом, железом и натрием. Оставшаяся жидкая фаза обладает примерно составом андезита. Если бы из нее за счет гравитационных сил или тектонических движений удалить кристаллическую фракцию, она вела бы себя как андезитовая магма. Отделение минералов, занимающих более низкое положение в реакционных рядах, вызывает дальнейшее изменение состава вплоть до получения риолитовой магмы. Этим путем из первичной базальтовой магмы, вероятно, образуются некоторые лавы промежуточного или кислого состава. В базальтовой магме, однако, недостаточно щелочей, особенно калия, для образования в заметном количестве риолитов.

Фракционная кристаллизация может сопровождаться осаждением кристаллов в магматической камере и фильтрующим выжиманием интерстициальной жидкой

фазы из почти уже твердого кристаллического каркаса.

Гравитационное разделение жидкой магмы может идти в высоких колоннообразных камерах, в которых наверху, как сливки на молоке, скапливаются летучие элементы, щелочи и кремнезем. Отделение несмешивающихся фракций играет ограниченную роль, так как почти все силикатные расплавы свободно смешиваются. Этим процессом можно, однако, объяснить образование некоторых сульфидных руд предположительно магматического происхождения.

Истечение газа заключается в перемещении пузырьков газов вверх через магму с выносом захваченных кристаллов и вытягиванием наверх интерстициальной жидкости.

Ассимиляция – это поглощение магмой твердых пород, окружающих интрузию, особенно в случае магм, образующихся в зонах субдукции и затем поднимающихся к поверхности. Растворение вмещающих пород может существенно менять состав магмы. Ассимиляция известняков на Везувии дала гибридную магму, пересыщенную кальцием. Это привело к кристаллизации кальциевых силикатов, удалению кремния и в конце концов к кристаллизации обедненных кремнием щелочных пород.

Смешивание двух магм, находящихся на разных стадиях кристаллизации, приводит к образованию неравновесных минеральных ассоциаций. Пемза Долины Десяти Тысяч Дымов на Аляске служит примером такого рода смеси белой пемзы риолитового состава и темного андезитового шлака, берущих начало от двух пенистых магм, выброшенных совместно.

Итак, какого бы происхождения ни были магмы, они подвергаются реакциям, многократным процессам дифференциации и ассимиляции постороннего вещества, смешиванию. В результате из них образуется широкий спектр магматических пород.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ

Магма образуется в земной коре или в верхней мантии. Необходимое тепло, как полагают, обеспечивается радиоактивным распадом урана, тория и калия-40, хотя, возможно, дополнительными поставщиками тепла служат и другие внутриземные источники. Магма поднимается благодаря давлению сбоку и сверху более тяжелых твердых пород. Из магмы образуются как неглубокие интрузии, такие, как дайки, силлы и вулканические некки, так и первично глубоко залегающие батолиты и штоки.

Магматический материал выбрасывается на поверхность Земли вулканами или по трещинам. Вулканические постройки образуют ряд от лавовых конусов через сложно построенные стратовулканы до шлаковых конусов.

Вулканы, активные в историческое время, характеризуются разным поведением; примером могут служить Везувий, Кракатау, Мон-Пеле, Суртсэй и др. Древние трещинные излияния привели к образованию обширных покровов платобазальтов, подобных исландским.

Продуктами вулканизма являются газы, лавы и пирокластический материал. Газы выполняют очень разнообразные функции. Лавы по составу колеблются от основных (мафических, базитовых) до кислых (богатых кремнеземом). Лавовые потоки обладают такими особенностями, как поверхности типа аа или пахоэхоэ, столбчатая отдельность, подушечная отдельность, гребни выдавливания, лавовые погреба, слепки деревьев, капельные конусы. Пирокластический материал по размеру варьирует от блоков, вулканических бомб, кусков шлака, лапиллей до вулканического песка и вулканической пыли.

Столетиями продолжается выделение водяного пара и многих других вулканических газов из фумарол и сольфатар. Местами они служат промышленными

источниками геотермальной энергии и серы.

Магматические породы очень разнообразны. Часть их имеет кислый (кремнеземистый), часть – средний, часть – основной (мафический, базитовый), часть – ультраосновной (ультрамафический, ультрабазитовый) состав. В зависимости от условий остывания их структура может быть стекловатой, тонкозернистой, крупнозернистой, порфировой, пегматоидной, пирокластической, миндалекаменной. В текстуре магматических пород учитывается форма, условия залегания, столбчатая отдельность, полосчатость течения, петроструктурные особенности.

Магматические породы классифицируются с учетом их структуры и минерального состава. Их разнообразие обусловлено первичным различием магм, происходящими в них реакциями, ассимиляцией окружающих пород, смешиванием магм, а также дифференциацией (при фракционной кристаллизации, осаждении кристаллов, фильтрующем выжимании, гравитационном разделении в жидком состоянии, отделении несмешивающихся фракций, истечении газа).

ВОПРОСЫ

1. Как возникает магма?
2. Расскажите о стадиях, которые может проходить магма при ее остывании и кристаллизации.
3. Расскажите о значении структуры для классификации магматических пород.
4. Какие типы текстур встречаются в магматических породах?
5. Что может сказать нам структура и текстура об образовании магматических пород?
6. Назовите типы вулканической деятельности.
7. Как связаны между собой процессы магматизма и тектоника плит?

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Bullard F. M., 1962, Volcanoes: In History, in Theory, in Eruption, Univ. of Texas Press, Austin.

Cotton C. A., 1944, Volcanoes as Landscape Forms, Whitcombe and Tombs, Ltd., Wellington, New Zealand.

Dott R. H., Jr., Batten R. L., 1976, Evolution of the Earth, 2d ed., McGraw-Hill Book Company, New York.

Foshag W. F., González R. J., 1956, Birth and development of Paricutin Volcano, Mexico, U. S. Geol. Surv. Bull. 965-D, pp. 355–489.

Gunnarsson A., 1973, Volcano-Ordeal by fire in Iceland's Westmann Islands, Iceland Review, Reykjavik, Iceland.

Herbert D., Bardossi F., 1968, Kilauea: Case History of a Volcano, Harper and Row, Publishers, Inc., New York.

Johnson R. W., 1976, Volcanism in Australasia, Elsevier Scientific Publishing Company, New York.

Leet L. D., 1948, Causes of Catastrophe, McGraw-Hill Book Company, New York.

Macdonald G. A., 1972, Volcanoes, Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs, N. J.

Macdonald G. A., Abbott A. T., 1970, Volcanoes in the Sea – The Geology of Hawaii, Univ. of Hawaii Press, Honolulu.

McKee B., 1972, Cascadia: The Geologic Evolution of the Pacific Northwest, McGraw-Hill Book Company, New York.

Menard H. W., 1964, Marine Geology of the Pacific, McGraw-Hill Book Company, New York.

Ollier C., 1969, Volcanoes, The M. I. T. Press, Cambridge, Mass.

Rittman A., 1962, Volcanoes and their Activity, 2d ed., John Wiley and Sons, Inc., New York.

Williams H., 1941, Calderas and their origin, Calif. Univ. Pub. Dept. Geol. Sci. Bull. vol. 25, pp. 239–346.

Williams H., 1941, Crater Lake: The Story of Its Origin, Univ. Calif. Press, Berkeley.

Изверженные породы

Bayly B., 1968, Introduction to Petrology, Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs, N. J.

Carmichael I. S., Turner F. J., Verhoogen J., 1974, Igneous Petrology, McGraw-Hill Book Company, New York.

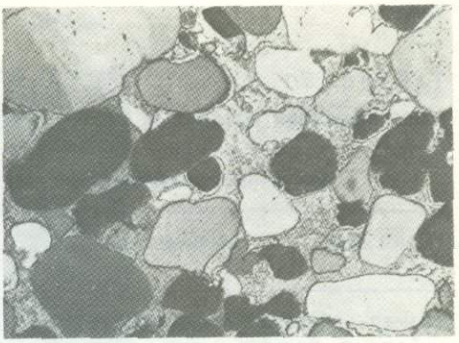
Jackson K. C., 1970, Textbook of Lithology, McGraw-Hill Book Company, New York.

Spock L. E., 1962, Guide to the Study of Rocks, 2d ed., Harper and Row, Publishers, New York.

Tindall J. R., Thornhill R., 1975, The Collector's Guide to Rocks and Minerals, Van Nostrand Reinhold Company, New York.

Turner F. J., Verhoogen J., 1960, Igneous and Metamorphic Petrology, 2d ed., McGraw-Hill Book Company, New York.

Williams H., Turner F. J., Gilbert C. M., 1954, Petrography, McGraw-Hill Book Company, New York.



7 ОСАДКИ И ОСАДОЧНЫЕ ПОРОДЫ

Частицы пород, перемещаемые реками, ледниками и ветром, в конце концов отлагаются в виде слоев над породами, залегающими ниже. Вместе с неорганическим веществом может отлагаться материал органического происхождения. Такие слоистые неконсолидированные образования называются *осадками*. Со временем слои осадков, подвергшиеся консолидации и литификации, превращаются в осадочные породы (табл. 7.1).

Три четверти суши на нашей планете покрыты осадками и осадочными породами и только одна четверть – магматическими и метаморфическими породами. Дно большинства озер и рек выстлано покровом осадков, а поверхность морского дна заключает огромные площади, на которых осадки накапливались в течение миллионов лет, с тем чтобы в конечном счете переместиться в результате спрединга в зоны субдукции.

На некоторых участках суши осадочные породы имеют мощность тысячи метров; ими создана бóльшая часть континентального рельефа. В Большом каньоне, в долине Миссисипи и во многих других местах осадочные породы залегают горизонтально. Однако в большинстве горных районов слои обычно наклонены под разными углами. Некоторые из этих районов, такие, как Гарден-оф-зе-Годс («Сад богов») и государственный парк Ред-Рокс («Красные скалы») у восточного окончания Скалистых гор в Колорадо, обладают в высшей степени

Таблица 7.1

Классификация осадочных пород

Обломочные (кластические) породы		Хемогенные и органогенные породы	
Размер зерен	Порода	Химический или биохимический состав	Порода
Размер обломков 2 мм и больше (мелкий гравий, гальки, булыжники, валуны)	*Конгломерат* в случае округлых обломков, например кварцевый конгломерат *Брекчия* в случае угловатых обломков, например кварцевая брекчия	Карбонатные минералы, например кальцит ($CaCO_3$)	Известняк
		Сульфатные минералы	Гипс
Зерна песчаной размерности, 0,0625–2 мм	Все разновидности называются *песчаником*, например кварцевый песчаник	Железосодержащие минералы	
Зерна алевритовой размерности, 0,0039–0,0625 мм	Все разновидности называются *алевролитом*, например кварцевый алевролит	Минералы кремнезема	Кремень
Зерна глинистой размерности, меньше 0,0039	Все разновидности называются *сланцеватыми глинами* или *аргиллитами*, например красная сланцеватая глина	Органические соединения	Уголь

живописным, как будто бы специально «высеченным из камня» ландшафтом.

В осадочных породах заключены полезные ископаемые, в которых мы постоянно нуждаемся, например нефть, природный газ, каменный уголь. Осадочные породы поставляют керамические глины, строительный материал, удобрения, сырье для химической промышленности, составные части бетона, руды ряда металлов, в том числе железа, алюминия, марганца, титана.

Осадочные горные породы в особенности полезны для расшифровки истории Земли. Содержащиеся в них окаменелые остатки организмов представляют собой летопись истории жизни на Земле (рис. 7.1). В противоположность им магматические и метаморфические породы содержат очень мало окаменелостей. По заключенным в осадочных породах окаменелостям может быть определен их относительный возраст. Многие осадочные породы имеют такие текстурные особенности, которые дают ключ к расшифровке условий их образования. С помощью таких текстур геологи могут воссоздать необычайно сложную геологическую историю той или иной области.

ПРОИСХОЖДЕНИЕ ОСАДКОВ

Большинство осадочных пород является продуктом выветривания и размыва материала ранее существовавших пород. Меньшая часть осадков происходит из органического материала, вулканического пепла, метеоритов, минерализованных вод. Разрушенные в результате механического и химического выветривания породы переносятся реками, ветром, ледниками, путем гравитационного переноса



РИС. 7.1
Скопление окаменелых раковин в слое глинистого песчаника. (Фотография Ли, Геологическая служба США.)

и в конечном счете отлагаются в виде осадков. Бóльшая часть материала переносится в форме твердых частиц, но часть осаждается из растворов (табл. 7.1). Каждый поток – маленький ли это ручеек или большая река – несет обломки горных пород вниз по течению. Крупный материал катится по дну реки, тонкий переносится во взвешенном состоянии, а растворимое вещество транспортируется в растворенном виде.

Каждый день миллионы тонн осадков выносятся в озера и океанические бассейны. Только одна Миссисипи переносит и откладывает в дельте ежегодно около 3,2 км^3 осадков. Большое количество песка и гравия, переносимого реками, периодически откладывается в виде песчаных баров, островов или слоев в застойных участках речных русел. Эти недолговечные отложения могут быть смыты снова во время паводка, когда и объем и скорость потока возрастают.

ИСТОЧНИКИ ОСАДОЧНОГО МАТЕРИАЛА

Основываясь на источниках осадочного материала, можно различить осадки *терригенные*, осадки *органического*, *вулканического*, *магматического* и *внеземного* происхождения (рис. 7.2). Ниже кратко рассматривается каждый из этих типов осадков.

Терригенные осадки. В эту группу входит весь поступающий с суши материал (табл. 7.2). Терригенные осадки состоят как из твердых частиц, так и из химически осажденного вещества (карбонаты кальция и магния, окислы железа и марганца, фосфаты, хлористый натрий – поваренная соль, нитраты). Некоторые выпадающие из растворов неорганические осадки с трудом можно отличить от аналогичных по составу осадков биохимического происхождения. Терригенный материал, как твердый, так и растворенный, является продуктом выветривания и размыва горных пород всех типов.

Осадки органического происхождения. Различают два вида органогенных осадков. В одном случае они сложены скелетными частями организмов, такими, как кости, зубы, раковины моллюсков или простейших (твердый наружный скелет крошечных беспозвоночных). Эти образования представлены карбонатом кальция и магния, фосфатами, окислами железа и кремния. В другом случае органогенные осадки состоят из углеродистого вещества, созданного растениями. Осадки такого происхождения обычно сложены частично разложившимися растительными остатками.

Осадки вулканического происхождения состоят из материала, образовавшегося при извержении вулканов и отложившего-

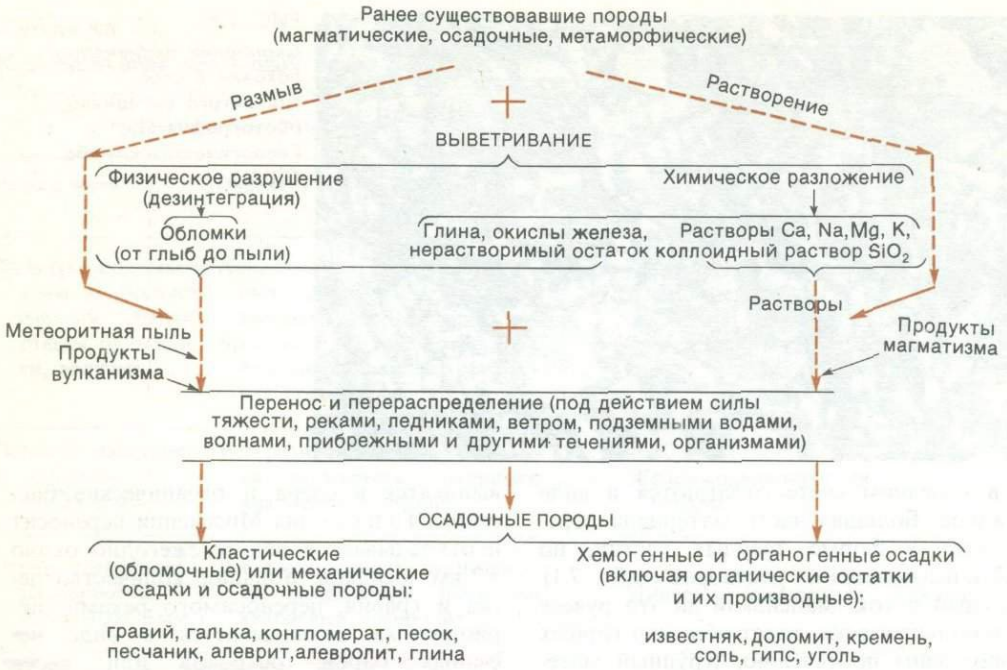


РИС. 7.2

Происхождение осадочных пород.

Таблица 7.2

Материал, слагающий осадочные породы

Первичные компоненты		Вторичные компоненты	
Обломочные	Выделившиеся химическим путем	Привнесенные	Образовавшиеся в процессе изменения породы
Обломки пород	Кальцит, другие карбонаты	Опал, халцедон	Кварц
Кварциты	Опал, халцедон (кварц)	Кварц	Гематит
Граниты	Лимонит	Карбонаты	Слюдистые минералы
Гнейсы	Гематит	Гипс	Хлорит
Кристаллические сланцы, филлиты, глинистые (аспидные) сланцы	Глауконит	Гидроокислы железа	Доломит
Песчаники	Окислы марганца		Ангидрит
Грубые пирокластические породы (вулканические бомбы, обломки)	Карбонатный материал		Пирит
Осколки стекла, вулканический пепел	Галит		Графит
Зерна минералов	Гипс		Глауконит
Кварц	Ангидрит		
Халцедон, кремень, яшма			
Полевой шпат			
Мусковит			
Магнетит, ильменит			
Гранат			
Роговая обманка, пироксен			
Глинистые минералы			

ся в виде осадочных слоев на суше или в акваториях. Они сложены тонким вулканическим пеплом, пылью или более крупными частицами, а в отдельных случаях – продуктами размыва лавовых потоков. Материал вулканического происхождения обычно смешивается с обломочным терригенным материалом. Иногда на расстоянии сотен километров от вулканических аппаратов обнаруживаются почти чистые слои измененного вулканического пепла, называемого *бентонитом*, переслаивающегося с отложениями терригенного или химического происхождения.

Осадки магматического происхождения. Осадочный материал магматического происхождения переносится в виде растворов или суспензии горячими магматическими водами. Часть этого материала достигает поверхности в местах выхода горячих источников и гейзеров, воды которых могут откладывать осадки на поверхности суши, как это наблюдается в Йеллоустонском парке.

Материал внеземного происхождения. Внеземной материал поступает из космического пространства и в основном является результатом разрушения метеоритов, проходящих через земную атмосферу. Эти частицы отлагаются в виде очень тонкой пыли на суше и в море. Более крупные обломки метеоритов временами врезаются в Землю, но в осадочных породах они встречаются крайне редко. Метеоритный материал обнаружен во льду и на поверхности льда в Антарктиде, в глубоководных осадках и в других местах.

Другое природное образование, так называемые *тектиты*, также встречается в глубоководных осадках и изредка на суше. Они представляют собой гладкие округлые разноцветные стекловидные частицы размером от песчаных зерен до тел весом больше килограмма. Предполагается, что тектиты обладают внеземным происхождением и являются либо частицами, выброшенными с лунной поверхности при ударах метеоритов, либо частицами земного материала, образовавшимися при ударах метеоритов о поверхность самой Земли.

ТИПЫ ОСАДОЧНОГО МАТЕРИАЛА

Осадочный материал может быть разделен на три большие группы: 1) обломочный материал, перемещаемый в виде твердых частиц, 2) хемогенные осадки, образующиеся при выпадении из растворов, и 3) органогенные осадки, создаваемые организмами, которые захороняются совместно с неорганическим (химическим и обломочным) материалом.

Таблица 7.3

Классификация осадочных частиц по величине обломков

Название обломочного материала	Диаметр, мм	Осадочная порода
Валун	Больше 256	Конгломерат (в случае округлых обломков)
Крупная галька, булыжник	64–256	
Галька	4–64	Брекчия (в случае угловатых обломков)
Мелкий гравий	2–4	
Песок	1/16–2	Песчаник
Алеврит	1/256–1/16	Алевролит
Глина	Меньше 1/256	Сланцеватая глина или уплотненная глина — Аргиллит

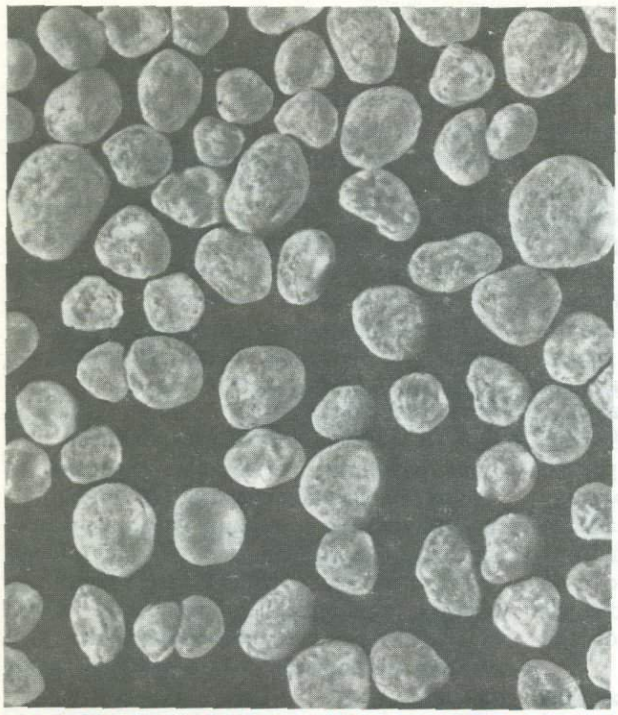


РИС. 7.3
Обломочные зерна кварца песчаной размерности, окатанные в результате истирания во время переноса ветром или водой.

ОБЛОМОЧНЫЕ ИЛИ КЛАСТИЧЕСКИЕ ОСАДКИ

По величине обломков твердые продукты выветривания колеблются от глыб горных пород до мельчайшего материала глинистой размерности (табл. 7.3). Эти твердые обломки существовавших прежде горных пород, перемещенные в ходе эрозии, называются обломочными или кластическими осадками. Огромные блоки и глыбы передвигаются агентами эрозии с трудом, в то время как наиболее мелкие частицы могут переноситься на сотни километров за пределы суши и откладываться в море. Крупные обломки в ходе транспортировки имеют тенденцию отставать в своем движении, подвергаясь при этом повторному выветриванию. В результате обломочный материал обычно сортируется и накапливается в виде осадков, состоящих из частиц примерно одинакового размера.

Название обломочным частицам дается, как это видно из табл. 7.3, в зависимости от их размера. При интенсивном переносе частицы обычно окатываются и приобретают округлую форму (рис. 7.3), если только раскалывание по новым трещинам не приводит к образованию острых краев. Размер и форма частиц в совокупности со степенью их консолидации служат основой для классификации обломочных пород, приведенной в табл. 7.1. Заметим, что в применяемых для обозначения обломочных пород названиях отражен размер слагающих их частиц. Минеральный состав зерен учитывается при наименовании отдельных видов песчаников.

Все обломочные осадочные породы характеризуются кластической (обломочной) структурой. Если вокруг зерен или в промежутках между ними осаждается минеральное вещество, порода становится литифицированной (рис. 7.4). Обломочное происхождение некоторых известняков, имеющих вид хемогенных осадков, определяется по кластической структуре обломков окаменелых раковин.

Во время переноса частиц гравийной, песчаной, алевритовой или глинистой размерности происходит их сортировка по размеру. В том случае, если река разгружается в бассейне со спокойной водой, гравийные частицы откладываются у берега, песок несколько дальше, а ил (соответ-

ствующий алевриту и глине) еще дальше от берега. За зоной накопления кластического материала могут формироваться отложения карбоната кальция путем химического осаждения или в виде скопления известковых раковин. Таким образом, зоны с осадками разного состава и разной размерности частиц располагаются последовательно, образуя полосы, приблизительно параллельные берегу.

Эта строгая схема процесса седиментации нарушается, однако, благодаря изменчивому количеству поступающих осадков и воздействию волн и течений. В связи с этим материал в осадках резко бывает строго однородным. В гравийных отложениях обычно содержится песок; к песку примешивается алеврит или глина; алеврит и глина часто содержат тонкий песок или некоторое количество известкового материала. Сортировка по величине оказывается несовершенной из-за разницы в форме и удельном весе частиц, недостатка времени для завершения процесса естественной сортировки, изменений в режиме транспортировки.

Конгломерат. Несцементированные *округлые* осадочные частицы крупнее 2 мм в диаметре относятся к частицам гравийной размерности (гравий). Литифицированный гравий, обычно консолидированный в результате цементации, называется *конгломератом*[1] (рис. 7.5). Во многих конгломератах галька представлена кварцем, кварцитом или другими кремнистыми породами, поскольку этот материал отличается большой устойчивостью по отношению к процессам разрушения и выветривания. Галька конгломератов может, впрочем, состоять из любых пород; есть, например, конгломераты с гранитной галькой, известняковые конгломераты.

Изредка в гальке, гравии, песке или конгломерате содержатся включения ценных рудных минералов, образующих скопления, которые можно выгодно разрабатывать. В форме россыпных месторождений встречаются олово, золото, титан и некоторые другие элементы. В речных и пляжных отложениях Южной Африки заключены рентабельные месторождения алмазов, а на территории Шри Ланки (о. Цейлон) из речных отложений добывают сапфиры.

Брекчией называется консолидиро-

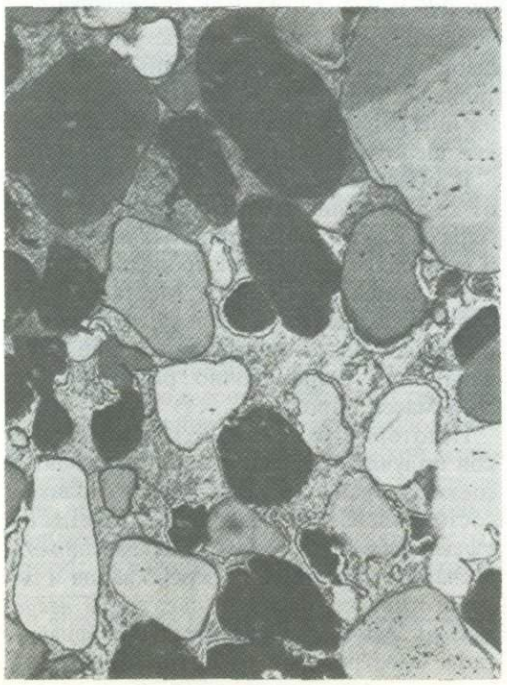


РИС. 7.4

Шлиф известкового песчаника, в котором песчаные зерна сцементированы кальцитом, отложенным из раствора в промежутках между зернами.

[1] В отечественной литературе сцементированная порода, состоящая из частиц гравийной размерности (от 2 до 10 мм), обычно называется гравелитом; конгломератом называют породу, сложенную галькой (размер 10–100 мм).– *Прим. перев.*

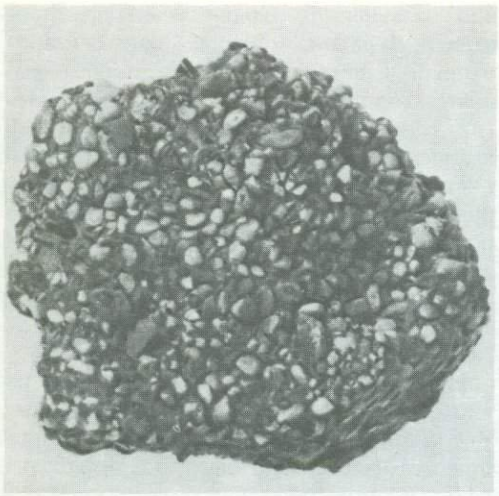


РИС. 7.5
Конгломерат – осадочная порода, состоящая из округлых сцементированных частиц гравийной размерности.

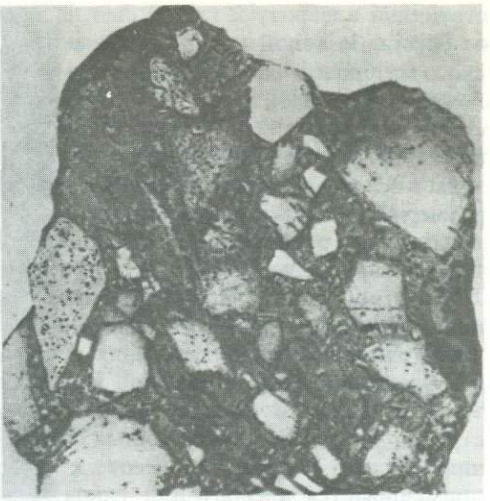


РИС. 7.6
Брекчия – порода, состоящая из сцементированных угловатых обломков. Угловатая форма обломков свидетельствует о том, что они совсем или почти совсем не подвергались истиранию во время переноса.

ванный агрегат *угловатых* обломков крупнее 2 мм в диаметре (размерности мелкого гравия, гальки, булыжников, валунов) (*рис. 7.6*). *Брекчии обычно накапливаются* очень близко от источников поступления обломочного материала, например в основании обрывов и скал, вблизи приразломных уступов, в крутых руслах горных потоков. Они могут формироваться также при образовании тектонических разрывов в горных породах и при обрушении сводов пещер.

Песчаник. Песок представляет собой агрегат обломочных зерен от 1/16 до 2 мм в диаметре. Большинство зерен песка состоит из кварца, хотя они могут быть представлены многими другими минералами и тонкоизмельченными обломками горных пород. В результате консолидации или литификации песок превращается в песчаник. Цементирующим материалом чаще всего служит кремнезем (кварц или кремень), но это могут быть также кальцит (рис. 7.4), доломит или окислы железа. Железистый цемент обычно окрашивает породу в желтый, коричневый или красный цвет. Некоторые песчаники отличаются высокой плотностью вследствие того, что песчаные зерна плотно цементируются глиной (литификация путем уплотнения). В зависимости от длительности переноса песчаные зерна могут быть угловатыми (*неокатанными*), *полуокатанными* и окатанными (рис. 7.3). Во время переноса на их поверхности могут образоваться мелкие шероховатости – впадины и выступы.

В обнажениях наблюдаются переходы от крупнозернистых песчаников в конгломераты или от тонкозернистых песчаников в еще более тонкие алевролиты, сланцеватые глины и аргиллиты. Местами в песчаниках встречается галька, концентрирующаяся вдоль поверхностей напластования или беспорядочно рассеянная по всей массе породы.

Некоторые разности песков и песчаников получили названия по минеральному составу зерен. Песчаник, почти целиком состоящий из зерен кварца, называется *ортокварцитом* или *кварцевым песчаником*, песчаник, состоящий из зерен кварца и полевого шпата, – *аркозом* (*аркозовым песчаником*). Аркозы образуются при физическом выветривании гранитов и гнейсов с

их последующим размывом и переносом обломков. Красная окраска некоторых аркозов обусловлена розовым цветом калиевого полевого шпата (ортоклаза); в ряде песчаников окраска связана с окислом железа (гематитом). *Граувакки* (*граувакковые песчаники*) состоят из зерен кварца, полевого шпата и обломков горных пород в тонкозернистой массе (*больше 15%*). Граувакковые песчаники, как правило, темнее других песчаников. Они ассоциируются с морскими глинистыми породами, вулканическим материалом, кремнистыми породами, подводными лавами. Судя по составу, источником сноса для них являлись участки суши с сильно расчлененным рельефом, сложенные умеренно выветрелыми магматическими и метаморфическими породами. Граувакки часто обладают ритмичной слоистостью, указывающей на их отложение из подводных мутьевых потоков. Существует еще одна разновидность песчаников – *зеленые*, или *глауконитовые*, *песчаники*. Их зеленый цвет связан с минералом глауконитом (сложным силикатом железа), который накапливается вместе с обломочными зернами кварца и других минералов в мелководной морской обстановке.

Алевролитом называется консолидированная осадочная порода, сложенная частицами алевритовой размерности. Зерна алевролита слишком малы, чтобы их можно было различить невооруженным глазом (1/16–1/256 мм), но алевролиты шероховаты на ощупь[1]. Слоистость в них может быть очень тонкой, и вследствие этого в обнажениях не всегда легко с уверенностью отличить алевролиты от аргиллитов и других глинистых пород.

Сланцеватые глины, уплотненные глины и аргиллиты. Термин «уплотненная глина» используется многими геологами для обозначения пород, состоящих из частиц глинистой размерности и характеризующихся отсутствием плитчатости и тонкой слоистости. Тонкозернистые породы, содержащие некоторое, строго не фиксированное количество алевритовых и/или глинистых частиц, называются глинисто-алевритовыми породами. К сланцеватым глинам относится консолидированный материал, состоящий преимущественно из обломочных частиц размером меньше 1/256 мм в диаметре и обладающий плитчатостью или тонкой слоистостью. В минералогическом отношении бóльшая часть обломочных частиц размером менее 1/256 мм представлена кварцем, в подчиненном количестве присутствуют полевой шпат, глинистые и слюдистые минералы. Наиболее обычными глинистыми минералами являются каолинит, монтмориллонит и иллит. При выветривании базальтов, известняков, доломитов и сланцеватых глин могут образоваться глинистые минералы или материал глинистой размерности без сколько-нибудь существенной примеси песчаных зерен. Глины накапливаются в виде элювиальных отложений на суше или в спокойных водах озер и морей.

Таким образом, описываемые породы состоят из наиболее тонких продуктов разрушения горных пород, которые в общем случае выносятся в море дальше остальных видов кластических осадков. Они могут обладать очень тонкой слоистостью, свидетельствующей о быстром и частом изменении размера зерен слагающих их минералов. Такие вариации размера зерен могут объясняться сезонными изменениями, меняющейся интенсивностью выпадения атмосферных осадков или другими факторами, влияющими на количество и характер осадочного материала, приносимого реками.

Горные породы, содержащие песчаный материал, называют *песчанистыми*, карбонат кальция – *известковистыми*, минералы железа – *железистыми*, а породы с большим количеством органического вещества – *углистыми*. Углистые породы обычно имеют черный цвет. Местами они переходят в пласты угля. Некоторые геологически древние слои так и сохраняются в виде слоев глины, отличающейся от первичного осадка лишь бóльшим уплотнением, как это можно видеть на примере огнеупорных глин Иллинойса, Огайо и Западной Виргинии.

---

[1] *В отечественной литературе для размера алевритовых частиц чаще всего приводятся значения 0,1–0,01 мм.– Прим. перев.*

ХЕМОГЕННЫЕ ОСАДОЧНЫЕ ПОРОДЫ

При достижении достаточно высокой концентрации определенных ионов в растворе может начаться выпадение химического осадка. Вещество, растворенное во время выветривания и переносимое в растворенном виде, обычно достигает моря раньше, чем его концентрация станет достаточной для выпадения в осадок. Море служит, следовательно, огромной кладовой для растворенного материала. В конечном счете часть этого растворенного материала осаждается, образуя слои хемогенных осадков.

По мере того как осадки накапливаются на дне моря или озера, зерна продолжают обычно расти, заполняя межзерновое пространство и образуя кристаллическую структуру. Такое сцепление кристаллов путем взаимного проникновения представляет собой важнейший вид литификации большинства хемогенных осадочных пород.

Многие из химических соединений, переносимых в растворенном состоянии, обладают лишь слабой растворимостью в воде; поэтому изменение химических свойств воды, связанное, например, с изменением температуры, удалением углекислого газа или со смещением двух объемов воды с разным составом растворенного вещества, может вызвать выпадение химического осадка. Многие организмы поглощают из морской воды карбонат кальция или кремнезем, идущие на образование раковин или скелетов. После смерти таких организмов их раковины и скелеты отлагаются на дне. У некоторых химических соединений, подобных NaCl и $MgCl_2$, растворимость настолько велика, что они достигают концентрации, достаточной для осаждения, только при испарении воды; образующиеся таким образом осадки называют *эвапоритами*.

К хемогенным осадкам относятся *известняки, доломиты, железистые, фосфатные* и *марганцовистые осадки* и *кремнистые осадки* в форме кремня и опала (табл. 7.2). Эти осадки могут выпадать в виде почти чистых, свободных от примесей слоев, но могут также служить цементирующей добавкой к другим осадкам или образовывать отдельные желваки на дне озер и морей.

Известняк состоит главным образом из карбоната кальция, преимущественно в форме кальцита. Известняки могут накапливаться в результате либо неорганического химического осаждения кальцита, либо аккумуляции известковых раковин, а также при комбинации этих двух процессов. В известняках в изобилии могут содержаться окаменелые остатки организмов (рис. 7.1), но их может и не быть вовсе, как в случае известковых илов, образующихся путем неорганического химического осаждения.

На Большой Багамской банке из морской воды на мелководье при нагревании удаляется углекислый газ, что вызывает осаждение крошечных кристаллов карбоната кальция игольчатой формы:

$$\underset{\text{в растворе}}{Ca(HCO_3)_2} \underset{\text{выветривание}}{\overset{\text{осаждение}}{\rightleftharpoons}} \underset{\text{твердое вещество}}{CaCO_3} + \underset{\text{газ}}{CO_2} + \underset{\text{вода}}{H_2O}.$$

Заметим, что в обстановке выветривания реакция идет влево.

Чистые известняки накапливаются в относительно спокойной, теплой, мелкой воде в акваториях, прилегающих к низменным участкам суши. Жизнь здесь обычно пышная, а ближайшая суша либо недостаточно высока, либо слишком удалена для того, чтобы поставлять сколько-нибудь значительное количество обломочного материала. Известняки могут переходить в глинистые породы, если к карбонатным осадкам добавляется глина, или в известковые песчаники, если к ним добавляется песок.

Другими разновидностями известняка являются *мел, известковый туф, мергель*. Мел – это разновидность известняка, обычно состоящая из сцементированной массы мелких раковин или обломков раковин. Основную часть этой породы составляют раковины фораминифер (микроскопических морских животных, рис. 7.7) и кокколитофор (известковых планктонных водорослей), но обычно в ней присутствуют также мелкие раковинки других организмов.



РИС. 7.7
Известковые раковины фораминифер (одноклеточных животных) из морского мергеля мелового возраста в шт. Нью-Джерси (увеличено).

Известковый туф и травертин представляют собой отложения кристаллического кальцита, часто разрабатываемые в качестве поделочного камня и декоративного материала. Известковые туфы образуются у выходов источников; они обычно землистые, пористые или губчатые. Отложение значительной части известковых туфов происходит с помощью известковых водорослей. Травертины более компактны по сравнению с туфами; они накапливаются вокруг источников или в известняковых пещерах.

Мергелем называется пористый осадок, состоящий из тонких частиц кальцита и глины и накапливающийся на дне многих пресноводных озер. Обычно порода наполнена мелкими обломками раковин. Термин «мергель» используется также для обозначения определенной категории морских осадков, представляющих собой смесь глины и мелкораздробленных остатков раковин. В литифицированном состоянии этот материал должен быть назван известковой сланцеватой глиной или глинистым известняком[1].

Доломит и доломитит. Доломит представляет собой осадок, состоящий из минерала доломита, $CaMg(CO_3)_2$ (рис. 7.8). Часто это название употребляют только для обозначения минерала, а карбонатную породу с высоким содержанием доломита называют доломититом[1]. Загадочной особенностью осаждения доломита является то, что при явном пересыщении морской воды доломитом (очень устойчивым в морской воде карбонатом) долгое время не удавалось наблюдать осаждения из нее доломита. Однако в начале 60-х годов современное образование доломита было отмечено во время весенних приливов и штормов, которые заливали морской водой плоское побережье. Постепенное высыхание привело к повышению концентрации растворенного магния, вследствие чего реакция ранее отложившегося кальцита с раствором, обогащенным магнием, вызвала образование доломита. Этот феномен наблюдался на островах Флорида-Кис, Багамских островах, Подветренных островах Карибского моря и в Персидском заливе. Осадки, вскрытые при бурении в глубоководных участках океана, содержат микроскопические ромбики доломита, смешанные с другими осадками. По-видимому, для образования доломита необходим тропический или субтропический климат. Это приводит к мысли, что такие области, как территория шт. Айова, Висконсин, Иллинойс и Индиана, где развиты мощные толщи доломитов, в прошлом характеризовались совершенно иным климатом. Когда-то это была область мелководного

[1] Термин «мергель» широко используется в отечественной литературе для обозначения всех литифицированных осадочных пород соответствующего состава.– *Прим. перев.*

[1] Термин «доломитит» в отечественной литературе почти не употребляется. Как минерал, так и породу у нас обычно называют одинаково – доломитом,– *Прим. перев.*

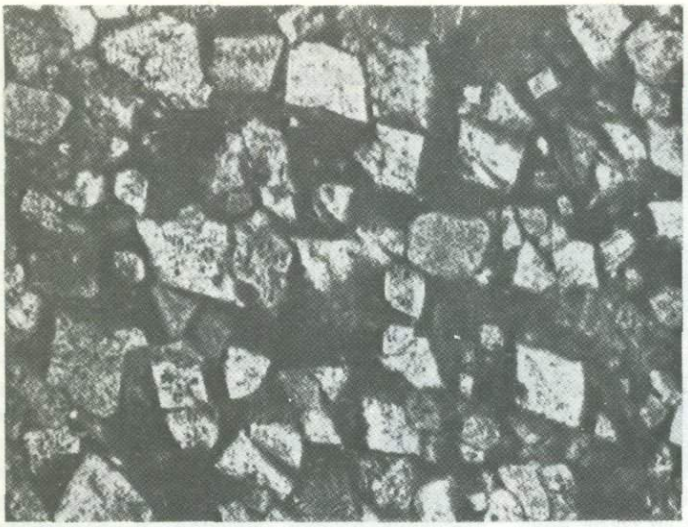


РИС. 7.8
Шлиф доломита из шт. Миннесота. Видны ромбические кристаллы минерала доломита.

тропического моря, а не внутренних частей континента, как сейчас.

При размыве обломки доломита могут выноситься в море с образованием из них обломочной доломитовой породы.

Железистые минералы. Некоторые железосодержащие осадки накапливаются химическим путем. Слои или конкреции лимонита могут формироваться на дне озер или в болотах. В некоторых толщах морских осадочных пород встречаются слои гематита мощностью несколько метров. Близ Бирмингема в шт. Алабама находятся четыре ранее разрабатывавшихся пласта гематита, образовавшегося около 420 млн. лет назад. Часть этого гематита имеет оолитовую структуру (напоминающую рыбьи икринки), а другая часть состоит из первоначально известковых раковин, замещенных гематитом.

Конкреции железистого карбоната (сидерита), накопившегося в виде озерных осадков 250 млн. лет назад, представляли собой первую железную руду, которая добывалась в районе Питтсбурга. Эти бедные руды давно уже не представляют промышленного интереса, и добыча их прекращена.

Сульфид железа (пирит) образует осадочные конкреции в условиях сероводородного заражения, связанного с разложением органического вещества. Пирит встречается также в виде конкреций в черных глинистых породах, реже в виде тонких слоев, как, например, в западных районах шт. Нью-Йорк, и в разнообразных других геологических обстановках. Примесь пирита в угле приводит к значительному загрязнению воздуха в городах, в связи с чем в большинстве городов сейчас запрещено сжигание угля с высоким содержанием серы.

Фосфатные породы. Фосфатные конкреции образуются на разбросанных по всему Мировому океану участках современного морского дна; кроме того, фосфатные минералы присутствуют в виде цемента в других осадках. В известняках возле Нашвилла, шт. Теннесси, содержится примесь фосфатов, вполне достаточная для промышленного получения удобрений. Громадное количество фосфатных минералов заключено в отложениях формации Фосфория в шт. Вайоминг, Юта и Айдахо. Богатым источником фосфатов являются также костные слои во Флориде.

Марганцовистые осадки. Окислы марганца накапливаются в виде конкреций на дне озер и в море. Согласно расчетам, на 1 км^2 дна Тихого океана приходится 7300 т марганцевых конкреций. В этих конкрециях содержится около 24% марганца и 14% железа; одновременно в них присутствуют такие весьма ценные элементы, как никель, медь и кобальт, стоимость запасов которых из расчета на 1 км^2 дна оценивается цифрой более 2,35 млн.

долл. В настоящее время разрабатываются методы и идет оценка стоимости их добычи. В других местах, как, например, в центральных районах Миннесоты, марганцевые минералы залегают в виде слоев, переслаивающихся с другими осадочными породами.

Кремень встречается как в форме конкреций в известняках и доломитах, так и в виде отдельных слоев. Конкреции сложены очень тонким кристаллическим кремнеземом. Различают светлые (chert) и серые и черные (flint) разновидности кремня. Кремень, окрашенный в красный цвет небольшой примесью гематита, носит название *яшмы*. Слои кремня мощностью более 30 м встречаются в шт. Айдахо, Арканзас, Техас, Западная Виргиния; протяженные слои кремня ассоциируются с железистыми осадками в районе озера Верхнего.

Происхождение морских кремней до конца не понято, хотя кремневые конкреции и слои весьма обычны в известняках, содержащих типичные морские окаменелости. При осуществлении Проекта глубоководного бурения были обнаружены слои кремня, погребенные под мощными толщами океанических осадков. Так что кремень – это нормальная разновидность осадков.

Эвапориты. Морская вода содержит около 3,5% растворенного твердого вещества. В случае ее испарения в замкнутом бассейне происходит последовательное выпадение ряда осадков. При нормальном выделении эвапоритов из морской воды последовательно образуются: карбонат кальция, сульфат кальция, хлористый натрий (поваренная соль), соли магния и калия. Для накопления эвапоритовых осадков в больших масштабах необходим аридный климат.

Существуют два минерала сульфата кальция: гипс ($CaSO_4 \cdot 2H_2O$) и ангидрит ($CaSO_4$). Гипс чаще встречается в обнажениях горных пород, но при температуре выше 42°С осаждение ангидрита идет быстрее, чем гипса. Гипс обычно ассоциируется с доломитом и красными глинами с трещинами усыхания. Гипс и ангидрит настолько легко растворяются в условиях влажного климата, что коренные их выходы встречаются редко; исключение составляют засушливые области.

Минералом галитом сложены мощные слои. Испарение в обширных мелководных морских бассейнах 400 млн. лет назад вызвало образование соленосных отложений мощностью от десятков до сотен метров, которые сейчас залегают на глубине в шт. Нью-Йорк, Пенсильвания, Западная Виргиния, Огайо и Мичиган. Другой тип соленосных осадков накапливается в соленых озерах, таких, как Большое Соленое озеро, соляные равнины Бонвилл в шт. Юта или озеро Карсон-Синк в шт. Невада. Куполовидные подземные массивы соли на побережье Техаса и Луизианы образовались в результате подъема пластичной соли из слоев, залегающих на глубине 6 км ниже дневной поверхности. Некоторые из этих соляных куполов подходят настолько близко к поверхности, что из них выгодно вести промышленную добычу соли.

Особенно интенсивное испарение морской воды приводит к образованию калиевых, или калийных, солей (преимущественно минерала сильвина, KCl), которые являются конечным продуктом осаждения. Калиевые соли относительно редки, потому что необходимые для их образования экстремальные условия испарения достигаются нечасто. Калиевые соли используются в качестве удобрения и как химическое сырье. Основные толщи осадочных пород, содержащих калий, распространены на территории Северной Америки на востоке шт. Техас, в смежных районах шт. Нью-Мексико, у города Моаб в шт. Юта и в канадской провинции Саскачеван. Соленые воды озера Серлс в Калифорнии при испарении также выделяют калий.

В некоторых пустынных озерах соли растворены в другой пропорции по сравнению с морской водой. Рассол озера Серлс богат бором; соли бора добываются и в ряде других мест южной Калифорнии, в том числе в Долине Смерти. В пустыне на севере Чили имеются осадки с высоким содержанием нитрата натрия.

ОРГАНОГЕННЫЕ ОСАДОЧНЫЕ ПОРОДЫ

Этот вид осадочного материала образуется при особой концентрации органических остатков, как это наблюдается в *угле, диатомитах, рифовых осадках* и *глубоководных илах*. Нефть и природный газ, имеющие также органическое происхождение, находятся в поровом пространстве осадочных пород.

Уголь образуется из торфа. Последний формируется тогда, когда органический материал в болотах накапливается быстрее, чем идет его разрушение в результате гниения. Торф – это пористое вещество с изменчивым строением, характер которого зависит от типа исходных растений и степени их разложения. В тропиках гниение растений идет слишком быстро для накопления больших масс торфа. Медленное гниение характерно для тундровой зоны, но из-за холодного климата здесь медленно происходит рост растений, а следовательно, и торфообразование. Наиболее благоприятны для торфонакопления, таким образом, условия умеренного влажного климата. Главными площадями, на которых в настоящее время происходит накопление торфа, являются болото Дисмал в Виргинии, болота Луизианы и Техаса и район Великих озер.

При захоронении торфа слагающий его материал уплотняется, вода и летучие компоненты удаляются, и в итоге образуется лигнит. Лигнит, или лигнитовый уголь, еще сохраняет остатки первичной древесной структуры. Он имеет темно-коричневый цвет и иногда его называют бурым углем. Огромные скопления бурого угля встречаются на севере Великих равнин.

Еще более глубокое захоронение под толщей вышележащих осадков и время преобразуют лигнит в черный битуминозный уголь (мягкий уголь). Битуминозный уголь переслаивается с другими консолидированными осадками, как это показано на рис. 7.9 и 7.10. Бóльшая часть битуминозных углей Северной Америки и Европы образовалась в течение пенсильванского периода, около 280 млн. лет назад. Если битуминозный уголь подвергается метаморфизму, он преобразуется в антрацит (твердый уголь) или даже в графит.

Диатомит. Диатомовый ил – это скопление кремневых раковин одноклеточных растений, называемых диатомеями или диатомовыми водорослями. Диатомеи обитают как в море, так и в пресноводных озерах. После смерти из их раковин образуются слои серого и белого цвета, ассоциирующиеся с глинистыми породами или вулканическим пеплом. После некоторого уплотнения такие осад-



РИС. 7.9
Стратиграфический разрез, показывающий типичное соотношение слоев угля с вмещающими породами на востоке внутренних районов США. (По материалам Данбара.)

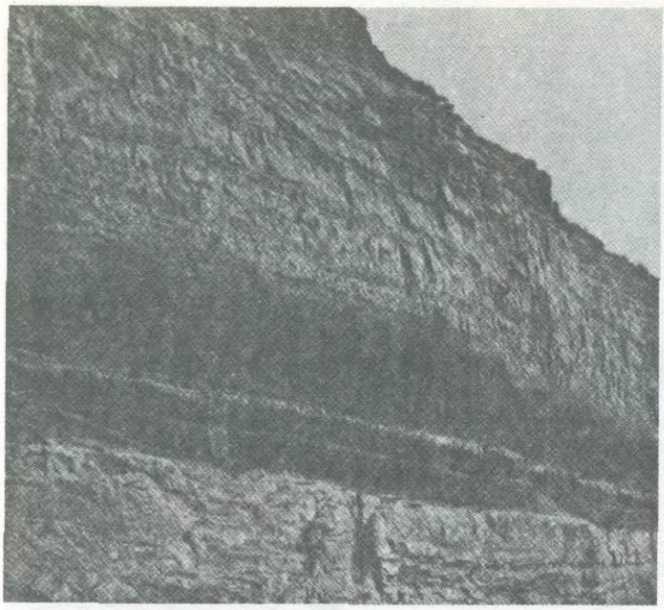


РИС. 7.10
Слои угля мощностью около 2 м с двумя глинистыми прослоями в окрестностях города Глендайв, шт. Монтана. (Фотография Эрдмана, Геологическая служба США.)

ки превращаются в диатомиты. Этими породами особенно богаты западные штаты США. В большом количестве диатомиты найдены в окрестностях Ломпока, Калифорния, где они разрабатываются на предмет использования в качестве изоляционного и фильтрационного материала.

Рифовые отложения. Рифы – это упорно сопротивляющиеся ударам волн горы, построенные известковыми организмами и поднимающиеся с морского дна к поверхности моря. Главными рифостроящими организмами являются известковые водоросли, второе место принадлежит кораллам. Твердые части рифовых построек населяет богатый мир других организмов, но эти подвижные организмы реже сохраняются в составе окаменелых ископаемых рифа.

Современные водорослевые и коралловые рифы лучше всего растут при температуре воды от 20 до 25°С. Предполагают, что развитие рифов геологического прошлого также было ограничено бассейнами с теплой водой. Водоросли растут только там, где свет достигает морского дна, т. е. на глубинах меньше 50 м, но кораллы изредка обитают на глубинах в сотни метров.

В США живые коралловые рифы имеются в районе островов Флорида-Кис и на Гавайских островах. Самая северная точка, где обнаружены живые кораллы, была открыта в 1969 г. у побережья Северной Каролины. Многие тропические острова Тихого океана окаймляются многочисленными рифами. Самым крупным современным рифом является Большой Барьерный риф, вытянутый вдоль северо-восточного побережья Австралии.

Породы ископаемых рифов представлены известняками и доломитами. Древние рифы широко распространены в силурийских доломитах Индианы, Иллинойса, Висконсина и Айовы. Обширный комплекс рифов сформировался в древних морях на территории западного Техаса (рис. 7.11).

Глубоководные илы. Глубоководные илы представляют собой тонкозернистую массу, состоящую из остатков диатомовых водорослей, радиолярий и фораминифер; они развиты на дне глубоководных бассейнов (их описание будет приведено ниже).

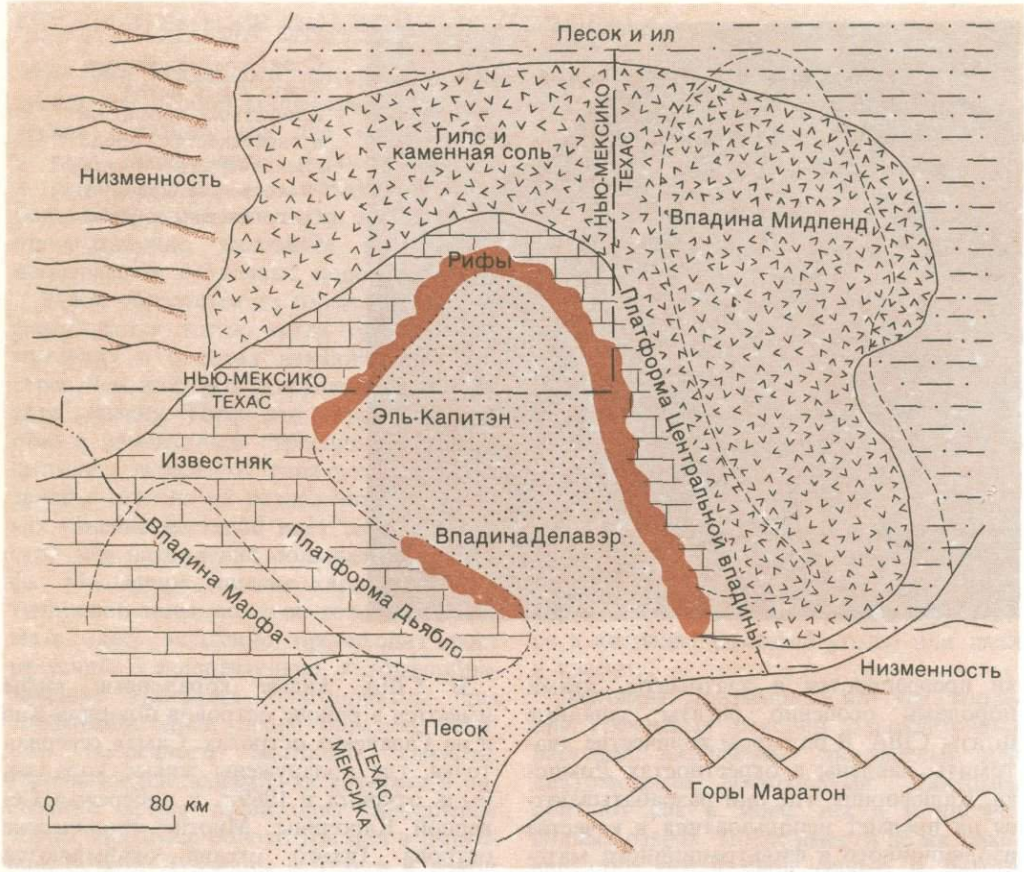


РИС. 7.11

Пермские карбонатные рифовые постройки («карбонатные платформы»), ассоциирующиеся с ними впадины («бассейны») и толщи эвапоритов в западных районах шт. Техас и юго-восточных районах шт. Нью-Мексико.

СТРУКТУРЫ ОСАДОЧНЫХ ПОРОД

Структура большинства осадочных пород может быть отнесена к одному из следующих трех типов: обломочная, кристаллическая или оолитовая. Обломочная структура варьирует от тонкозернистой в породах с очень тонкими частицами до очень грубой в породах, состоящих из валунов или глыб. Обломочной структурой обладают кластические, или механические, осадки, такие, как ил, песок, гравий, галька, и осадочные породы – песчаник, конгломерат, брекчия.

Кристаллическая структура встречается в эвапоритах и других породах, осажденных из водных растворов. Кристаллы могут быть микроскопическими, как в кремне, мелкими, как в обычных известняках, и крупными, как в некоторых разновидностях солей и известняков. Зерна в осадочных породах с кристаллической структурой, как правило, не имеют правильных кристаллических очертаний; они обычно так тесно прилегают друг к другу, что срастаются наподобие мозаики. Однако в некоторых осадочных породах уже позже, при перекристаллизации или замещении, развиваются более или менее правильно образованные кристаллы.

Осадочные породы с оолитовой струк-

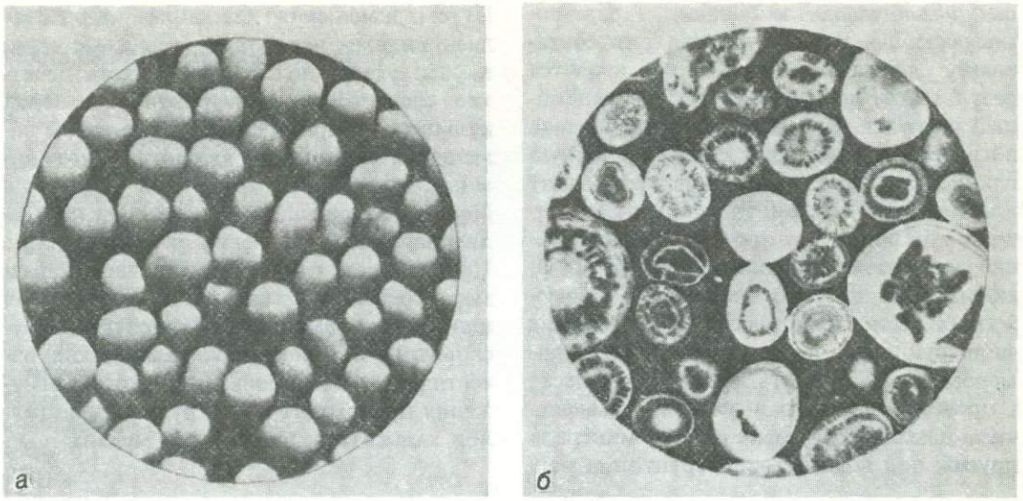


РИС. 7.12

Микрофотографии оолитов из Большого Соленого озера, шт. Юта. *а* – свободные оолиты, увеличенные в 15 раз; *б* – срезы оолитов, увеличенные в 35 раз. (Фотографии Ирдли.)

турой почти полностью сложены частицами, напоминающими маленькие дробинки или рыбью икру. Отдельные «шарики» состоят из концентрических оболочек кальцита, окружающих ядро, представленное песчаным зерном или обломком раковины (рис. 7.12). *Оолитовые песчаники* в настоящее время формируются у берегов Большого Соленого озера, по всей видимости, за счет роста по типу конкреций в неспокойной воде. Эти современные оолиты имеют известковый состав, но в некоторых древних породах оолиты состоят из кремня, гематита и других материалов, которые, по-видимому, заместили первичные кальцитовые оолиты. Современные оолиты песчаной размерности подвергаются переносу и переотложению; по-видимому, с этими процессами связана косая слоистость некоторых древних оолитовых пород.

ЦВЕТ ОСАДОЧНЫХ ПОРОД

Осадочные породы различаются по цвету, зависящему от их минерального состава и других факторов. Они могут быть белыми за счет слагающего их кварца, каолинита, кальцита или других светлых минералов, красными – за счет гематита (и реже красного полевого шпата, граната или красного вулканического пепла), желтыми или коричневыми – за счет лимонита, черными – за счет органического вещества, темных минералов, обломков темных пород или конечных продуктов разрушения сульфида железа, наконец, серыми при смешении светлых и темных ингредиентов. Цвет зависит также от примесей, степени окисления железистых компонентов, количества органического вещества и (на поверхности породы) влияния современного выветривания.

КОНСОЛИДАЦИЯ И ДИАГЕНЕЗ

Во время и после накопления осадка он может подвергнуться ряду низкотемпературных физических и химических изменений. Эти изменения включают *уплотне-*

ние, цементацию, замещение и *перекристаллизацию.* В совокупности они составляют диагенез. Уплотнение является результатом давления за счет вышележащей нагрузки. Его роль особенно велика в процессе превращения глины в плотную глинистую породу (сланцеватую глину или аргиллит) путем удаления интерстициальной[1] воды. Цементация – это отложение кремнезема, кальцита, лимонита или какого-либо другого вещества в промежутках между кластическими зернами из фильтрующейся через осадок воды; примером может служить литификация песка с превращением его в песчаник. Замещением называется замена одного минерала другим под воздействием грунтовых вод. Путем замещения известняка образовались, видимо, некоторые кремневые слои, на что указывают сохранившиеся нечеткие следы первичных раковин и зерна кальцита внутри кремня. Результатом замещения известняка являются, по-видимому, также некоторые слои доломита. Перекристаллизация – это реакция на увеличивающиеся давление и температуру. Например, в глинах увеличивается размер кристаллов глинистых минералов или же они замещаются хлоритом и мусковитом, а в мелкокристаллических известняках в обстановке глубокого погружения происходит рост крупных кристаллов кальцита за счет более мелких.

РАСПРОСТРАНЕНИЕ РАЗЛИЧНЫХ ТИПОВ ОСАДОЧНЫХ ПОРОД

Почти 100% всего количества осадочных пород на континентах составляют три типа пород. На глинистые и близкие к ним породы приходится около 58%, на песчаники – около 22% и на известняки – около 20% всех осадочных пород, развитых на площади суши (по данным Петтиджона, 1957). А такие образования, как уголь, железные руды, гипс, сырье для удобрений и пр., редки и, следовательно, представляют большую ценность. Глубоководные осадки представлены преимущественно глиной и кремнистыми или известковыми илами, поэтому цифра, указанная для песчаников (22%), слишком велика, если рассматривать поверхность всей Земли (суши и акваторий вместе).

Если бы магматические породы (усредненного состава) континентов, представляющие главный источник осадков, были бы полностью разрушены выветриванием и образовавшиеся осадки превратились в литифицированные горные породы, то получившаяся масса осадочных пород состояла бы примерно на 70% из сланцеватых глин, на 16% из песчаников и на 14% из известняков. Расхождение между этими теоретическими расчетами и действительными соотношениями проистекает по крайней мере из двух обстоятельств: неполного разрушения кластических зерен в осадках и погрешностей применяемых при анализе выборочных методов.

ОБСТАНОВКИ ОСАДКОНАКОПЛЕНИЯ

Многие продукты выветривания в конце концов оказываются в море, хотя часть их находит временное пристанище на речных равнинах и в озерах. Осадки могут накапливаться в континентальных, морских или переходных обстановках (табл. 7.4). Большинство из этих обстановок по горизонтали переходят друг в друга, как, например, в случае постепенного перехода от мелких к средним по глубине участкам океана, от речной (аллювиальной) равнины к дельте или от дельты к мелководным морским условиям.

КОНТИНЕНТАЛЬНЫЕ ОСАДКИ

В континентальных осадках отсутствуют остатки ископаемых морских организмов, но в них могут содержаться остатки растений или пресноводных и сухопутных

1 Ինտերիկային դարաբերյան ծիգն

Таблица 7.4

Обстановки осадконакопления

Континентальные	Смешанные континентальные и морские	Морские
Пустынная	Литоральная	Мелководная
Ледниковая (гляциальная)	Лагунная	Средних глубин
Речная	Эстуариевая	Глубоководная
Предгорная	Дельтовая	
Обстановка низин		
Озерная		
Обстановка болот		
Обстановка пещер		

животных. В осадочных текстурах этих осадков обычно имеются указания на характер их переноса; обломочные осадки в них преобладают над хемогенными.

Осадки пустынь. Засушливые области занимают в настоящее время площадь около 28 млн. км^2, т. е. 18,8% поверхности суши. Осадки накапливаются здесь за счет деятельности временных водных потоков, смывающих материал со склонов возвышенностей, химического осаждения из вод бессточных впадин и соленых озер, а также за счет материала, переносимого ветром.

Отложения долин и промоин состоят из грубого обломочного материала, который вверх по долине протягивается на территорию возвышенностей или нагорий и вниз – к аллювиальным конусам выноса. Соседние аллювиальные конусы, соединяясь друг с другом, образуют предгорные аллювиальные равнины. Бóльшая часть галечников, развитых на склонах предгорий, слабо стратифицирована.

Глины озер и бессточных впадин, напротив, обладают хорошей слоистостью. В соленых озерах и пересыхающих бессточных впадинах могут осаждаться эвапориты. Для эоловых отложений характерна клиновидная форма толщ и косая слоистость (рис. 7.15).

Ледниковые отложения, откладываемые непосредственно льдом, представляют собой несортированную смесь грубого и тонкого обломочного материала. Осадки талых ледниковых вод обладают слоистостью; у них проявляется тенденция к сортировке материала внутри слоев. Для тонкозернистых осадков ледниковых озер характерна ленточная слоистость.

Речные осадки накапливаются преимущественно в областях предгорий и в долинах. Предгорные отложения, развитые у подножий гор, образуются в результате совместного действия оползания почвы, смыва дождевыми водами, грязевых потоков и временных потоков. Площадь современного распространения предгорных осадков в западных штатах США приблизительно равна площади возвышающихся над ними гор. В округе Кукамонга на юге Калифорнии мощность предгорных осадков превышает 300 м. Они сложены валунами, булыжниками, галькой, песком и алевритом. Материал очень плохо сортирован, и слоистость в нем почти неразличима.

Осадки долин отличаются от осадков предгорий лучшей сортировкой и слоистостью, а также меньшим содержанием крупного обломочного материала и бóльшим содержанием органического вещества. Поскольку у большинства рек размыв и аккумуляция сменяют друг друга во времени, осадки не остаются на одном



РИС. 7.13
Разрастание растительности по берегам озера Басс в районе Уолкотсвилла, шт. Индиана.

и том же месте постоянно, и слои по большей части имеют линзовидный характер. На поймах многих рек существуют небольшие озера и болота, положение которых меняется по мере того, как русло реки перемещается по дну долины. Вследствие этого речной песок и гравий могут переслаиваться с озерными глинами и алевритами, илами болот и торфом. Многие осадочные породы Великих равнин образовались в свое время как речные осадки.

Озерные осадки. Озерные бассейны могут заполняться обломочным материалом, принесенным впадающими в озера реками или обрушившимся с их берегов, и материалом органического происхождения (рис. 7.13). В озера горных долин поступает более грубый материал, чем в озера пойм или дельт. По сравнению с осадками рек озерным осадкам свойственна меньшая мощность и бóльшая выдержанность слоев по горизонтали. Озерные осадки в основном состоят из гравия, песка, алеврита, глины, мергеля, торфа, окислов железа и марганца, карбоната железа (сидерита), а в соленых озерах присутствуют также эвапориты, такие, как соль и гипс.

Осадки болот. Среди осадков болот преобладают торф и обогащенные органическим материалом илы. Они могут переслаиваться с песком и алевритом, отложенными протекающими через болота реками.

Осадки пещер. *Пещера – это место накопления осадков, находящееся под поверхностью Земли.* В пещерах накапливаются главным образом хемогенные осадки, образующиеся при осаждении из подземных вод. Они представлены преимущественно травертиновыми осадками, принимающими своеобразные формы. В некоторых пещерах текут небольшие реки и ручьи, из которых местами может отлагаться гравийный материал, песок и ил. При обрушении кровли подземных пустот образуется грубая брекчия. Органогенные отложения в пещерах состоят из окаменевших костей и гуано (экскрементов летучих мышей, крыс и птиц).

ОСАДКИ ПРИБРЕЖНОЙ ЗОНЫ

Осадки, накапливающиеся у береговой линии или вблизи нее, представляют собой смесь материала наземного и морского происхождения. Они формируются в зоне пляжей, в дельтах, лагунах и эстуариях.

Осадки пляжей. *Обстановка пляжей,* иногда называемая *литоральной зоной*, соответствует той части береговой полосы, которая обнажается между уровня-

ми высокого и низкого приливов. Волны выносят ил из пляжных осадков, вследствие чего последние бывают сложены, как правило, песком или материалом гравийной размерности (гравий, галька). Характерны окаменелые остатки морских организмов, но сюда могут быть принесены и сохраниться в окаменелом виде также наземные растения.

Осадки лагун. Береговые лагуны располагаются между материком или другим массивом суши и береговыми барьерными барами и островами. Осадки лагун очень разнообразны. Так как вода здесь спокойнее, чем в зоне пляжей, лагунным осадкам свойственна бóльшая тонкозернистость. Кластические осадки могут доставляться в лагуну с суши реками и ветром, прибрежными течениями добавляются морские осадки, а в аридном климате из воды лагун может происходить осаждение гипса и соли. В лагунах с мелкой водой обычно образуются торф и богатые органическим веществом илы. За счет растений и беспозвоночных животных, а отчасти в результате прямого химического процесса образуются мергели. В лагунах с застойной водой деятельность бактерий приводит к образованию сероводорода, который в свою очередь вызывает образование в осадках черного сульфида железа (пирита).

Эстуариевые осадки. Эстуарием называется широкое устье реки в месте ее впадения в море. При быстром течении во время половодья здесь могут формироваться линзовидные слои песка и гравия. Проникающие сюда приливные течения могут перемывать речные осадки. В эстуариевых отложениях встречаются морские ископаемые организмы, хотя вообще вода в эстуариях не обладает достаточной соленостью, необходимой для жизни большинства морских организмов.

Дельтовые осадки. Дельты образуются там, где осадочный материал, который выносится реками с суши, разгружается в море так быстро, что волны и прибрежные течения не успевают унести его прочь от устья реки. Реки при этом наращивают сушу, которая выдвигается все дальше в море. Типичными для дельт являются линзовидные осадки песка и алеврита, которые могут переслаиваться со слоями морских осадков или с осадками озер и болот.

МОРСКИЕ ОСАДКИ

Сфера накопления современных морских осадков включает мелководные эпиконтинентальные моря, умеренные глубины континентального склона и глубоководные бассейны (табл. 7.5).

Мелководные (неритовые) осадки. Неритовая зона протягивается между линией низкого прилива и глубинами около 200 м. На ее долю приходится около 2% земной поверхности, включая почти плоский континентальный шельф, во многих местах окаймляющий континенты. Ширина неритовой зоны варьирует от 1 км и даже меньше до нескольких сотен километров при средней ширине около 80 км.

Свет обычно проникает до глубины 50 м, т.е. в верхнюю часть неритовой зоны, и поэтому в неритовой обстановке развивается гораздо более пышная растительная и животная жизнь, чем на бóльших глубинах. Типичным показателем осадконакопления в неритовой зоне являются слои с большим количеством разнообразных морских мелководных ископаемых организмов. Вероятно, половина осадочных пород континента Северной Америки относится к неритовым образованиям, накопившимся в те неоднократно повторявшиеся эпохи, когда он погружался и затоплялся мелководными эпиконтинентальными морями. Мелководные неритовые осадки обычно подвержены воздействию волн, которое обычно распространяется до глубины менее 20 м, но иногда проникает глубже – до глубин 50–200 м. Линзовидные слои, волноприбойные знаки, косая слоистость и большое разнообразие в размере обломочных зерен при переходе от слоя к слою – результат действия волн и течений.

В общем случае грубый гравийный материал концентрируется вблизи скалистых мысов и береговых обрывов, а также в любых других местах, где

Таблица 7.5

Классификация океанических осадков[1]

Пелагические осадки
- Литогенная бурая (красная) глина (менее 30% материала органического происхождения)
- Диагенетические (сложенные преимущественно минералами, закристаллизовавшимися в морской воде)
- Биогенные (более 30% материала органического происхождения)
  - Фораминиферовые илы (более 30% известкового материала органического происхождения, *преимущественно остатки фораминифер*)
  - Диатомовые илы (более 30% кремнезема органического происхождения, преимущественно остатки диатомовых водорослей)
  - Наннопланктонные илы (более 30% остатков наннопланктонных организмов размером меньше 60×10^{-4} мм)
  - Радиоляриевые илы (более 30% кремнезема органического происхождения, преимущественно остатки радиолярий)
  - Обломочный материал коралловых рифов (обвальные накопления вокруг рифов)
    - Коралловые пески
    - Коралловые илы

Космогенные (материал внеземного происхождения)

Терригенные
- Терригенные илы (более 30% алеврита и песка явно обломочного происхождения)
- Турбидиты (образовавшиеся из турбидитных течений с суши или подводных возвышенностей)
- Оползневые осадки (перемещенные на глубину в результате оползания)
- Ледниковые морские (со значительным содержанием обломочного материала, разносимого айсбергами)

[1] По данным Ф. П. Шепарда: *F. P. Shepard*, Submarine Geology, 3d ed., Harper and Row, Publishers, Inc., New York, 1973.

сильные течения воздействуют на морское дно. Пески преобладают на континентальном шельфе у песчаных берегов или в районах с умеренными по силе течениями. Тонкий алевритовый и глинистый материал откладывается напротив устьев крупных рек, в защищенных от волн прибрежных участках и во впадинах на поверхности континентального шельфа.

Большая часть мелководных осадков состоит из обломочного материала наземного происхождения, вынесенного с суши реками, ледниками, пылевыми и песчаными бурями, образовавшегося при разрушении берегов и при вулканических извержениях. Там, где поступление обломочного материала невелико, доминирующая роль переходит к известковым и кремнистым осадкам органического происхождения, образующимся за счет известковых раковин микроорганизмов и диатомовых водорослей, и хемогенным осадкам. В некоторых хемогенных осадках наблюдается хорошо выраженная сезонная слоистость.

Скорость осадконакопления в неритовой зоне определить трудно, но, по приблизительным оценкам, требуется около 1500 лет для накопления 1 м песчаника, 3000 лет – 1 м глины и 7400 лет – 1 м известняка.

Осадки средних глубин. За континентальным шельфом дно океана довольно резко понижается. Именно этот склон, называемый континентальным склоном, представляет собой настоящую окраину континентов. Осадки, отложившиеся на океаническом дне на глубинах от 200 до 2000 м, называются *батиальными*. Континентальный склон, начинающийся приблизительно на расстоянии 60 км от берега, обычно перекрыт чехлом тонких кластических осадков как наземного, так и морского происхождения. По направлению к суше эти батиальные осадки переходят в осадки мелководной зоны, а в сторону океана замещаются илами

и глинами абиссальных глубин.

Остатки наземных растений разносятся по морскому дну на расстояния в сотни километров от суши. У побережья Центральной Америки растительные остатки были обнаружены на дне океана под 400-метровой толщей воды. В ходе драгирования с исследовательского судна «Гломар Челленджер» (1872–1876) были подняты плоды, семена, листья, ветви и обломки стволов деревьев.

Грубые осадки, вынесенные за край континентального шельфа, переносятся вниз по склону турбидитными течениями. Поэтому у основания континентального склона слои очень тонкого осадка могут чередоваться со слоями песчаников и алевролитов с характерной градационной слоистостью.

Глубоководные осадки. По мере удаления от берега роль материала, поступающего с суши, постепенно уменьшается. Кластические осадки, которые можно обнаружить на *абиссальных* глубинах (глубже 2000 м), либо имеют вулканическое происхождение, либо представляют собой материал, разносимый айсбергами, либо приносятся турбидитными потоками. На *некотором расстоянии от основания континентального склона* могут присутствовать местами тонкие глинистые осадки.

Дно глубоководных впадин представляет собой место, где обитают лишь немногие организмы. Поэтому развитые здесь осадки состоят главным образом из частиц, опустившихся сверху, в частности из костей, зубов рыб и др. Особенно большое место принадлежит органическим илам, сложенным крошечными раковинами плавающих планктонных организмов, таких, как фораминиферы, диатомовые водоросли и радиолярии. На рис. 7.14 показано распространение важнейших типов океанических осадков.

Из всех органогенных осадков, накапливающихся в настоящее время, самым широким распространением пользуются известковые *глобигериновые илы* (илы с *Globigerina*). Илами этого типа покрыто дно глубоководных областей океана на площади более 130 млн. км^2 (что составляет чуть больше $^1/_3$ общей площади Мирового океана). Кремнистые диатомовые илы образуются преимущественно в холодных водах северных областей Тихого океана и в полосе, окаймляющей

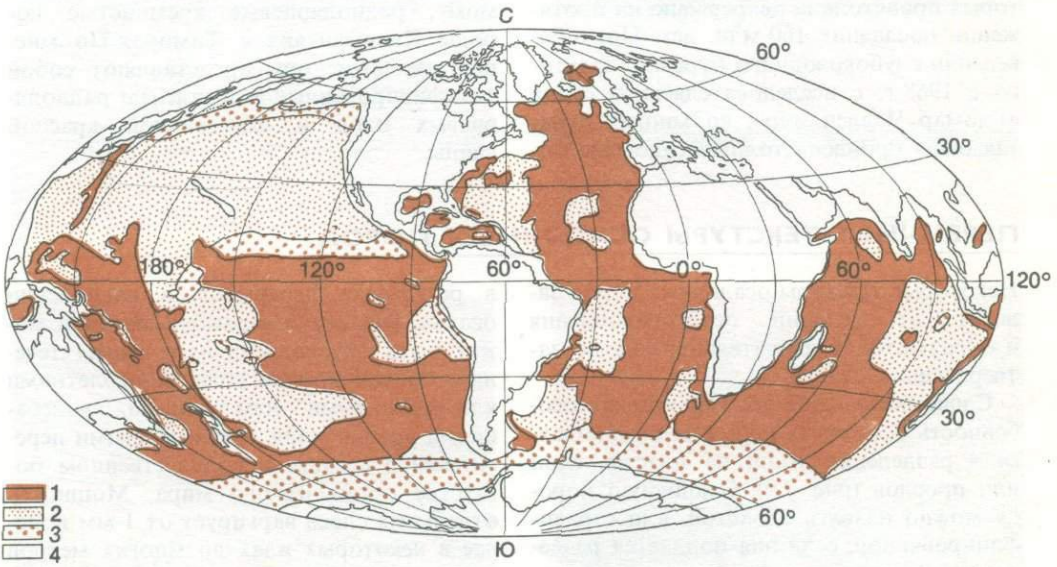


РИС. 7.14

Распределение океанических осадков на земном шаре. *1*–бурые (красные) глины; *2*–известковые илы; *3*–кремнистые илы; *4*–область шельфа и континентального склона. (По материалам Дитриха, 1963, с изменениями.)

Антарктиду. Кремнистые раковины радиолярий присутствуют в осадках, образовавшихся на любой глубине, но доминирующим осадком они становятся только на площадях с глубинами, превышающими 4000 м. Это происходит потому, что известковые раковины других планктонных организмов постепенно растворяются при погружении в глубокие слои воды, в результате чего остается нерастворимый органический остаток, состоящий из кремнистых раковин радиолярий.

Океаническое дно ряда глубоководных областей покрыто очень тонкой коричневой или красной глиной. Она состоит из обломочных глинистых минералов вместе с нерастворимыми частями раковин планктонных организмов и другим органическим веществом, вулканическим пеплом и метеоритной пылью. Абиссальными красными глинами покрыто около 100 млн. км^2 морского дна, главным образом в Тихом океане. Они отличаются чрезвычайно медленной скоростью накопления.

Свойственное глубинам океана медленное осадконакопление позволяет получить образцы пород, аккумуляция которых происходила непрерывно на протяжении последних 160 млн. лет. При проведении глубоководного бурения, начатого с 1968 г. с исследовательского судна «Гломар Челленджер», во многих пунктах была пройдена толща осадочных пород, залегающих на базальтовом слое океанической коры. Вследствие субдукции пород морского дна, которая происходит вблизи глубоководных желобов, общая мощность осадочного слоя, как правило, меньше 600 м, а местами даже меньше 100 м.

Эриксен, Юинг и Уолин (1964) подсчитали, что глобигериновый ил в Атлантическом океане накапливался со средней скоростью 2,5 см за 1000 лет в течение последних 175 000 лет. Средняя мощность осадков в изученных скважинах составляет 38 м. Основываясь на этом, можно путем экстраполяции рассчитать, что последний ледниковый период начался 1,5 млн. лет назад. В керне скважин увековечены четыре эпохи с холоднолюбивой фауной, соответствующие четырем стадиям оледенения, охватившего значительную часть северного полушария.

Осадочные породы абиссального, по всей видимости, происхождения обнажаются в настоящее время на острове Мальта в Средиземном море, на острове Барбадос в Карибском море и на острове Рождества в Индийском океане. Абиссальное происхождение имеют, по-видимому, радиоляриевые кремнистые породы Калимантана и Тимора. По мнению геологов, они представляют собой литифицированные эквиваленты радиоляриевых илов и абиссальной красной глины.

ПЕРВИЧНЫЕ ТЕКСТУРЫ ОСАДОЧНЫХ ПОРОД

Некоторые текстуры осадочных пород зависят от условий осадконакопления и образуются, следовательно, еще до затвердевания осадка.

Слоистость – наиболее характерная особенность осадочных пород, выражающаяся в разделении толщ на пласты, слои или прослои (рис. 7.9). Осадочную породу можно назвать слоистой, или стратифицированной, если она поддается разделению на слои вдоль поверхностей напластования.

Слоистость образуется в результате чередования материала либо неодинаковой размерности, либо разного состава или в результате перерывов в накоплении осадка. Разница в характере осадков может быть обусловлена изменением течений, сменой времен года, многолетними климатическими изменениями, колебаниями уровня моря, существенными переменами в составе и количественном богатстве органического мира. Мощность отдельных слоев варьирует от 1 мм и менее в некоторых илах до многих метров в крупнозернистых осадках. Осадочные породы могут быть, следовательно, тонко- и толстослоистыми.

При образовании слои обычно располагаются примерно параллельно той по-

верхности, на которую они ложатся. Как правило, залегание их бывает горизонтальным. Местами, однако, вследствие неровной поверхности, на которой происходит отложение, возникает наклонное залегание слоев. В правильной последовательности осадки могут накапливаться только на поверхности с наклоном не более 30°. Самые крутые склоны с осадками встречаются в небольших водоемах или защищенных бухтах, где нет или почти нет волнения и очень ограничен разнос осадочного материала. Гораздо чаще осадконакопление происходит в такой ситуации, когда осадки распределяются течениями на широкой площади и накапливаются благодаря этому в виде почти плоских слоев. Это правило известно под названием закона *первично горизонтального залегания* слоев. Если в какой-то толще на большой площади наблюдается крутой наклон слоев, можно сделать вывод, что ее первичное горизонтальное залегание было нарушено в результате тектонической деформации.

Косая слоистость. В случае косой слоистости слойки косо наклонены по отношению к крупным поверхностям напластования, отражающим генеральное направление слоистости (рис. 7.15). Особенно часто косая слоистость возникает в грубых кластических осадках, таких, как песок или гравий.

Наклонные слои образуются всякий раз, как только вследствие быстрого осадконакопления возникают крутые склоны. Это может произойти во фронтальной части дельты, на песчаном баре, при перемещении песчаных волн (волнообразных валов песка) по дну реки, в аллювиальных конусах выноса, на песчаных дюнах. Залегание следующих за ними вышележащих слоев может снова оказаться горизонтальным, и в итоге может возникнуть чередование слоев с косой слоистостью и горизонтально лежащих слоев,

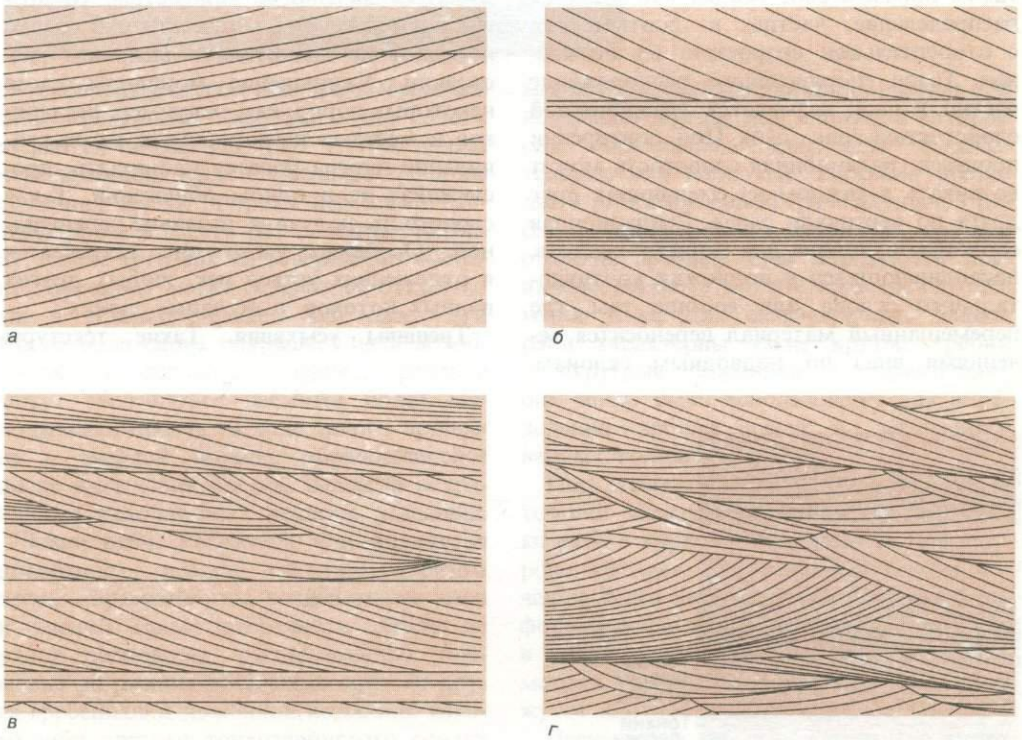


РИС. 7.15А

Различные типы косой слоистости. *а*–обычная прибрежно-морская; *б*–слоистость бурных рек и потоков; *в*–обычная речная; *г*–эоловая (текстура дюн).

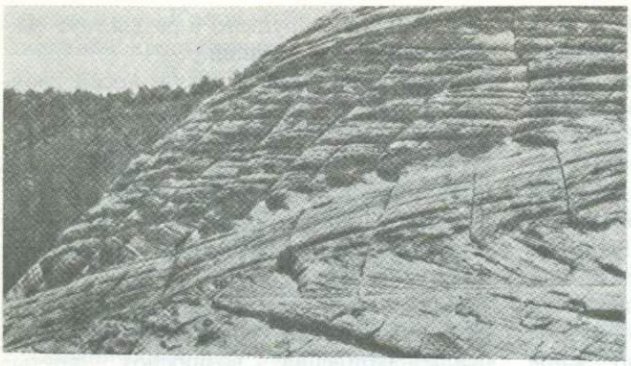


РИС. 7.15Б
Эоловая косая слоистость в песчаниках. (Фотография Грегори, Геологическая служба США.)

соответствующих главному направлению напластования (рис. 7.15).

Градационная слоистость. Когда смесь частиц разного размера, формы и удельного веса выносится в место осаждения, быстрее других будут осаждаться более крупные, более тяжелые и более округлые зерна. Более легкие, меньшие по величине и более угловатые зерна осаждаются вслед за ними в более или менее последовательном порядке. В образовавшемся таким образом слое осадка наблюдается распределение частиц в соответствии с относительной скоростью их осаждения. Такое упорядоченное расположение частиц в слое называется градационной слоистостью (рис. 7.16). При повторении процесса градационная слоистость может возникать в каждом из сменяющих друг друга по вертикали слоев. Градационная слоистость типична для морских осадков, накапливающихся у подножия континентального склона или вообще там, где перемешанный материал переносится течениями вниз по подводным склонам. Градационной слоистостью могут обладать осадки, оставляемые наводнениями на суше. В тех случаях, когда слои осадочных пород приобретают крутой или вертикальный наклон в результате тектонической деформации, градационная слоистость может быть использована геологами для определения первоначального положения подошвы и кровли слоев.

Линзовидная слоистость. Если одни слои в осадочных породах могут прослеживаться на многие километры, то другие уменьшаются в мощности или совсем исчезают на значительно меньшем расстоянии. Уменьшение мощности слоев некоторых пород, как, например, песчаников и местами известняков, и их выклинивание иногда удается наблюдать, прослеживая их в одном обнажении. Такая слоистость получила название линзовидной. Особенно часто она встречается в отложениях устьев рек, любых других водных потоков, в песчаных дюнах.

Трещины усыхания. Такие текстуры

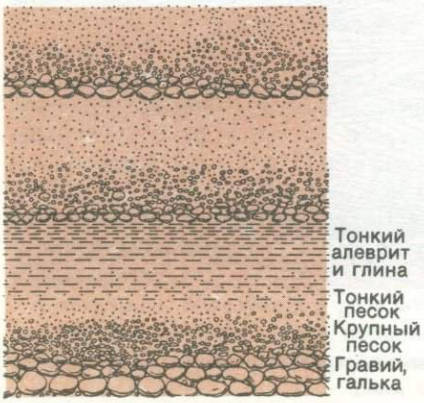


РИС. 7.16
Градационная слоистость.

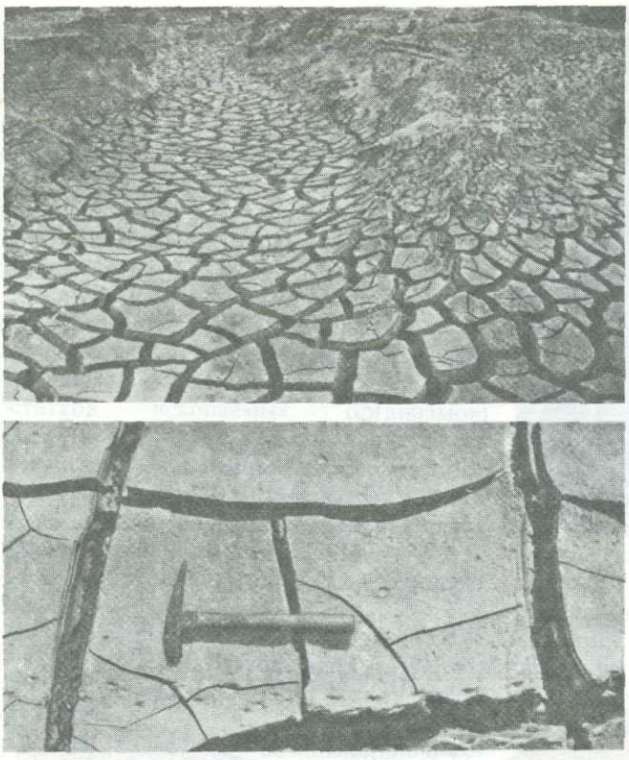


РИС. 7.17
Трещины усыхания в глинистых осадках на дне высохшего русла реки, образовавшиеся в результате усадки при высыхании. (Фотография Геологической службы США.)

обусловлены усадкой ила при высыхании. Благоприятными местами для этого являются поймы рек (рис. 7.17) и днища пересыхающих озер. Отдельные трещины усыхания имеют ширину несколько сантиметров и в десять раз большую глубину. После того как ил совершенно высохнет, трещины могут оставаться открытыми в течение месяцев или даже лет. Когда вода снова покрывает их и возобновляется осадконакопление, трещины могут заполняться свежими более молодыми осадками. В ходе такого процесса в твердой породе, образовавшейся после высыхания осадка, навсегда сохраняются ископаемые трещины усыхания.

Знаки ряби. Ребристая или волнистая поверхность осадка, главным образом песка, образуется под воздействием волн и течений. Такая поверхность состоит из рядов небольших, расположенных примерно на равном расстоянии друг от друга гребешков и ложбинок песка или какого-либо другого тонкозернистого осадка (рис. 7.18). Знаки ряби бывают симметричными и асимметричными в зависимости от характера движения водной или воздушной среды, под влиянием которой они образовались (рис. 7.19). Колебательные или волновые движения приводят к развитию симметричных знаков ряби с одинаковыми склонами по обе стороны гребней. Они образуются преимущественно в мелкой воде на глубине менее 15 м. Для симметричных знаков ряби характерны узкие крутые гребни и округлые ложбинки. Следовательно, они могут быть использованы для определения кровли слоев в деформированных толщах.

Под влиянием воздушных или водных течений образуются асимметричные знаки ряби с крутыми склонами на той стороне, которая ориентирована против течения. Знаки ряби, связанные с течениями, формируются как на небольшой глубине в реках, так и на глубинах в тысячи метров, где над океаническим дном движутся плотностные течения.

Песчаные волны или гигантские знаки ряби могут формироваться реками в половодье или приливными течениями в уз-



РИС. 7.18
Знаки ряби, сохранившиеся в базальных слоях толщи доломитов Бикментаун в районе города Перт, провинция Онтарио, Канада; породы образовались около 500 млн. лет назад. (Фотография Геологической службы Канады.)

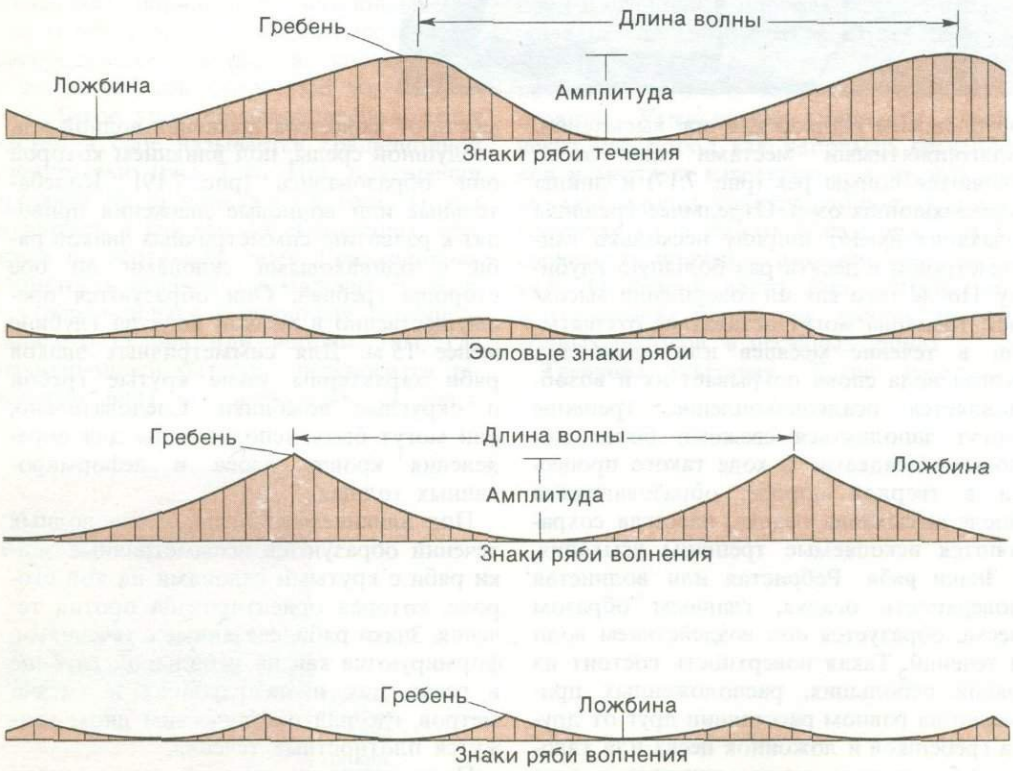


РИС. 7.19
Знаки ряби течения и волнения в разрезе. (По материалам Шрока, 1948.)

ких проливах. Их гребни могут отстоять друг от друга на 5–10 м при высоте волн до 1 м.

Ветер также создает знаки ряби на песчаных дюнах, сходные с теми, которые образуются в воде. Однако они разрушаются прежде, чем успевают захорониться под более молодыми слоями песка, и поэтому не сохраняются в горных породах.

Окаменелости. Многие осадочные породы содержат остатки или следы древней (ископаемой) жизни, известные под названием *окаменелостей* (окаменелых остатков ископаемых организмов) (рис. 7.1, 7.7). Этот термин применяется только по отношению к органическим остаткам или прямым признакам органической жизни, сохранившимся в горных породах земной коры.

Различают следующие виды окаменелостей:

1) настоящие остатки организмов, их твердых или мягких частей;
2) отпечатки органических структур;
3) образования, возникающие в результате замещения первичных органических структур каким-либо материалом;
4) *следы животных, следы их ползания*, ходы.

Растения представлены в палеонтологической летописи менее полно, чем животные. Но иногда прекрасные ископаемые растения встречаются в виде обызвествленных остатков или отпечатков листьев и стволов деревьев в глинах и песчаниках. В ряде случаев волокна древесины замещаются кремнеземом, в результате чего образуются окремнелые деревья, как это наблюдается в национальном заповеднике Петрифайд-Форест («Окаменелый лес») в шт. Аризона (рис. 7.20). Кроме того, растения сохраняются в угле.

У костей, зубов, раковин и целых скелетов животных имеется достаточно шансов сохраниться непосредственно или в виде слепков; но в окаменелом состоянии сохраняются также следы животных, следы их ползания, ходы и другие отпечатки, оставляемые организмами. В редких случаях животные сохраняются целиком. Хорошо известны окаменелые насекомые в янтаре (затвердевшей смоле) из района Балтийского моря и целые мамонты, замороженные в галечниках Сибири.

В окаменелых остатках ископаемых организмов зарегистрировано развитие жизни на Земле на протяжении последних 3 млрд. лет ее истории. Они не только открывают нам мир примитивной жизни на ранних стадиях земной истории, но позволяют увидеть этапы, приведшие к развитию современных форм жизни, и проследить пути миграции организмов *по всему земному шару*.

Так как в окаменелостях отражено поступательное развитие органического мира прошлых эпох, заключающие их слои горных пород могут быть датированы на основании характера тех организмов, которые существовали во время их накопления.

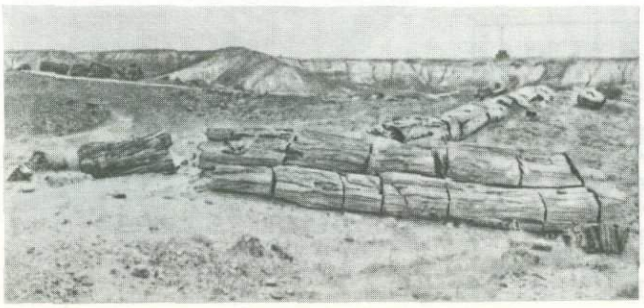


РИС. 7.20
Окаменелые (окремнелые) стволы деревьев на территории национального заповедника Петрифайд-Форест («Окаменелый лес»), Холбрук, шт. Аризона. (Фотография Службы национальных парков.)

ВТОРИЧНЫЕ ТЕКСТУРНЫЕ ОСОБЕННОСТИ

Некоторые мелкие текстурные особенности могут развиваться уже после консолидации осадка; к ним относятся конкреции, жеоды и стилолиты.

Конкреции – это встречающиеся в осадочных породах стяжения или желваки разнообразной формы, состоящие из постороннего материала (рис. 7.21). Как правило, их размеры варьируют от менее чем 1 см до 1 м и больше, но отдельные цилиндрические, похожие на бревна конкреции достигают в длину 3 м и даже более. От вмещающих пород, в которых они находятся, конкреции отличаются составом. В известняках, мелу и доломитах они сложены обычно темным и светлым кремнем или пиритом, в сланцеватых глинах – кальцитом, светлым кремнем, пиритом или сидеритом, но в отдельных местонахождениях в изобилии присутствуют также конкреции гипса и барита. Конкреции в песчаниках обычно состоят из лимонита, пирита или кальцита.

По форме конкреции бывают сферическими, линзовидными, дисковидными и иногда цилиндрическими или неправильной формы. Некоторые из конкреций насыщены окаменелостями, в то время как окружающие породы могут быть бедны ими или даже лишены их вовсе. Конкреции, несомненно, формируются на месте после накопления вмещающих их слоев, причем их образование связано с деятельностью грунтовых вод. Во многих конкрециях наблюдается концентрическое нарастание материала вокруг какого-нибудь ядра, например раковины.

Жеоды – это полости грубо сферической формы, частично заполненные кристаллами. Кристаллы выстилают внутреннюю поверхность полости, размещаясь так, что их вершины направлены к центру полого пространства. По большей части они представлены кварцем или кальцитом, отложенными подземными водами. Жеоды встречаются во многих типах горных пород и особенно часто в известняках.

Стилолиты представляют собой неправильной формы швы, возникающие в результате растворения на плоскостях напластования известняков. Их образованию способствует то, что при повышенном давлении растворение в точках соприкосновения прилегающих друг к другу поверхностей породы идет интенсив-



РИС. 7.21
Конкреции.

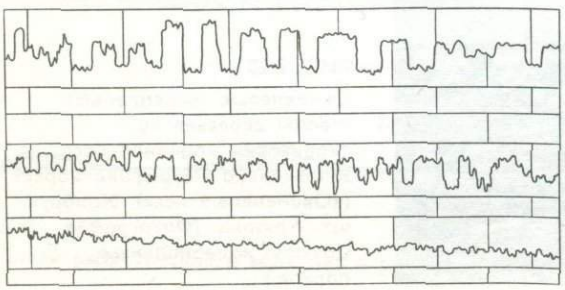


РИС. 7.22
Стилолиты – изъеденная зубчатая поверхность, образовавшаяся в результате растворения известняка на плоскостях напластования; растворение происходит под действием веса вышележащих пород.

нее. На их контакте часто остается нерастворимый материал. У некоторых стилолитов наблюдаются выступы породы в виде колонок или другой формы, струйчатые или гладкие, которые образуют проникающие друг в друга поверхности (рис. 7.22). Длина выступов варьирует от 1 мм до нескольких сантиметров; такие же колебания характерны для их ширины. Эти сутурные (в виде швов) контакты могут так плотно скреплять слои, что порода раскалывается по первичным плоскостям напластования не легче, чем в любом другом направлении.

СТРАТИГРАФИЧЕСКИЕ СООТНОШЕНИЯ ОСАДОЧНЫХ ПОРОД

Изучение пространственных и возрастных соотношений слоев на больших площадях является задачей *стратиграфии* – одного из разделов геологии. Рассмотрим вкратце несколько положений стратиграфии.

Фации. Фациями называются различные типы осадков, отложенных одновременно на соседних площадях. Различные типы осадочных пород переходят друг в друга путем так называемых фациальных переходов, или фациальных изменений. *Фациальные переходы* осуществляются в результате пальцевидного замещения слоев по горизонтали. В скалах Бук-Клиффс на территории шт. Юта фациальные переходы можно наблюдать непосредственно, прослеживая слои в напоминающих стены обнажениях на протяжении нескольких километров. Пальце-

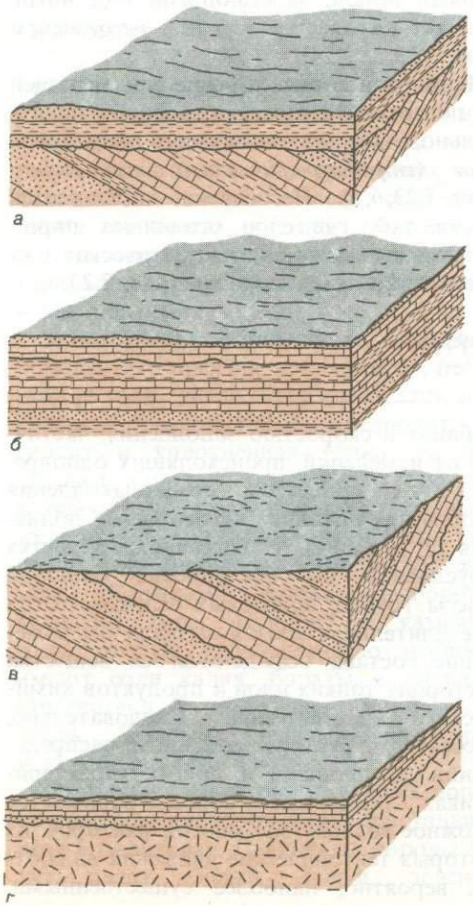


РИС. 7.23

Типы несогласий. *а* – угловое несогласие с залеганием слоев под углом друг к другу; *б* – эрозионное несогласие, или размыв, при котором ни одна из толщ не была наклонена или смята в складки; *в* – размыв с последующим наклоном обеих толщ; *г* – несогласие, при котором слои осадочных пород залегают на размытой поверхности интрузивного магматического тела.

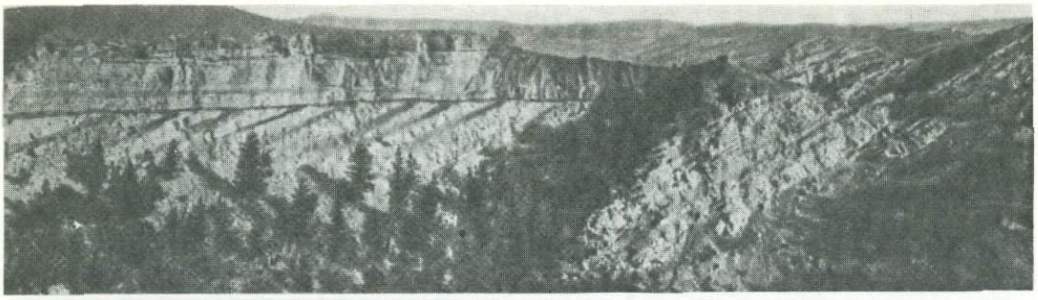


РИС. 7.24

Угловое несогласие между ларамийскими песчаниками и вышележащими конгломератами Уосатч. (Фотография Фишера, Геологическая служба США.)

видное замещение слоев свидетельствует об одновозрастности двух несходных осадочных толщ.

Согласное и несогласное залегание слоев. Если осадконакопление идет в течение какого-то времени более или менее непрерывно, говорят, что один слой лежит на другом согласно. Если же между двумя слоями находится поверхность размыва, это ясно указывает на крупный перерыв в накоплении осадков. Область осадконакопления была в этом случае, вероятно, приподнята и превращена из области накопления в область размыва (эрозии). По истечении некоторого времени та же самая площадь снова испытала опускание, и на той же старой поверхности снова начали накапливаться осадки. Такая погребенная поверхность размыва или перерыва в осадконакоплении называется несогласием.

Если слои ниже поверхности размыва наклонены так, что они образуют угол со слоями пород, залегающими над ними, контакт называется *угловым несогласием* (рис. 7.23, *а*, 7.24).

Если слои и ниже и выше разделяющей их поверхности размыва залегают параллельно, контакт называется *параллельным* (*стратиграфическим*) *несогласием* (рис. 7.23, *б*, *в*). Несогласие наблюдается также там, где слои осадочных пород с размывом лежат на магматических или метаморфических породах (рис. 7.23, *г*).

ВЛИЯНИЕ ТЕКТОНИЧЕСКИХ ДВИЖЕНИЙ НА ОСАДКОНАКОПЛЕНИЕ

Бóльшая часть осадочных пород континентов представлена мелководными морскими образованиями, на что указывают знаки ряби, косая слоистость, состав органических остатков и другие особенности. В ряде горных хребтов мощность континентальных осадочных пород измеряется тысячами метров. На основании этого можно сделать вывод, что накопление столь огромных объемов осадков в мелком море оказалось возможным только вследствие постепенного прогибания той площади, на которой происходило осадконакопление, или даже было стимулировано этим прогибанием. Характер осадков частично зависит от степени сбалансированности между скоростью прогибания и скоростью заполнения, частично от изменений, происходящих одновременно с процессом осадконакопления в областях питания. Значительные поднятия в смежных с бассейном областях обусловили бы поступление большой массы грубых аркозовых осадков, тогда как длительная эрозия вызвала бы изменение состава осаждающегося вещества в сторону тонких илов и продуктов химического растворения. Следовательно, в составе, структуре, мощности, распределении по площади и других характеристиках осадочных пород отражается сложное воздействие многих факторов, из которых тектонические движения являются, вероятно, наиболее существенными.

ОСАДОЧНЫЕ ПОРОДЫ КАК КЛЮЧ К ПОНИМАНИЮ ИСТОРИИ ЗЕМЛИ

Осадочные породы обладают многими чертами, которые отражают обстановку их образования; другими словами, в них регистрируются условия, существовавшие во время их накопления. Каждая горная порода может что-то рассказать. Песчаники, например, демонстрируют знаки ряби, косую слоистость, следы и ходы животных точно так же, как песок современных морских побережий. Осадочные породы в своем составе, текстуре, структуре, остатках ископаемых организмов и других особенностях несут красноречивые признаки прошлых эпох. Древние осадки интерпретируются в свете наших знаний о том, что́ происходит сегодня; это и есть закон актуализма, о котором мы упоминали в гл. 1.

Древние эпиконтинентальные моря, некогда существовавшие ледниковые щиты, исчезнувшие озера и другие элементы прошлого запечатлены в их осадках. Такие осадки дают представление не только о той среде, в которой происходило их накопление, но кое-что говорят и об источниках материала, рельефе территории, с которой они поступали, климате, в котором происходило выветривание, географической обстановке прошлого.

Так как осадочные породы накапливались в закономерной последовательности на протяжении геологического времени, они являются главными документами по истории Земли.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ

Осадочные породы имеют преимущественно терригенное, органическое и вулканическое происхождение. Вклад материала магматического и внеземного происхождения невелик. Часть осадочных пород относится к типу обломочных (кластических), другие являются хемогенными и органогенными осадками и эвапоритами.

Затвердевшие обломочные осадочные породы – это брекчия, конгломерат, песчаник (в том числе аркозовый, граувакковый и глауконитовый), алевролит, аргиллит и уплотненная глина. К осадочным породам химического происхождения относятся известняк, доломит, железистые минералы, фосфатные породы, марганцовистые минералы, кремень. Главными видами эвапоритов являются гипс, ангидрит и каменная соль; особую экономическую ценность имеют соли калия, бораты и нитраты. Органогенные осадочные породы – это уголь, диатомит, рифовые известняки и глубоководные илы.

Основные структуры осадочных пород: обломочная (кластическая), кристаллическая и оолитовая. Осадочные породы могут иметь белый, серый, зеленый, красный или черный цвет, если в этот цвет окрашены главные слагающие их компоненты; красная, желтая или коричневая окраска связана с присутствием гематита и лимонита, черная – большого количества органического вещества или тонкорассеянного сульфида железа. Цвет выветрелой поверхности обычно отличается от цвета свежего излома.

Рыхлые осадки литифицируются в результате уплотнения, цементации и перекристаллизации. С точки зрения распространения осадочные породы можно расположить в следующий ряд: глинистые породы – песчаники – известняки.

Различают следующие континентальные обстановки осадконакопления: пустыни, ледниковые области, предгорные аллювиальные равнины, долины рек, озера, болота, подземные пещеры. Морская среда осадконакопления разделяется на неритовую (мелководную), батиальную (средних глубин) и абиссальную (глубоководную) зоны. В прибрежной зоне накапливаются осадки пляжей (литоральные), лагунные, эстуариевые и дельтовые осадки. Каждая обстановка накладывает свой характерный отпечаток на образующиеся в ней осадки.

К первичным текстурам осадочных пород относятся слоистость, косая слоистость, градационная слоистость, трещины усыхания, знаки ряби, окаменелости. Конкреции, жеоды и стилолиты образуются позже.

С точки зрения соотношения с вышеи нижележащими породами осадочные породы могут залегать согласно, с перерывом или с угловым несогласием. Во многих породах наблюдаются латеральные фациальные изменения. Тектонические движения, затрагивающие как наземные площади размыва и сноса, так и бассейны, в которых происходит аккумуляция, определяют или видоизменяют многие особенности осадков.

Осадочные породы отражают такие элементы палеогеографии, как среда осадконакопления, распределение в прошлом суши и моря, рельеф древней суши, климаты прошлого. Состав, структура и пространственное расположение осадочных пород говорят об источниках материала, а остатки ископаемых организмов, если они имеются,– об их геологическом возрасте. Текстуры, наблюдаемые в осадках современных пляжей и речных пойм, такие, как знаки ряби, трещины усыхания и следы животных, встречаются также в древних породах, поддерживая, таким образом, аксиому, что настоящее — ключ к прошлому.

ВОПРОСЫ

1. Что является наиболее общим признаком осадков и осадочных пород?
2. В чем разница между осадком и осадочной породой?
3. Какие виды материала идут на образование осадков и осадочных пород?
4. Расскажите о роли структурных признаков при классификации осадочных пород.
5. В чем заключается значение текстур в осадочных породах?
6. Перечислите типы обстановок, в которых формируются осадки. Как этими обстановками определяются физические и химические свойства осадочных пород?
7. Наши главные энергетические ресурсы – нефть, природный газ и уголь – связаны с осадочными породами, а не с другими видами пород. Имеются ли основания для такой связи?

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Blatt H.; *Middleton G.*, *Murray R.*, 1972, Origin of Sedimentary Rocks, Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs, N. J.

Degens E. T., 1965, Geochemistry of Sediments, Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs, N. J.

Dunbar C. O., *Rodgers J.*, 1957, Principles of Stratigraphy, John Wiley and Sons, Inc., New York. [Имеется перевод: *Данбар К.*, *Роджерс Дж.*, Основы стратиграфии.– М.: ИЛ, 1962.]

Garrels R. M., *Mackenzie F. T.*, 1971, Evolution of Sedimentary Rocks, W. H. Norton, New York, 1971.

Krumbein W. C., *Sloss L. L.*, 1963, Stratigraphy and Sedimentation, W. H. Freeman and Company, San Francisco.

Kuenen Ph. H., 1950, Marine Geology, John Wiley and Sons, Inc., New York.

LaPorte L. F., 1968, Ancient Environments, Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs, N. J.

Pettijohn F. J., 1957, Sedimentary Rocks, 2d ed., Harper and Row, Publishers, Inc., New York.

Shrock R. R., 1948, Sequence in Layered Rocks, McGraw-Hill Book Company, New York. [Имеется перевод: *Шрок Р.*, Последовательность в свитах слоистых пород.– М.: ИЛ, 1950.]

Williams H., *Turner F. J.*, *Gilbert C. M.*, 1954, Petrography, W. H. Freeman and Company, San Francisco. [Имеется перевод: *Вильямс Х.*, *Тернер Ф. Дж.*, *Гилберт Ч. М.*, Петрография.– М.: ИЛ, 1957.]



8 МЕТАМОРФИЗМ И МЕТАМОРФИЧЕСКИЕ ПОРОДЫ

Метаморфизм можно определить как физическую и химическую переработку пород, при которой в ответ на изменение условий внутри Земли преобразуются структура, текстура и минеральный состав пород. Изменения, происходящие в результате выветривания и диагенеза, к метаморфизму не относятся.

Под метаморфизмом понимают изменение уже существующих пород – магматических, осадочных или метаморфических, – при котором образуются новые породы с новыми минеральными ассоциациями, особой структурой и новыми текстурами. Поскольку метаморфические породы образуются в конечном счете либо из магматических, либо из осадочных пород, можно было бы ожидать, что их минеральные ассоциации должны быть сложными и не только включать новые минералы, возникшие во время метаморфизма, но и отражать минеральный состав более древних пород. Действительно, такие соотношения иногда встречаются, но лишь в тех породах, которые испытали слабый метаморфизм. Там, где метаморфизм осуществляется до конца, минеральные ассоциации обычно становятся очень простыми, и химические элементы в породах реорганизуются в очень малое количество минералов (чаще всего от двух до шести). Такая полная переработка происходит посредством химических реакций, при которых нестабильные минералы разрушаются скорее, чем минералы, устойчивые при физических усло-

виях, преобладающих во время метаморфизма.

К физическим условиям, определяющим устойчивость минеральных ассоциаций, относятся: 1) температура, 2) общее давление, 3) содержание флюидов, главным образом воды и углекислого газа, и 4) давление активных элементов (например, кислорода или серы) во флюидах, которое может изменить степень окисления железа в породе. Следовательно, каждый минерал и каждая порода являются продуктом имеющихся химических элементов и специфических физических и химических условий их формирования. Минералы и породы, устойчивые при одних условиях, могут стать неустойчивыми при других условиях. Глинистые минералы осадочных пород, возникающие в результате выветривания на поверхности Земли, неустойчивы при погружении на большие глубины или в случае воздействия на них тектонического сжатия, как, например, в зонах субдукции. Даже высокотемпературные минералы магматических пород реагируют на скалывающие напряжения и горячие растворы. В то же время некоторые минералы, особенно кварц, устойчивы в широком диапазоне условий.

При метаморфизме *общий* химический состав пород обычно мало меняется, и, следовательно, минеральные, структурные и текстурные изменения обусловлены в основном физическими условиями во время перекристаллизации. Преобразования, происходящие при метаморфизме, можно разделить на преимущественно физические и преимущественно химические. Хотя они обычно происходят вместе, для удобства рассмотрим их раздельно.

К обычным физическим преобразованиям относятся: 1) разрушение зерен, 2) перекристаллизация, 3) взаимное прорастание зерен, 4) увеличение размера зерен, 5) параллельная ориентировка удлиненных или плоских зерен. Конечная структура определяется характером первичного материала, типом происходившего метаморфического процесса и его интенсивностью.

К химическим преобразованиям относится формирование новых минеральных ассоциаций либо путем перекристаллизации уже существующего материала, либо путем привноса или удаления некоторых химических веществ, которые перемещаются в виде ионов вместе с газами или жидкостями. При этом может измениться даже химический состав минералов.

ПРИЧИНЫ МЕТАМОРФИЗМА

Непосредственными причинами, вызывающими метаморфизм, являются давление, высокая температура и циркуляция флюидов. Давление представляет собой либо вертикальную нагрузку, обусловленную весом вышележащих пород, либо гидростатическое давление флюидов, находящихся в промежутках между зернами. Давление и того, и другого типа увеличивается с глубиной. Еще один тип давления – это динамическое, или ориентированное тангенциальное, давление, связанное с тектоническими движениями и особенно наглядно проявляющееся там, где происходит столкновение литосферных плит. Тепло может быть общим теплом Земли, локальным теплом, вызванным трением (например, вдоль поверхности разрыва или вдоль погружающейся литосферной плиты в зоне субдукции), теплом магматических интрузий или теплом, приносимым горячими флюидами. Активные флюиды включают в себя горячие газы, особенно водяной пар и углекислый газ, и горячие растворы с ионами обычных химических элементов, таких, как натрий и кальций, а также фтор, бор и сера.

ТИПЫ МЕТАМОРФИЗМА

Метаморфизм бывает *термальным, гидротермальным, контактовым* или *динамическим* (динамометаморфизм). Породы могут подвергнуться – одновременно или последовательно и в различной степени – более чем одному виду преобразований. Их метаморфическая история может быть неясной. В некоторых случаях переработка бывает столь глубока, что с уверенностью установить характер первичных пород не удается.

Термальные изменения. Общее нагревание пород, погруженных на большие глубины, вызывает перекристаллизацию. Некоторые породы, например те, что первоначально заполняли морские желоба, оказались однажды на значительной глубине (30–35 км). При геотермическом градиенте, равном 20°С на 1 км по вертикали, температура на глубине 15 км достигает, по-видимому, примерно 300°С, т. е. достаточна для того, чтобы начались изменения. На глубине 30 км температура, вероятно, равна примерно 600°С, что вполне достаточно для протекания метаморфических реакций.

При увеличении температуры за счет прежних минералов образуются новые, например из глинистых минералов образуется хлорит. Из глинистых минералов в глинах удаляется вода; уголь теряет воду и летучие газы. В ряде пород некоторые кристаллы увеличиваются в размерах за счет более мелких кристаллов такого же состава, как это происходит при формировании крупнокристаллического мрамора из тонкозернистого известняка. В туфогенных магматических породах кристаллизуется стекло. Соли в эвапоритах превращаются в новые и редкие минералы, такие, как минералы, обнаруженные в отложениях калиевых солей в районе Штасфурта в ГДР. Очевидно, что при умеренном нагревании перекристаллизация особенно легко происходит в глинах, углях, известняках, вулканическом стекле и солях.

Гидротермальные изменения. Причиной метаморфизма этого типа являются горячие магматические воды или грунтовые воды, нагретые, мобилизованные и ставшие химически активными благодаря интрузии магмы. Это может быть проиллюстрировано на примере превращения твердого свежего полевого шпата в мягкую мелоподобную массу слюдистого минерала серицита или каолиновой глины, роговой обманки – в хлорит, оливина – в серпентин или на примере образования специфических низкотемпературных водных минералов, таких, как цеолиты. Точно так же под действием пара и горячей воды обесцветились и стали мягкими поверхностные породы вблизи горячих источников и гейзеров в Йеллоустонском национальном парке, и нет никаких сомнений в том, что такой же процесс до сих пор происходит под землей.

Гидротермальный метаморфизм обычно сопровождается привносом или выносом вещества, или тем и другим вместе. Обычным является замещение, которому часто сопутствует накопление руд металлов, как это наблюдается во многих рудных районах на западе США. В качестве хорошо известного примера можно привести месторождение Бьютт в шт. Монтана. Горячая вода, из которой отложились минералы медной руды, заполняющей жилы и замещающей граниты, настолько сильно изменила последние, что вблизи рудных тел почти не сохранилось неметаморфизованной породы.

Гидротермальные изменения под действием грунтовых вод наблюдаются в глубоких скважинах, пробуренных в районах горячих источников около озера Солтон-Си в долине Империал-Валли в Калифорнии. Было установлено, что горячие рассолы содержат здесь чрезвычайно высокий процент растворенных солей и ионов металлов, а на некоторых участках этой площади рассолы вызвали гидротермальный метаморфизм осадков и осадочных пород.

Контактовый метаморфизм. Контактовый метаморфизм представляет собой изменения, которые происходят вблизи магматических интрузий под действием высокой температуры и выделяющихся горячих флюидов. Этот метаморфизм сильнее всего проявляется на контакте

и постепенно уменьшается с удалением от него по мере падения температуры и давления флюидов. Влияние расстояния *от контакта можно проследить по последо*вательности образования новых минералов по мере приближения к интрузии в богатых алюминием породах. Вначале вдали от контакта появляются пятна мусковита и хлорита, затем биотита и, наконец, ближе всего к контакту можно обнаружить минерал кордиерит – сложный магний-железистый алюмосиликат. Эта последовательность минералов (мусковит – хлорит – биотит – кордиерит) отражает зональность метаморфизма, степень которого увеличивается по направлению к контакту.

Предполагают, что подобный этому *ряд минералов образовался под* действием тепла, связанного с невскрытыми магматическими интрузиями в верхнем Мичигане (рис. 8.1).

Зоны контактового метаморфизма образуют ореолы шириной от нескольких метров до нескольких сотен метров вокруг магматических штоков, как, например, возле Мэрисвилла, шт. Монтана (рис. 8.2), или от нескольких сотен метров до нескольких километров вокруг батолитов. Вокруг небольших даек и тонких

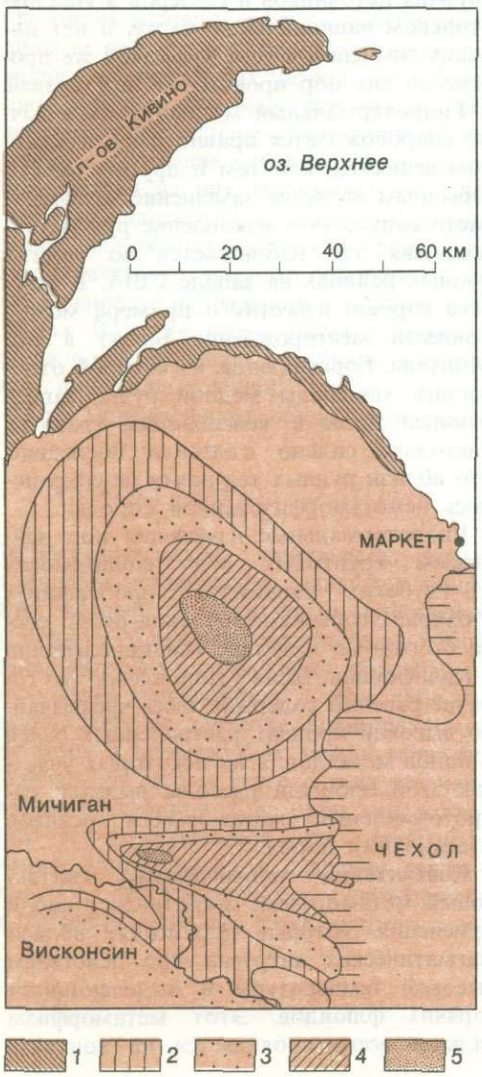


РИС. 8.1

Карта метаморфической зональности докембрийских пород на двух участках в северных районах шт. Мичиган и в шт. Висконсин. (По Джеймсу, 1955.) Перекристаллизация обусловлена увеличением количества тепла, поступавшего из скрытых источников, расположенных под этой областью. Породы полуострова Кивино не затронуты метаморфизмом, а на юго-востоке района докембрийские породы перекрыты более молодым палеозойским чехлом. *1* – хлоритовая зона; *2* – биотитовая зона; *3* – гранатовая зона; *4* – ставролитовая зона; *5* – силлиманитовая зона.

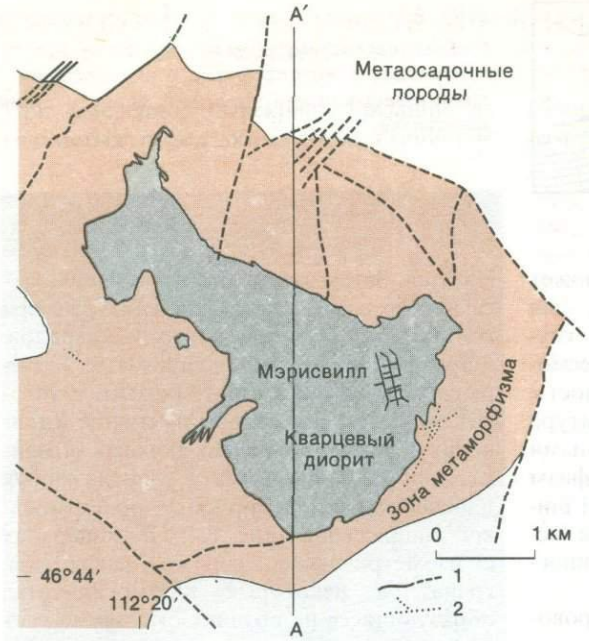


РИС. 8.2А
Шток кварцевых диоритов вблизи Мэрисвилла, шт. Монтана, окруженный ореолом контактово метаморфизованных метаосадочных пород. Около контакта встречаются золотоносные кварцевые жилы. *1* – разрывы (известные и предполагаемые); 2 – рудные жилы. (По Баррелу, Геологическая служба США.)

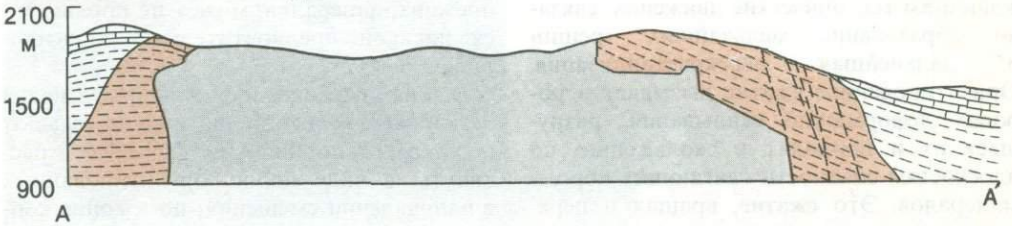


РИС. 8.2Б
Геологический профиль по линии A–A′ на рис. 8.2А.

силлов вмещающие породы не подвергаются сильным изменениям. Местами, однако, слои глин, рассеченные дайками, бывают обожжены или закалены до состояния твердой породы, напоминающей кирпич. В шт. Колорадо и Виргиния слои угля превратились частично в естественный кокс под воздействием силлов, внедрившихся по плоскостям напластования.

При контактовом метаморфизме глинистые породы изменяются до роговиков (тонкозернистых кремнистых пород с непостоянным минеральным составом) или до гранулитов (пород, состоящих в основном из одинаковых по величине плотно сросшихся зерен кварца, полевого шпата, пироксена или амфибола и граната). Известняки превращаются в крупнозернистый мрамор, насыщенный кальциевыми силикатами, а песчаники изменяются до кварцитов. Ценные месторождения железа, олова, вольфрама, меди и цинка сформировались в результате контактового метаморфизма в известняках и известковых сланцах (рис. 8.3).

Динамометаморфизм. Понятие *динамометаморфизм* включает в себя изменения, вызываемые тектоническими движениями, причиной которых является сильное ориентированное давление. Во времени и пространстве оно связано с интенсивной складчатостью мощных толщ осадочных пород. Особенно эффективно динамометаморфизм проявляется в зонах взаимодействия литосферных плит, где в месте изгиба плиты по направлению к зоне субдукции накапливаются



РИС. 8.3
Схематическое изображение зоны контактового метаморфизма с рудоносными гранатсодержащими породами, заместившими известняки.

мощные толщи пород. Толща может обладать достаточной мощностью для того, чтобы распространиться до глубины 20–30 км в зону субдукции, несмотря на сравнительно низкую плотность. *В этом случае давление и температура* становятся наиболее благоприятными для метаморфизма. Этот метаморфизм обычно затрагивает область большей ширины и протяженности, чем в случае *метаморфизма других типов, поэтому иногда* его называют *региональным*.

С динамометаморфизмом, сопровождающим тектонические движения, связано образование мельчайших трещин *и дальнейшая перекристаллизация*. Ориентированное сжатие вызывает в породах деформацию скалывания, разрушает их и приводит к скольжению по плоскостям спайности слагающих породу *минералов. Это сжатие, вращая и* перераспределяя разрушенные частицы, заставляет фрагменты расположиться в виде параллельных полос. Некоторые зерна благодаря пластическому течению уплощаются. *Затем все фрагменты спаиваются* вместе вследствие увеличения размера кристаллов и роста новых минералов. Формируются новые чешуйчатые минералы, такие, как хлорит, биотит, мусковит, *тальк, и минералы, имеющие удлиненную* форму, такие, как роговая обманка; они располагаются в определенных плоскостях, контролируемых ориентировкой напряжений (рис. 8.4). В минералах *с изометричными зернами, таких, как* гранат и некоторые алюмосиликаты, образующиеся на поздних стадиях за счет прежних минералов, может не проявляться никакой предпочтительной ориентировки.

В зонах глубоко проникающих в недра Земли разломов породы иногда бывают перетерты в порошок, их фрагменты растянуты в виде полос, ориентированных *в направлении смещения; но в конце концов* они снова спаиваются воедино в прочно связанную массу микроскопических минеральных зерен, образуя породу, которая называется *милонитом*.

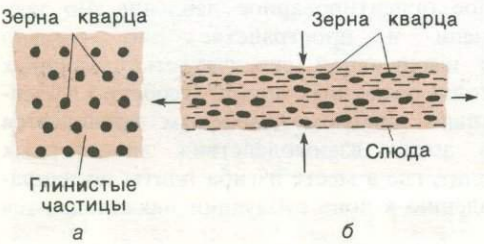


РИС. 8.4
Преобразование аргиллита или сланцеватой *глины в глинистый (аспидный) сланец.*
а – изображение аргиллита или сланцеватой глины увеличено с таким расчетом, чтобы были видны очень мелкие зерна кварца и еще более мелкие глинистые частицы; *б* – та же самая порода, метаморфизованная до глинистого (аспидного) сланца под воздействием давления и перекристаллизации. Зерна кварца уплощены и ориентированы параллельно направлению наименьшего сжатия. Глинистые частицы *перекристаллизованы в тонкие чешуйки* слюды, тоже расположенные параллельно. Упорядоченная ориентировка зерен позволяет аспидному сланцу легко раскалываться по параллельным плоскостям.

СТРУКТУРНЫЕ, ТЕКСТУРНЫЕ И МИНЕРАЛОГИЧЕСКИЕ ИЗМЕНЕНИЯ ПРИ МЕТАМОРФИЗМЕ

При умеренной перекристаллизации из глинистых пород образуются глинистые (аспидные) сланцы. При более сильных изменениях сначала формируются фил-

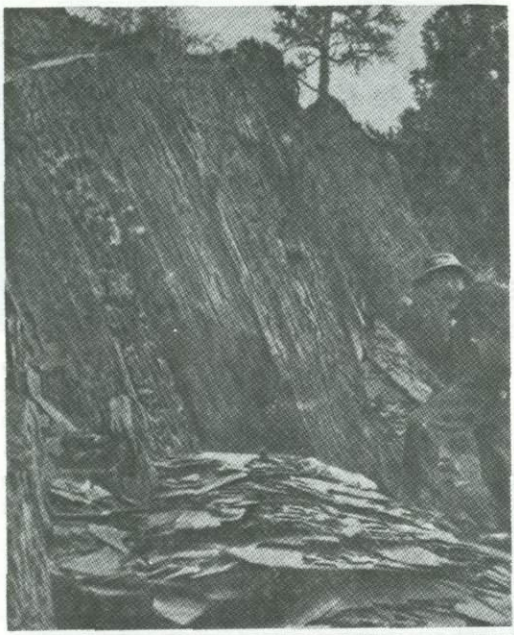


РИС. 8.5
Обнажение глинистых сланцев в каньоне Дип-Крик, шт. Монтана. Виден пластинчатый характер сланцеватости (кливажа). (Фотография Уолкота, Геологическая служба США.)



РИС. 8.6
Полосчатый гнейс близ озера Эмбри, провинция Манитоба. Вертикальное расположение извилистых полосок объясняется горизонтальным направлением сжатия на глубине. (По материалам Геологической службы Канады.)



литы, а затем кристаллические сланцы. В глинистых сланцах, филлитах и кристаллических сланцах наблюдается постепенное увеличение размеров зерен и характерная текстура, называемая *листоватостью*. *Листоватость* – результат параллельной ориентировки минералов, способных легко раскалываться по плоскостям спайности, особенно биотита, мусковита, роговой обманки, хлорита или талька. В породах, содержащих вышеперечисленные минералы, может легко развиваться сланцеватость или кливаж (рис. 8.5).

Граниты и другие крупнозернистые полевошпатовые породы могут изменяться до сланцеватых метаморфических пород, которые называются *гнейсами*. Типичные гнейсы состоят из светлоокрашенных полос или линз полевого шпата и кварца, чередующихся со слоями или полосами тёмноокрашенных биотита или роговой обманки (рис. 8.6). Сланцеватость в гнейсах обычно несовершенна, поскольку пластинчатых минералов в них не так много, как в кристаллических сланцах. Листоватость в гнейсах меняется от неясной до хорошо выраженной.

РАЗМЕР ЗЕРЕН И РЕЛИКТОВЫЕ ТЕКСТУРЫ В МЕТАМОРФИЧЕСКИХ ПОРОДАХ

Размер зерен в большинстве метаморфических пород колеблется от микроскопического до нескольких миллиметров. В кристаллических сланцах обычно встречаются крупные, хорошо оформленные кристаллы гранатов и некоторых других

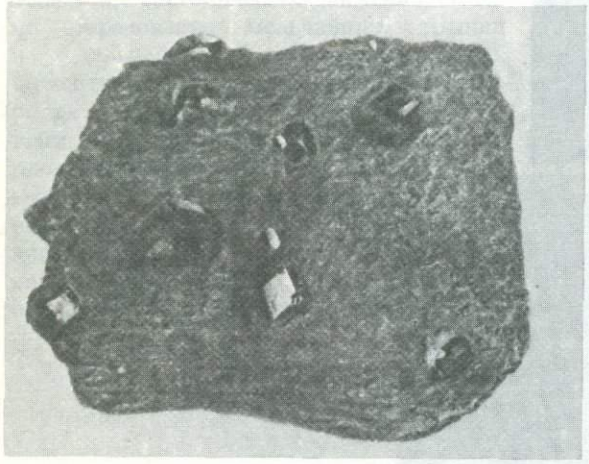


РИС. 8.7
Метакристаллы граната в кристаллическом сланце, река Стикин, Аляска. Гранатовый кристаллический сланец представляет собой сильно метаморфизованную породу. (Фотография Американского музея естественной истории.)

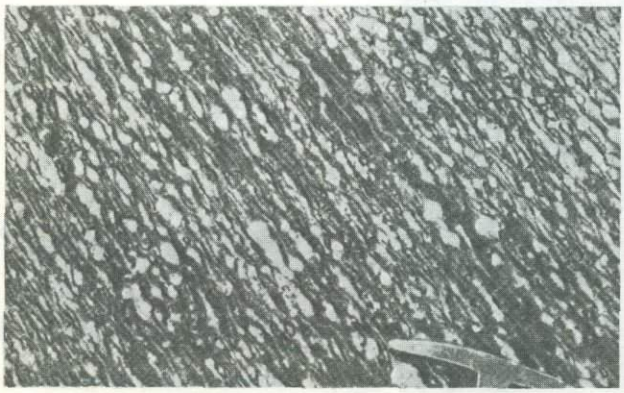


РИС. 8.8
Порфир, превратившийся в кристаллический сланец под действием скалывающих напряжений. Светлые пятнышки – прежние фенокристаллы размером до 2 см. Окрестности Грин-Парка, округ Колдуэлл, шт. Северная Каролина. (Фотография Кейта, Геологическая служба США.)

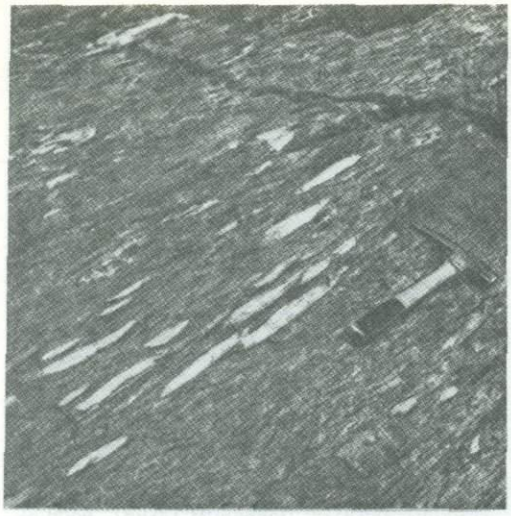


РИС. 8.9
Образовавшийся из конгломерата кристаллический сланец с удлиненной галькой, уплощенной вследствие сжатия в зоне течения пород. Очевидно, этот кристаллический сланец сформировался в результате динамометаморфизма при высоком давлении и высокой температуре. (Фотография Геологической службы Канады.)

силикатов, образовавшиеся в конце цикла метаморфизма. Они являются аналогами фенокристаллов магматических пород и называются *метакристаллами* или *порфиробластами*. Некоторые из них достигают 2–5 см в диаметре (рис. 8.7).

Реликты первичных текстур, такие, как слоистость, конкреции, окаменелости и гальки в первично осадочных или фенокристаллы в первично магматических породах, иногда все же переживают (подвергаясь искажениям) «суровые времена» динамометаморфизма (рис. 8.8, 8.9).

РАЗНОВИДНОСТИ МЕТАМОРФИЧЕСКИХ ПОРОД

Метаморфические породы разделяются на два основных класса – сланцеватые и несланцеватые (табл. 8.1), которые различаются по наличию или отсутствию ориентировки в расположении минералов, обладающих спайностью.

СЛАНЦЕВАТЫЕ МЕТАМОРФИЧЕСКИЕ ПОРОДЫ

Из сланцеватых метаморфических пород, т.е. пород, в которых проявляется сланцеватость, чаще всего встречаются *глинистые (аспидные) сланцы, филлиты, кристаллические сланцы* и *гнейсы*.

Глинистый (аспидный) сланец представляет собой однородную тонкозернистую породу, способную расщепляться на тонкие пластины с относительно гладкими поверхностями. Однако иногда поверхности сланцеватости бывают изогнутыми и покоробленными. Обычно сланцеватость в аспидных сланцах сечет слоистость первичных глинистых пород под крутым углом. Следы этой слоистости можно наблюдать в виде полос разного цвета, часто более или менее изогнутых (смятых в складки), пересекающих сланцеватость. Минеральные частицы в аспидных сланцах неразличимы невооруженным глазом.

Окраска аспидных сланцев может быть серой, красной, зеленой и пурпурной до черной. Серый и черный цвета, как правило, обусловлены наличием органического материала первичной породы; при этом соединения углерода первичной породы превращаются в графит. Красные оттенки придает окись железа, пурпурные – окись магния, а зеленые – силикаты, содержащие закись железа.

Филлит *представляет собой* расслоенную тонкозернистую слюдистую породу почти постоянного состава. Филлиты бо-

Таблица 8.1

Классификация и исходный материал метаморфических пород

Метаморфическая порода	Материнская порода
Сланцеватые	
Глинистый (аспидный) сланец	Глинистая порода, туф
Филлит	То же
Кристаллические сланцы (множество разновидностей)	Глинистая порода, глинистый песчаник, граувакка, туф, риолит, (липарит), андезит, базальт
Гнейс	Гранит, гранодиорит, диорит, габбро, конгломерат, аркоз
Несланцеватые	
Мрамор	Известняк или доломит (иногда с примесями)
Кварцит	Кварцевый песчаник
Роговик	Глинистая порода
Серпентинит	Породы, богатые оливином (дунит, перидотит)
Жировик (тальковая порода)	Серпентинит
Антрацит	Битуминозный уголь

лее грубые и более блестящие, чем аспидные сланцы, но еще слишком тонкозернистые, чтобы отнести их к кристаллическим сланцам. Чешуйки слюды в филлитах обычно достаточно велики для того, чтобы их можно было, хоть и с трудом, различить невооруженным глазом, но большая часть других минералов все еще отличается очень мелкими зернами. Филлиты соответствуют большей степени метаморфизма, чем аспидные сланцы, но меньшей, чем кристаллические сланцы. Однако по латерали филлиты могут сменяться любой из этих пород.

Кристаллические сланцы представляют собой среднезернистую до крупнозернистой породу, которая обладает хорошей сланцеватостью, обусловленной параллельной ориентировкой минералов с хорошей спайностью. Зерна достаточно крупны для того, чтобы их можно было без труда различать и определять в образцах. Поверхности сланцеватости бывают гладкими или изогнутыми и морщинистыми (рис. 8.10).

Кристаллические сланцы классифицируются по преобладающим в них минералам, например кварц-биотитовые, роговообманковые, мусковитовые, хлоритовые, тальковые сланцы. Часто они содержат мелкие, видимые невооруженным глазом зерна полевого шпата.

Бóльшая часть кристаллических сланцев образуется из глинистых пород, но некоторые возникают при метаморфизме тонкозернистых магматических пород, таких, как вулканические туфы, риолиты, базальты, или при метаморфизме глинистых песчаников и конгломератов (рис. 8.9).

Гнейс – это полосчатая крупнозернистая метаморфическая порода, которая обладает лишь очень грубой, ленточного типа сланцеватостью (рис. 8.6). Чередующиеся полосы (ленты) обычно содержат контрастные по цвету минералы. В большинстве гнейсов преобладающим компонентом являются полевые шпаты; часто наличие крупных кристаллов полевого шпата помогает отличить гнейс от кристаллического сланца. Метаморфические гнейсы образуются в основном из крупнозернистых полевошпатовых пород (от гранита до габбро) или из конгломератов и полевошпатовых песчаников.

Особый тип гнейсов приурочен к краевым частям батолитов, где гранитная магма проникала в виде тонких прослоев по плоскостям сланцеватости в кристаллические сланцы. В результате

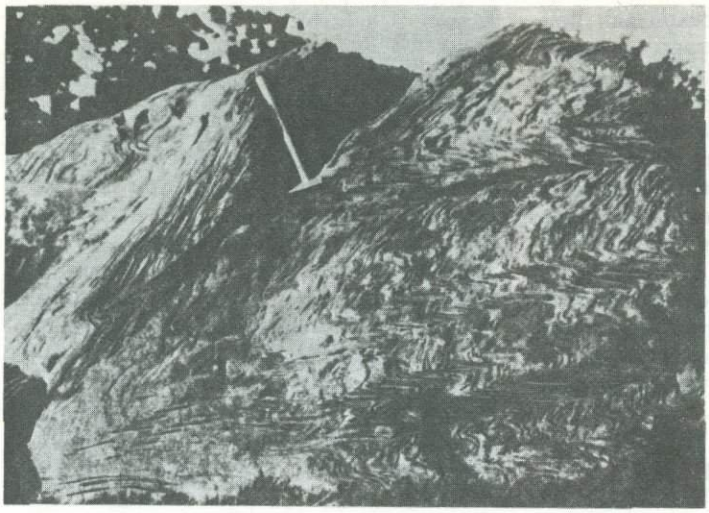


РИС. 8.10
Сложные складки и морщины в кварцитовом сланце на горе Бордмен-Хилл, Кларендон, шт. Вермонт. Длина ручки молотка 38 см. (Фотография Дейла, Геологическая служба США.)

образуется смешанная порода: отчасти кристаллический сланец, отчасти гранит (рис. 8.11). Эта сложная порода имеет расслоенный или гнейсовидный облик. Породы такого типа обычно называют *инъекционными гнейсами* или *мигматитами* (смешанными породами). Мощность этих напоминающих силлы инъекций меняется от нескольких миллиметров до нескольких метров. Порода, заключенная между внедрившимися слоями магмы, подвергается метаморфизму высокой ступени благодаря высокой температуре, высокому давлению флюидов и химическим реакциям с горячими флюидами. Некоторые инъекционные гнейсы смяты в такие замысловатые бессистемные складки, что геологи приходят к выводу о том, что во время складчатости и гранит, и вмещающие породы находились в мобильном состоянии.

В экстремальных случаях в породах наблюдается переход от кристаллических сланцев к инъекционным гнейсам и затем к породе с однородной структурой, подобной структуре гранитов магматического происхождения, описанных в гл. 6. Вопрос об образовании таких «гранитов», имеющих скорее метаморфическое, чем магматическое происхождение, является предметом споров среди геологов (так называемая «проблема гранита»). В настоящее время преобладает мнение, что значительная, если не бóльшая часть гра-



РИС. 8.11
Мигматит – смесь светлоокрашенных кварца и полевого шпата и темноокрашенного кристаллического сланца. Кварц-полевошпатовый агрегат образует секущие жилы и дайки (слева) и согласные инъекции по сланцеватости кристаллического сланца (в центре). Масса была достаточно разогрета для того, чтобы размягчиться, но недостаточно для того, чтобы стать совсем жидкой, как расплав (магма). Мигматитовые оторочки вокруг батолитов могут достигать в ширину сотен метров. (Фотография Геологической службы Канады.)

нитов с постепенными переходами, приуроченных к ядрам интенсивно деформированных горных хребтов, образовалась за счет переработки первичных пород и имеет метаморфическое происхождение, тогда как граниты с четкими границами представляют собой настоящие магматические интрузии. Подобное толкование снимает вопрос об образовании камер для размещения огромных тел батолитов и согласуется с данными полевых наблюдений о переработке пород на месте.

Некоторые гнейсы образовались, по-видимому, при движении во время затвердевания гранитной магмы, вероятно, сразу же после того, как магма остыла и превратилась в тестообразную массу, но до того, как она стала совсем твердой. В таких гранитах кристаллы полевого шпата, слюды и роговой обманки линейно вытянуты, так что текстура очень похожа на текстуру гранитогнейсов, сформировавшихся при метаморфизме. Такая текстура называется *полосчатостью течения*, а породы являются *первичными гнейсами*. Первичные гнейсы к метаморфическим породам не относятся.

НЕСЛАНЦЕВАТЫЕ МЕТАМОРФИЧЕСКИЕ ПОРОДЫ

К этой категории относятся массивные *метаморфические породы, у которых отсутствует* параллельное расположение минералов, обладающих хорошей спайностью. Примером таких пород могут *служить мрамор, кварцит, тальковая порода* (жировик или мыльный камень), *серпентинит, антрацит.*

Мрамор – это кристаллическая известковая порода, образовавшаяся при метаморфизме осадочных известняков или доломитов. Основной минерал – кальцит или доломит. Структура мраморов меняется от тонкозернистой, с размерами зерен меньше миллиметра, до крупнозернистой, с кристаллами до нескольких миллиметров в диаметре. Мрамор – порода более плотная, чем известняк, что обусловлено уменьшением пористости под действием давления и перекристаллизации.

Мрамор, почти целиком состоящий из кальцита, обычно имеет белый цвет, но примеси, почти всегда присутствующие в известняках, придают ему самые разнообразные оттенки. Розовый, красный, желтый и бурый цвета обусловлены различными соотношениями гематита и лимонита; *углеродистое органическое вещество* придает мрамору серую до черной окраску, а серпентин и хлорит – зеленую.

Кварцит представляет собой плотную породу с высоким содержанием кремнезема, образовавшуюся из кварцевых песчаников. Кварциты прекрасно сцементированы *за счет прорастания кристаллов* кварца друг в друга и за счет вторичного кварца, привнесенного в породу растворами и отложенного вокруг первичных песчаных зерен (*рис. 8.12*). *На поверхностях* скола кварцитов наблюдается стеклянный блеск и раковистый излом первичных песчаных зерен. Некоторые кварциты, образовавшиеся из песчаников с небольшим содержанием глины, постепенно переходят в кварц-слюдяные кристаллические сланцы с большим количеством глинистого материала.

Серпентинит – это массивная порода, почти целиком состоящая из минерала серпентина. Обычно серпентин образуется в результате гидротермального изменения оливина в первично богатых оливином магматических породах. Серпентиниты имеют окраску, похожую на окраску змеиной шкуры, – пеструю или пятнистую с различными оттенками зеленого и коричневого цветов. Полагают, что в некоторых складчатых областях пластины и чешуи раздробленного, с зеркалами скольжения серпентинита переместились из верхней мантии.

Местами в серпентинитах заключены полезные ископаемые: хромитовые руды, залежи талька, жилы асбеста – волокнистой разновидности серпентина. Одна из разновидностей серпентинита – *змеевик*, декоративный камень, встречающийся

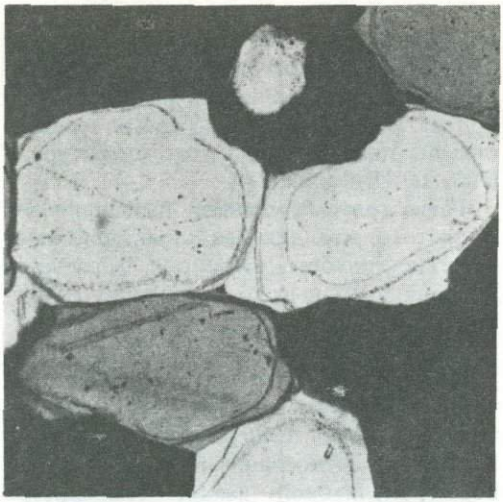


РИС. 8.12
Микрофотография (увеличение в 40 раз) шлифа кварцита, на которой видно вторичное нарастание кремнезема на песчаных зернах кварца. Округлая форма первичных кварцевых зерен подчеркивается тонкими темными концентрическими контурами.

в ассоциации с мрамором и отличающийся красивым сочетанием зеленого и белого цветов.

Тальковая порода (жировик, мыльный камень). Мыльный камень представляет собой массивную породу, состоящую в основном из талька, но содержащую обычно некоторое количество слюды, тремолита (амфибола), хлорита и кварца как акцессорных минералов. Порода мягкая, имеет голубовато-серый или зеленовато-серый цвет, жирная на ощупь. Она образуется в результате гидротермального изменения серпентина и различных магнезиальных пород и, следовательно, содержит водные силикаты.

Антрацит. Там, где слои битуминозных углей испытали интенсивную складчатость, как в восточной части шт. Пенсильвания, угли превратились в антрацит. Антрацит – это блестящий черный плотный уголь с раковистым изломом. Он содержит около 90% углерода, около 8% несгораемой золы и очень немного летучих газообразных компонентов.

МЕТАМОРФИЧЕСКИЕ ФАЦИИ

Метаморфизм разных типов и разной интенсивности, действуя на различные первичные породы, дает неодинаковые результаты. Однако петрологи обнаружили, что в породах разного возраста, но подвергшихся воздействию сходных условий метаморфизма, то и дело встречаются одни и те же ассоциации минералов. Эти ассоциации – обычно от двух до шести характерных минералов – несомненно отражают химическое равновесие при каждой конкретной комбинации условий, которые определяются прежде всего температурой и давлением. Каждая такая группа минералов представляет собой метаморфическую фацию.

Разработана классификация, содержащая шесть главных метаморфических фаций и несколько субфаций. Для подробного освещения этого вопроса потребовалось бы использовать многие незнакомые названия минералов и пород, но понятие *метаморфическая фация* можно пояснить и на нескольких примерах. Раньше мы уже упоминали о выделении зон разной интенсивности в ореолах контактового метаморфизма; это и есть фациальные зоны, и они не требуют дополнительных разъяснений.

Цеолитовая фация. Самая низкая ступень метаморфизма начинается сразу же после диагенеза и литификации, которые сопровождают формирование всех осадочных пород. Во время этой стадии метаморфизма, когда температура и давление невелики, развиваются низкотемпера-

турные водные минералы – цеолиты. С увеличением давления цеолитовая фация сменяется фацией голубых сланцев, а если давление и температура продолжают увеличиваться, то метаморфизм достигает зеленосланцевой фации.

Зеленосланцевая фация. При низкой степени динамометаморфизма в большом количестве образуются зеленые хлорит и эпидот (сложный водный кальциевый алюмосиликат) вместе с кварцем, альбитом и мусковитом. Эта ассоциация минералов определяет зеленосланцевую фацию, или фацию зеленых сланцев. При несколько более высоких температуре и давлении из водных минералов удаляется часть кристаллизационной воды. Дальнейшее увеличение давления и температуры приводит к тому, что эта минеральная ассоциация изменяется до ассоциации амфиболитовой фации.

Амфиболитовая фация. При высоких значениях давления и температуры из хлорита образуется биотит и начинают появляться мелкие кристаллы граната. В результате формируется гранатовый кварц-биотитовый сланец – обычная метаморфическая порода, следующая сразу же за фацией зеленых сланцев. Позже биотит может быть замещен роговой обманкой или сопровождаться ею, кристаллы граната увеличиваются в размере, и возникают метакристаллы метаморфических алюмосиликатов (ставролита, андалузита, кордиерита, силлиманита, кианита). Простой агрегат амфиболитовой фации состоит главным образом из роговой обманки и граната, обычно с некоторым количеством кварца, плагиоклаза и мусковита. Уточняющее название фации дается по одному или нескольким алюмосиликатам. Последовательность хлорит – биотит – роговая обманка – гранат – вторичные алюмосиликаты образует частично перекрывающийся ряд фаций прогрессивного метаморфизма.

Гранулитовая фация. Гранулит представляет собой среднезернистую до крупнозернистой метаморфическую породу, состоящую в основном из калиевого полевого шпата, натриевого плагиоклаза, пироксена, кварца, граната и, возможно, одного или двух метаморфических алюмосиликатов. Гранулиты похожи на граниты или гнейсы, но, поскольку в них нет слюды, эти породы обычно нерассланцованы. Их одинаковые по размеру зерна прорастают друг друга во время перекристаллизации. Это – высокотемпературная (700–800°C) фация.

Фация голубых сланцев, названная так из-за того, что для нее характерно присутствие голубого амфибола, образуется под влиянием высокого давления и низкой температуры. Разделение пород внутри этой фации отражает постепенное увеличение давления от умеренного до чрезвычайно высокого при очень незначительном росте температуры. Поскольку в ряду зеленосланцевой – амфиболитовой – гранулитовой фаций температура увеличивается прямо пропорционально давлению, геологов долгое время озадачивало сочетание высокого давления и низкой температуры. Высокое давление указывает на то, что породы были погружены на большую глубину, в то время как низкая температура заставляет предполагать, что погружение и последующее поднятие пород, вероятно, произошли настолько быстро, что породы, находясь на глубине, не успели прогреться. Сейчас метаморфизм в фации голубых сланцев связывают с быстрым погружением отложений вместе с литосферной плитой, испытывающей субдукцию. Формирующуюся при высоком давлении и низкой температуре фацию голубых сланцев используют как свидетельство степени и скорости субдукции в зонах столкновения литосферных плит. С увеличением температуры фация голубых сланцев может постепенно смениться амфиболитовой, гранулитовой или эклогитовой фацией.

Эклогит – это порода, состоящая в основном из пироксена и граната. Она имеет такой же химический состав, как и базальт. Эклогиты можно получить экспериментальным путем при высоких давлении и температуре (800–1000°C). В некоторых базальтах и ультраосновных интрузиях встречаются небольшие включения эклогитов, поднятые, очевидно, из верхней мантии. Возможно, они представляют собой результат метаморфических

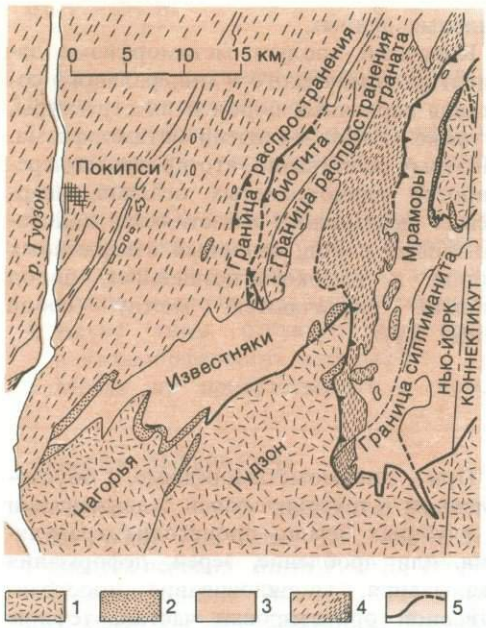


РИС. 8.13
Геологическая карта окраины нагорий Гудзон вблизи города Покипси, шт. Нью-Йорк, на которой показано (штриховкой возрастающей плотности) увеличение степени регионального метаморфизма с северо-запада на юго-восток. Проведены границы распространения биотит-, гранат- и силлиманитсодержащих пород. Зубчики на линиях надвигов изображены на надвинутых крыльях. *1* – гнейсы; *2* – кварциты; *3* – известняки и мраморы; *4* – глинистые (аспидные) и кристаллические сланцы; *5* – разрывы. (По Болку, 1937, и Барту, 1938.)

изменений основного материала на глубине, но они могут быть и породой неметаморфического происхождения.

Обсуждение. Последовательный ряд метаморфических фаций представлен в Финляндии, Норвегии, Шотландии, Канаде (Новая Англия), шт. Нью-Йорк, Мичиган, Айдахо и в других местах. На окраине нагорий Гудзон в юго-восточной части шт. Нью-Йорк (рис. 8.13) мусковит- и хлоритсодержащие сланцы по направлению к юго-востоку уступают место фациальным поясам развития филлитов и кристаллических сланцев, для которых характерно присутствие последовательно биотита, граната и других метаморфических минералов. На юго-востоке кристаллические сланцы сменяются инъекционными гнейсами и первичными гранитами. Все перечисленные породы пересе-

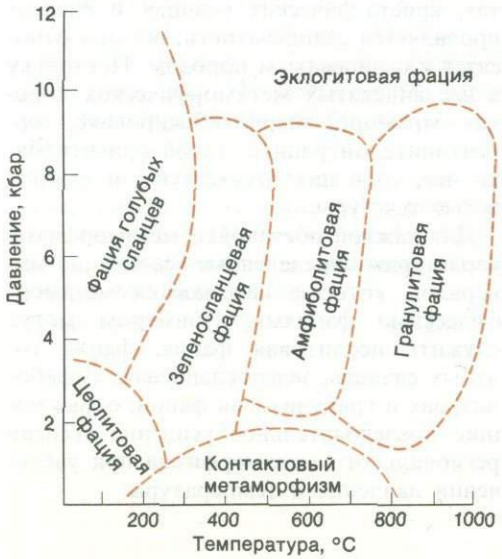


РИС. 8.14
График давление – температура, на котором показано относительное положение полей условий образования характерных метаморфических фаций (*1 кбар = 1000 атм*). (По Тернеру.)

чены дайками пегматитов и кварцевыми жилами. Кроме того, вдоль контактов с гранитами в химическом составе этих пород наблюдаются метаморфические изменения. Такая региональная метаморфическая зональность в направлении с юго-востока на северо-запад связана с увеличением расстояния от магматического источника тепла и активных флюидов.

Примерные условия формирования различных фаций показаны на рис. 8.14, построенном на основе экспериментальных данных.

Конечный продукт метаморфизма зависит от химического и минерального составов первичных пород и их структуры, а также от типа и степени метаморфизма. Поэтому естественно, что продукты переработки глиноземистых осадков, кварцевых песчаников, известняков, полевошпатовых пород, основных изверженных пород и высокомагнезиальных пород сильно различаются между собой (табл. 8.1).

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ

При метаморфизме изменяется состав, структура и текстура минералов и пород в ответ на изменение их геологического положения внутри Земли. Такие преобразования вызваны увеличением давления и температуры и привносом горячих флюидов.

Термальный метаморфизм, причиной которого является общий прогрев в недрах Земли, приводит к перекристаллизации более податливых пород, например осадочных; их структура при этом становится более грубой и возникают новые минеральные ассоциации.

При гидротермальном метаморфизме полевые шпаты преобразуются в глинистые минералы или мусковит, оливин – в серпентин и тальк, биотит – в хлорит и серпентин. Гидротермально измененные породы обычно теряют твердость и осветляются.

При контактовом метаморфизме породы вокруг штоков и батолитов изменяются вследствие разогревания и привноса горячих растворов. Глинистые породы обжигаются до роговиков, зерна в известняках укрупняются, и они превращаются в мраморы, а песчаники изменяются до кварцитов. С горячими растворами могут поступать кремний, железо, медь и другие вещества в количестве, достаточном для формирования рудных залежей. Там, где в зоне контакта в кристаллические сланцы внедряется большое количество магмы, конечным продуктом метаморфизма могут быть похожие на гранит инъекционные гнейсы.

При динамометаморфизме, обусловленном тектоническими движениями в глубинах Земли, происходит грануляция, или дробление, зерен, деформация скалывания, упорядочивание пространственной ориентировки частиц, течение в твердом состоянии, перекристаллизация. Глинистые (аспидные) сланцы и филлиты представляют собой породы низкой ступени метаморфизма. Кристаллические сланцы и гнейсы образуются под воздействием интенсивного длительного регионального метаморфизма высокой ступени.

Вследствие параллельного расположения минералов с хорошо выраженной спайностью в аспидных сланцах, филлитах, кристаллических сланцах и гнейсах проявляется сланцеватость; все они относятся к сланцеватым породам. Поскольку в несланцеватых метаморфических породах – мраморе, кварците, жировике, серпентините, антраците – такой ориентировки нет, то в них отсутствуют и сланцеватые текстуры.

Для каждой обстановки метаморфизма характерны определенные ассоциации минералов, которые называются метаморфическими фациями. Примером могут служить цеолитовая фация, фация голубых сланцев, зеленосланцевая, амфиболитовая и гранулитовая фации, отражающие последовательное усиление степени регионального метаморфизма при увеличении давления и температуры.

ВОПРОСЫ

1. Какого рода изменения происходят во время метаморфизма?
2. Какие условия окружающей среды могут вызвать метаморфизм в горных породах?
3. Сравните и сопоставьте геологические обстановки, в которых образуются главные типы горных пород,– магматические, осадочные и метаморфические.
4. Какие типы структур встречаются в метаморфических породах?
5. Могут ли присутствовать в породе одновременно и осадочные, и метаморфические структуры? А магматические и метаморфические структуры?
6. Что такое метаморфические фации и каково их значение?
7. Термин *структура* используется при описании особенностей как минералов, так и горных пород. Дайте определение этого термина и приведите пример его применения, во-первых, в минералогии, во-вторых, при описании горных пород.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Barth T. F. W., 1962, Theoretical Petrology, John Wiley and Sons, Inc., New York. [Имеется перевод: *Барт Т. Ф. В.*, Теоретическая петрология.– М.: ИЛ, 1956 с издания *Barth T. F. W.*, Theoretical Petrology. A textbook on the origin and the evolution of rock, John Wiley and Sons, Inc., New York, Chapman and Hall, Ltd., London, 1952.]

Ernst W. G., 1969, Earth Materials, Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs, N. J.

Ernst W. G., 1975, Metamorphism and Plate Tectonic Regimes, Dowden, Hutchinson and Ross, Inc., Stroudsburg, Pa.

Fyfe W. S., Turner F. J., Verhoogen J., 1958, Metamorphic reactions and metamorphic facies, Geol. Soc. Amer. Memoir 73. [Имеется перевод: *Файф У., Тернер Ф., Ферхуген Дж.*, Метаморфические реакции и метаморфические фации.– М.: ИЛ, 1962.]

Miyashiro A., 1973, Metamorphism and Metamorphic Belts, John Wiley and Sons, Inc., New York. [Имеется перевод: *Миясиро А.*, Метаморфизм и метаморфические пояса.– М.: Мир, 1976.]

Ramberg H., 1952, The Origin of Metamorphic and Metasomatic Rocks, The Univ. of Chicago Press, Chicago.

Turner F. J., 1968, Metamorphic Petrology, McGraw-Hill Book Company, New York.

Turner F. J., Verhoogen J., 1960, Igneous and Metamorphic Petrology, 2d ed., McGraw-Hill Book Company, New York. [Имеется перевод: *Тернер Ф. Дж., Ферхуген Дж.*, Петрология изверженных и метаморфических пород.– М.: ИЛ, 1961.]

Vernon R. H., 1975, Metamorphic Processes, John Wiley and Sons, Inc., New York. [Имеется перевод: *Вернон Р. Х.*, Метаморфические процессы: Реакции и развитие микроструктуры.– М.: Недра, 1980.]

Williams H., Turner F. J., Gilbert C. M., 1954, Petrography, W. H. Freeman and Company, San Francisco. [Имеется перевод: *Вильямс Х., Тернер Ф. Дж., Гилберт Ч. М.*, Петрография. Введение в изучение горных пород в шлифах.– М.: ИЛ, 1957.]

Winkler H. G. F., 1965, Petrogenesis of Metamorphic Rocks, Springer-Verlag, Inc., New York. [Имеется перевод: *Винклер Г.*, Генезис метаморфических пород.– М.: Мир, 1969.]



9 АТМОСФЕРА И ГИДРОЛОГИЧЕСКИЙ ЦИКЛ

Атмосфера – это воздушная оболочка, окружающая Землю. Поскольку эта оболочка легко поддается сжатию, половина ее массы находится ниже уровня 5500 м (рис. 9.1). Масса атмосферы составляет меньше одной миллионной массы твердой Земли, но ее влияние чрезвычайно велико. Атмосфера поддерживает различные формы жизни на Земле и выполняет другие важные функции.

Атмосфера действует как *термический щит*, который отражает или поглощает бóльшую часть радиации, поступающей от Солнца. В ней происходит распределение получаемого тепла, и она имеет тенденцию предотвращать выделение тепла, действуя подобно зонтику днем и подобно одеялу ночью. Содержащиеся в ней молекулы газов и взвешенные частицы пыли способствуют рассеиванию солнечного света. Следовательно, атмосфера *защищает* Землю и живущие на ней организмы от чрезмерного ультрафиолетового облучения и от интенсивной бомбардировки как крупными, так и мелкими метеоритами.

Сама атмосфера – важный геологический агент. Она является одним из главных факторов выветривания горных пород, в результате которого породы дезинтегрируются, а образовавшиеся мелкие частицы легко удаляются ветром и водой. Атмосфера вступает в химические реакции с породами, при этом образуются новые минералы. Она служит средством переноса водяных паров

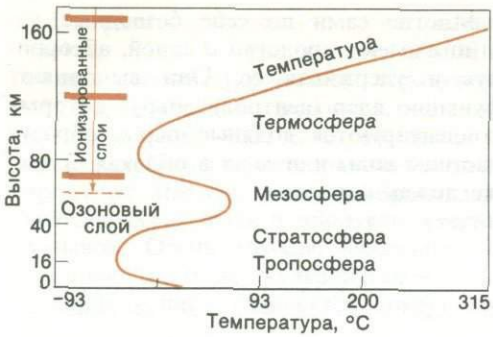


РИС. 9.1
Вертикальный разрез атмосферы, на котором показаны слои с различной температурой.

и твердых частиц. Часть переносимых водяных паров впоследствии выпадает на землю в виде дождя и снега. Из дождя и снега в свою очередь образуются реки и ледники, которые истирают горные породы и перемещают материал к морю.

Важным агентом переноса пыли и песка является ветер. Кроме того, ветер — движущая сила при образовании волн и прибрежных течений, которые также дают большой геологический эффект.

СОСТАВ ВОЗДУХА

Атмосфера представляет собой смесь газов и взвешенных частиц. В сухом чистом воздухе около 78% объема составляет азот, 21% – кислород, 0,94% – аргон, 0,03% – углекислый газ и около 0,003% – смесь неона, гелия, криптона, ксенона, окислов азота, метана и озона. Эти соотношения остаются неизменными на десятки километров в высоту. Кроме того, в отдельных местах в атмосфере иногда присутствуют некоторые летучие органические вещества, промышленный дым, выхлопные газы, окись углерода, сернистый газ и хлор (из вулканов). Углекислый газ, кислород и некоторые соединения азота совершают круговорот: они поглощаются из атмосферы растениями и животными и затем снова поступают в воздух, воду или горные породы. Например, углерод, содержащийся в угле, сначала извлекается из атмосферы растениями. Бóльшая часть минерального вещества, растворенного в воде или отложенного в виде известняков, прежде была захвачена с помощью углекислого газа из воздуха.

Важной составной частью атмосферы является водяной пар, хотя на его долю приходится только 3% ее объема. Это количество эквивалентно слою жидкой воды толщиной примерно 0,4 см, который образовался бы, если бы пар выпал в виде дождя. Большая часть пара содержится в воздухе ниже высоты 3000 м. Количество пара в атмосфере изменяется в зависимости от температуры. В холодном воздухе могут содержаться доли процента водяного пара, а в воздухе некоторых жарких тропических областей его количество может достигать 4%.

Водяной пар увеличивает плотность воздуха, поглощает солнечную радиацию и является источником всех осадков. Высокая влажность и большое количество осадков наблюдаются в таких областях, как бассейн Амазонки, а низкая влажность и чрезвычайно малое количество осадков характерны для полярных областей, например для Антарктиды. Высокая влажность – это один из факторов, объясняющих меньшую величину суточных и сезонных колебаний температуры в тропиках по сравнению с очень сильными колебаниями температуры в пустынях.

Взвешенные частицы в атмосфере представлены каплями воды и кристаллами льда в облаках и тонкой поднятой с поверхности земли пылью, кристаллами соли из высохших брызг морской воды, частицами копоти, сажи, пыльцой, спорами, бактериями, вулканическим пеплом и ме-

теоритной пылью. Эти частицы, имеющие в основном микроскопический и ультрамикроскопический размер, рассеяны в атмосфере над сушей и над морем. Все частицы, но особенно кристаллики льда в облаках, способствуют поглощению, отражению и рассеиванию (диффузии) некоторой части солнечных лучей.

Многие сами по себе безводные частицы имеют сродство с водой, абсорбируя и удерживая ее. Они выполняют функцию ядер (центров), вокруг которых конденсируются водяные пары, образуя частицы воды или льда в облаках, а также дождь или снег.

СЛОИ АТМОСФЕРЫ

Атмосфера разделяется на естественные слои (рис. 9.1), определяемые температурой. В нижнем слое, или *тропосфере*, температура в средних широтах уменьшается приблизительно на 1°С на каждые 160 м высоты. Такая тенденция сохраняется вплоть до высоты 10–13 км, где начинается зона почти постоянной температуры, колеблющейся от –50 до –55°С. Эта холодная изотермическая зона (зона равных температур) представляет собой основание *стратосферы*. Выше стратосферы, толщина которой достигает примерно 20 км, расположены *мезосфера* и *термосфера*. Эти внешние зоны не имеют прямого отношения к геологии и в дальнейшем рассматриваться не будут.

Тропосфера представляет собой область конвективной циркуляции. Приставка *тропо-* означает «поворот» или «переворот». Это относится к движению воздуха, которое обусловлено разностью температур и соответственно разницей между плотностью теплого и холодного воздуха. Конвекция перемешивает огромные массы воздуха. Разность температур над сушей и водой существует повсюду, так же как и конвекция, о чем свидетельствуют дующие с суши и моря бризы,– явление, обычное для многих побережий.

Высота тропосферы уменьшается в зависимости от географической широты приблизительно от 18 км у экватора до 6 км вблизи полюсов. Она слегка изменяется со сменой времен года и летом обычно бывает больше, чем зимой.

В противоположность обычному для тропосферы последовательному уменьшению температуры с увеличением высоты, иногда теплый воздух располагается выше холодного. Это явление, называемое *инверсией* температур,– одна из причин образования смога над промышленными городами.

Заметная разница температур на разных гипсометрических уровнях приводит к соответствующим различиям в климате, растительности и заселенности мест, имеющих одну и ту же географическую широту, но разную высоту над уровнем моря. Вообще увеличение высоты на 1 км по своему влиянию на климат примерно соответствует изменению широты на 800 км по направлению к полюсам, что видно, например, по медленному снижению снеговой линии и верхней границы зоны древесной растительности в высоких горах по мере движения к северу.

Пыль и водяной пар сосредоточены преимущественно в нижней части атмосферы. Количество воды кверху уменьшается, потому что с высотой понижается температура. Следовательно, выше тропосферы нет обычных облаков; большая же их часть находится в нижних слоях тропосферы. А это значит, что в высоких горах больше всего осадков выпадает в средней части склонов, а не на вершинах. Высота обычных грозовых облаков колеблется от 3 до 8 км или от 15 до 20 км в тропических областях с сильными восходящими потоками воздуха.

Стратосфера, расположенная непосредственно над тропосферой, представляет собой область холодного чистого разреженного сухого воздуха с почти постоянной температурой у основания. В отличие от тропосферы она характеризуется постоянным равновесием между поглощаемой и излучаемой радиацией. Следовательно, в ней нет конвекции.

В стратосфере очень мало взвешенных частиц. Иногда на высоте 20–30 км видны перламутровые, или жемчужные, облака, состоящие, вероятно, из кристалликов льда. Сквозь стратосферу непрерывно падает метеоритная пыль, а время от времени в нее выбрасывается вулканическая пыль и продукты ядерных взрывов. Очень мелкие, медленно оседающие частицы вулканической пыли в конце концов разносятся вокруг всей Земли, окрашивая в яркие цвета восходы и закаты Солнца в течение долгих месяцев после извержения. Большое количество вулканической пыли в атмосфере снижает солнечную радиацию, достигающую Земли. Предполагают, что избыток взвешенной вулканической пыли может вызвать похолодание климата на всем земном шаре и, вероятно, начало ледникового периода.

АТМОСФЕРНОЕ ТЕПЛО

Почти все тепло атмосфера получает от Солнца. К другим источникам нагревания атмосферы относится тепло, поступающее из недр Земли, тепло горячих источников и выделений водяного пара и других горячих газов из Земли, но все вместе они дают лишь доли процента от общего тепла.

Около двух пятых солнечной радиации приходится на видимый свет и около половины – на спектр тепловых лучей. Из общего излучения, испускаемого Солнцем в сторону Земли, около 31% отражается назад в космическое пространство, 18% поглощается непосредственно воздухом, особенно водяными парами и облаками, и 51% достигает поверхности Земли. Таким образом, около 69% этого излучения расходуется на нагревание атмосферы, поверхности твердой Земли и поверхности моря.

Нагревание атмосферы происходит в значительной степени не прямо. Короткие волны солнечных лучей в диапазоне от видимого красного до ультрафиолетового света у поверхности Земли преобразуются в более длинные тепловые волны, которые затем, при излучении их с поверхности Земли, нагревают атмосферу. Нижние слои атмосферы разогреваются быстрее верхних, что объясняется указанным излучением с поверхности и тем, что они обладают большей плотностью и насыщены водяным паром.

Лучше всего поглощают излучение в атмосфере водяной пар, углекислый газ и озон. Без них Земля, вероятно, была бы, наподобие Луны, невыносимо жаркой днем и смертельно холодной ночью, а средняя температура понизилась бы приблизительно на 22°С по сравнению с теперешней. Удержание тепла в нижней части атмосферы называется «парниковым эффектом». Некоторые люди обеспокоены тем, что поступление в воздух большого количества углекислого газа, образующегося в результате сгорания угля, нефтепродуктов и природного газа, может вызвать потепление климата на всей планете.Это может привести к ускоренному таянию льда в Антарктиде и Гренландии, повышению уровня Мирового океана и затоплению прибрежных городов.

Эффективность солнечной радиации в процессе нагревания атмосферы изменяется в зависимости от продолжительности дня, угла падения солнечных лучей (который определяется высотой Солнца над горизонтом и временем года), облачности, влажности воздуха и высоты суши над уровнем моря. Тропические области, где Солнце стоит высоко над горизонтом в течение всего года, получают тепла гораздо больше среднего количества; полярные области получают лишь около 1/4 части тепла, достающегося тропикам. Влияние сезонных изменений продолжительности дня и высоты Солнца над горизонтом сильнее всего проявляется в средних и высоких широтах. Горные вершины, над которыми воздух более разреженный, быстро нагреваются днем и точно так же легко остывают ночью. Облачный покров не пропускает излучение сверху и одновременно удерживает тепло, поступающее снизу. Поэтому морозы обычно бывают в ясные тихие ночи.

Выходы коренных пород поглощают, а затем излучают тепло быстрее, чем площади, покрытые почвой и растительностью или снегом и льдом. Суша, кроме того, нагревается и остывает скорее, чем море, так как горные породы поглощают и излучают тепло легче, чем вода. Удельная теплоемкость вещества горных пород (т.е. количество тепла, которое требуется для нагревания 1 г данного вещества на 1°С) составляет около 1/5 удельной теплоемкости воды. К тому же породы отражают меньше лучистой энергии, чем вода, не столь проницаемы для солнечных лучей и меньше подвержены охлаждению за счет испарения. Более того, породы не перемешиваются, как вода. Как над сушей, так и над морем температура воздуха, однако, изменяется под влиянием океанических течений и господствующих ветров.

Согласно подсчетам, количество тепла, получаемого поверхностью Земли в северном полушарии на широте 40°, превышает 5 млн. кВт·ч на 1 акр. Насколько велико это количество энергии, начинаешь понимать тогда, когда становишься свидетелем стремительного таяния снега в теплый день, быстрого испарения влаги после дождя, силы ветра или ярости шторма; все эти процессы приводятся в действие Солнцем.

Распределение тепла в атмосфере происходит за счет *конвекции, теплопроводности* и *излучения*. Особенно сильно тепловая конвекция проявляется в тропиках. Она действует в глобальном и локальном масштабах. Частью конвекционной системы Земли являются также ветры, восходящие и нисходящие воздушные потоки.

Теплопроводность, т.е. передача тепла при непосредственном контакте с теплой или холодной поверхностью, имеет сравнительно небольшое значение, так как воздух – плохой проводник тепла (вспомните рамы с двойными стеклами).

Излучением тепла во внешнее пространство поддерживается баланс тепла и энергии, получаемых от Солнца. Севернее 38°с.ш. тепла излучается больше, чем поглощается. Чтобы компенсировать эту потерю, в верхних слоях атмосферы действует постоянное теплое воздушное течение, направленное к полюсу и пересекающее 40-ю параллель.

В некоторых районах тепловой баланс нарушается на восходе и закате Солнца, при смене времен года, в зависимости от атмосферных условий (облачности, влажности воздуха и содержания в нем пыли), характера поверхности (вода или суша, лес или луг, снеговой покров или голая земля), высоты над уровнем моря. Больше всего тепла излучается ночью, зимой и через разреженный чистый сухой воздух на больших высотах. В конечном счете для Земли в целом потери за счет излучения компенсируются поступающим теплом, так что преобладает состояние динамического равновесия. Иначе бы Земля разогрелась или остыла.

АТМОСФЕРНОЕ ДАВЛЕНИЕ

Атмосферное давление в данной местности – это вес столба воздуха над ней. На уровне моря атмосферное давление составляет в среднем около 0,4 кг/см^2 (14,7 фунта на 1 кв. дюйм); другими словами, оно достаточно для того, чтобы поднять столбик ртути в барометре до высоты 760 мм (29,92 дюйма). Средние годовые давления на уровне моря показаны на рис. 9.2.

С увеличением высоты над уровнем моря атмосферное давление быстро падает. На высоте 5,5 км оно в два раза меньше давления на уровне моря. На одной и той же высоте давление меняется в ответ на изменение температуры и влажности воздуха. При нагревании воздух расширяется и становится легче; водяной пар, будучи в целом легче воздуха, также снижает давление.

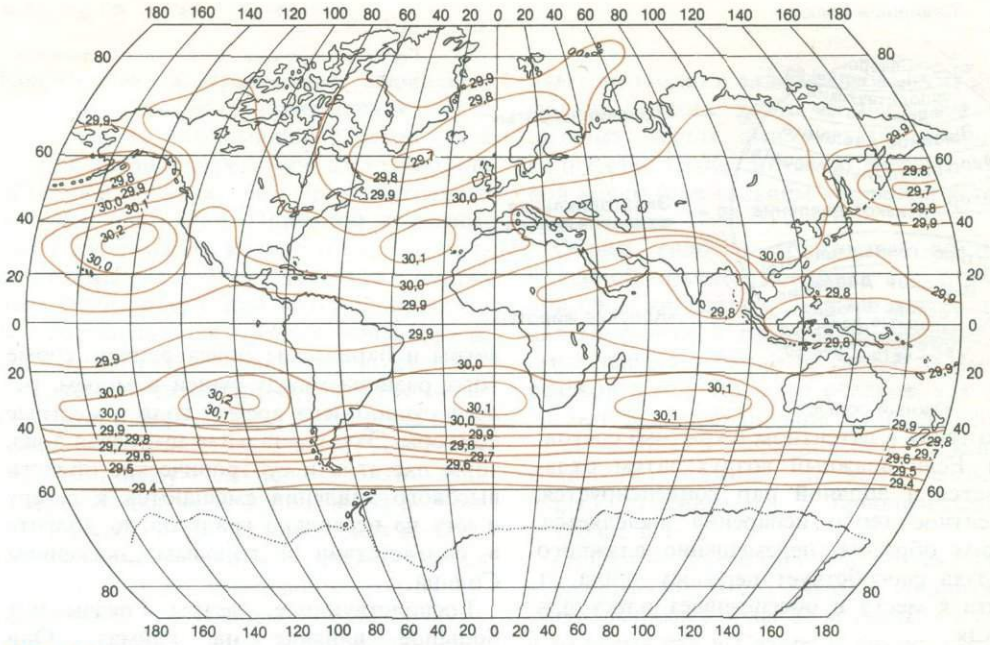


РИС. 9.2

Средние значения атмосферного давления на уровне моря. Особенно примечательны максимумы в субтропиках и минимумы в районе Алеутских островов и Исландии. (По Кёппе и Де Лонгу, 1958.)

ДВИЖЕНИЕ ВОЗДУХА

Движение воздуха обусловлено перепадами давления в атмосфере. Причиной перепадов является в основном неравномерное распределение солнечной энергии. Уже при разнице в 2,5 мм рт. ст. начинается перемещение воздуха. Главные формы движения воздушных масс – это *ветер* и *воздушные потоки*.

Ветер представляет собой движение воздуха преимущественно в горизонтальном направлении из области высокого давления в область низкого давления под действием гравитационных сил. Его скорость пропорциональна величине градиента давления, т. е. скорости изменения давления по горизонтали на заданном высотном уровне. Как и при течении воды, чем больше («круче») градиент, тем больше скорость. Сила и направление ветра могут изменяться за счет трения, турбулентности, вихревых движений, вращения Земли, центробежной силы.

Воздушные потоки. Воздушными потоками называют в основном вертикальное перемещение воздуха. Примером могут служить конвекционный подъем теплого влажного воздуха и нисходящий поток холодного сухого воздуха. Ветры, стекающиеся со всех сторон в область низкого давления, в конце концов образуют единый восходящий воздушный поток. Поднимающийся воздух вследствие расширения охлаждается, а опускающийся благодаря сжатию нагревается.

Результаты перемещения воздушных масс. Описанные формы движения воздуха распределяют по Земле тепло и влагу. Особую роль в распределении тепла играет водяной пар, содержащийся в воздухе. Количество тепла, необходимое для испарения воды, меняется обратно пропорционально температуре. На испарение 1 г воды при температуре 100°C требуется около 540 кал, а при температуре 0°C – около 600 кал. Следовательно, водяной пар переносит значительное количе-



РИС. 9.3
Господствующие ветры и барические пояса у поверхности Земли.

ство тепла в латентном (скрытом) состоянии. Если влажный воздух затем охлаждается и водяной пар конденсируется, латентное тепло испарения выделяется. Таким образом, перемещение влажного воздуха способствует переносу тепла от места к месту и обеспечивает влагу для дождя.

Господствующие ветры. Циркуляция воздуха в атмосфере происходит по определенной схеме (рис. 9.3). Из-за хорошо выраженной разницы в температуре и давлении между экватором и полюсами действует сложная конвекционная система. Она включает 1) *штилевую полосу* на экваторе – зону низкого давления, которая возникла в результате чрезвычайно сильного нагревания и для которой характерны штиль или слабые ветры, восходящий поток влажного воздуха и частые грозы; 2) *северо-восточные пассаты* в северном полушарии и *юго-восточные пассаты* – в южном, дующие почти непрерывно; 3) *субтропические зоны высокого давления* с нисходящими потоками сухого воздуха около 30° северной и южной широты («конские широты» [1]); 4) *господствующие западные ветры* в средних широтах; 5) *полярные восточные холодные ветры*, расходящиеся по спирали от полярных областей высокого давления, и 6) блуждающие пояса *циклонических ураганов* по краям поднимающихся масс холодного полярного воздуха (полярные фронты). На эти господствующие ветры и барические пояса влияет, кроме того, разница между сушей и морем, рельеф суши, смена времен года и местные факторы. Экваториальная штилевая зона, зоны пассатов и субтропические области высокого давления смещаются к северу и югу на несколько градусов по долготе в соответствии с годовым движением Солнца.

Господствующие ветры оказывают большое влияние на климат. Они являются причиной выпадения сильных тропических ливней на наветренной стороне в горах и с подветренной стороны в пустынях. В средних широтах ветры приносят неустойчивую погоду. Кроме того, они вызывают образование океанических течений – дрифтового течения вдоль экватора к западу и огромных круговращений воды в Северной и Южной Атлантике и в северной и южной частях Тихого океана.

Ветры меньшего масштаба. Кроме перемещения огромных масс воздуха в нем происходят многообразные движения меньшего масштаба. К ним относятся береговые и морские бризы, горные и долинные ветры, муссоны, ураганы и тайфуны, грозовые шквалы, торнадо, ветер чинук[1]. Эти различные штормовые и низовые ветры иногда вызывают необычайно высокие приливы и прямо или косвенно участвуют в переносе тепла и влаги, в образовании волн, прибрежных течений, в транспортировке обломочного материала.

[1] «Конскими широтами» принято называть северные широты от 30 до 35°; это штилевая полоса Атлантического океана.– *Прим. перев.*

[1] Чинук (по названию индейского племени) – теплый сухой сильный ветер (фён), дующий с восточных склонов Скалистых гор в Северной Америке. При этом ветре температура воздуха может повыситься за сутки на 10–30°С и более, что вызывает быстрое таяние снега.– *Прим. перев.*

ВЛАГА В АТМОСФЕРЕ

Конденсация и сублимация. Конденсация – это процесс превращения газа в жидкость, сублимация – переход газа сразу в твердое агрегатное состояние или обратный процесс, без промежуточного жидкого состояния. Причиной конденсации и сублимации водяного пара является охлаждение воздуха до точки насыщения. Температура, при которой происходит насыщение, называется *точкой росы*. Если точка росы выше точки замерзания, то путем конденсации образуются облака, туман или роса. При точке росы ниже точки замерзания происходит сублимация и образуются кристаллики льда в облаках или иней. Капли воды в облаках и тумане и кристаллики льда в облаках настолько мелки, что легко остаются в атмосфере во взвешенном состоянии, особенно в восходящем потоке воздуха. Как отмечалось ранее, конденсации способствуют притягивающие воду пылинки или крупинки соли, содержащиеся в атмосфере. Это явление используют с целью вызвать искусственным путем дождь или рассеять туман над аэропортами.

Охлаждение, приводящее к конденсации или сублимации, происходит благодаря излучению тепла, соприкосновению с холодными поверхностями, перемешиванию с более холодным воздухом, расширению воздуха при его перемещении к областям пониженного давления, что может происходить как в восходящем конвекционном потоке, так и при подъеме влажного воздуха над горными хребтами. Грозовые дожди, сопровождающие вулканические извержения и большие лесные пожары, представляют собой особые случаи конденсации влаги в быстро поднимающемся воздухе.

Атмосферные осадки. Капельки воды и кристаллики льда в некоторых облаках растут до тех пор, пока не начинают падать. Их росту способствуют столкновения в турбулентных потоках воздуха или падение сквозь облака. Одни капли остаются во взвешенном состоянии из-за восходящего движения воздуха, другие испаряются на пути вниз, а третьи выпадают на землю в виде осадков. Основные формы осадков – дождь и снег, но в отдельных местах выпадает значительное количество града, дождя со снегом, ледяной крупы (при сильном холодном ветре), росы и инея.

Общее годовое количество осадков в данной местности измеряется толщиной слоя жидкости в дюймах или единицах метрической системы. В среднем на суше выпадает около 66 см (26 дюймов) осадков в год. На море осадков, как полагают, выпадает больше, но наблюдения здесь слишком неравноценны. Среднее количество осадков для всего земного шара оценивается приблизительно в 100 см в год.

Осадки на Земле распределяются очень неравномерно. В шт. Ассам в Индии местами выпадает более 15 м осадков в год, в то время как в Сахаре и других пустынях – меньше 25 см. В некоторых пустынях между дождями иногда проходит несколько лет, но зато они могут быть здесь настоящими ливнями. На основной территории США (рис. 9.4) количество осадков меняется от 100 см в год на Атлантической прибрежной равнине до 75 см в год и меньше на территории Великих равнин, менее 25 см в год в некоторых районах Большого Бассейна и более 250 см в год в окрестностях горы Олимпик на западе шт. Вашингтон.

Различия в количестве осадков, выпадающих на суше на всем земном шаре (рис. 9.5), зависят от географической широты места, близости к морю, рельефа (особенно, если есть горные хребты), господствующих ветров, времени года, частоты штормов, ураганов и тайфунов. Самые обильные дожди выпадают в тропической штилевой зоне на экваторе, где вверх поднимается большое количество влажного воздуха и ливни, как правило, наблюдаются каждый день, а также на наветренных сторонах континентов и горных хребтов. В противоположность этому многие из великих пустынь расположены в субтропических зонах высокого давления, во внутренних частях континентов или с подветренной стороны гор.

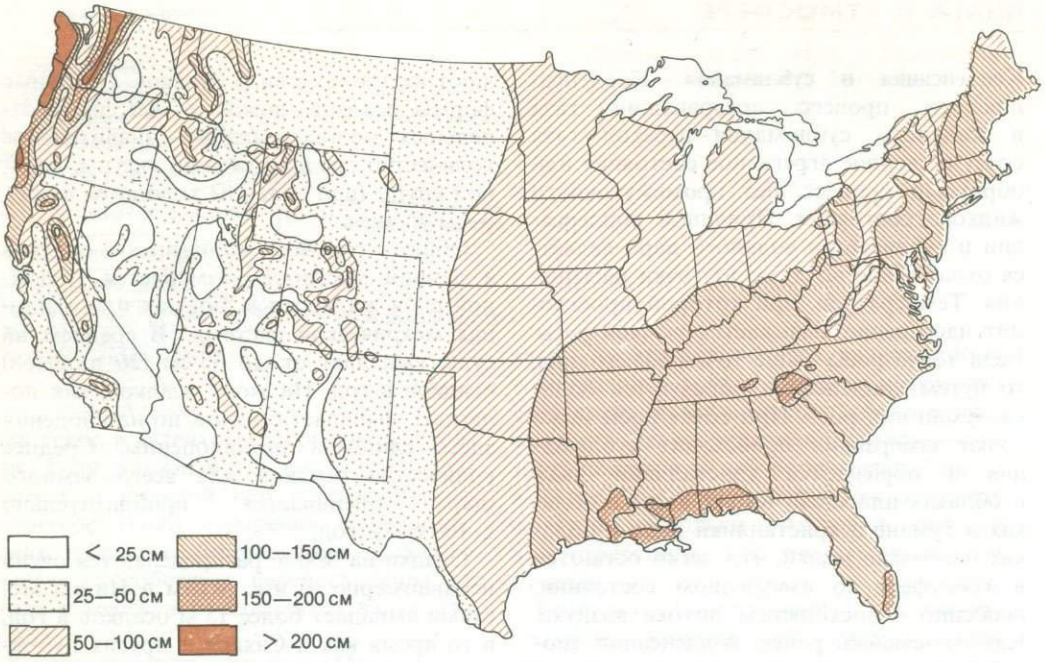


РИС. 9.4
Среднегодовое количество осадков на территории США.

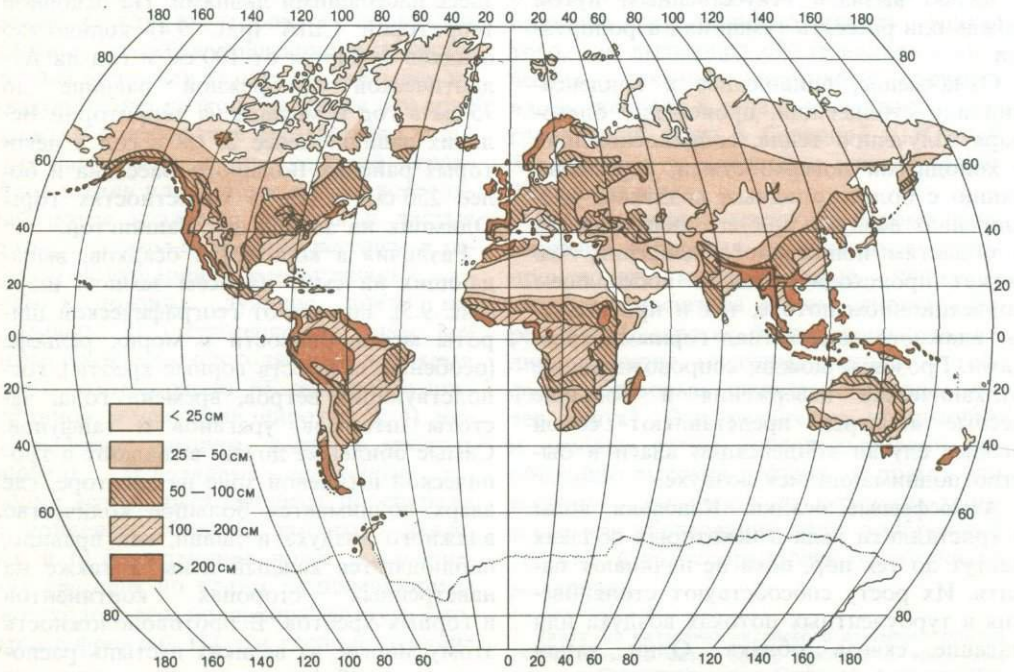


РИС. 9.5
Среднегодовое количество осадков на земном шаре. (По Кёппе и Де Лонгу, 1958.)

ГИДРОЛОГИЧЕСКИЙ ЦИКЛ

Как заметил еще царь Соломон, реки текут к морю, и все же море не переполняется, хотя реки текут вечно. Объяснить эту загадку не могли даже величайшие умы – от Аристотеля (384–322 гг. до н. э.) до Кеплера (1571–1630 гг. н. э.). Измерение количества дождевых осадков и расхода воды в реках, выполненное в XVII в. Парро, Мариоти и Галлеем, привело к созданию концепции гидрологического цикла.

Понятие «гидрологический цикл» охватывает перемещение влаги из моря в атмосферу, оттуда – на сушу в виде осадков, а затем обратный сток в море. В простейшей форме гидрологический цикл осуществляется над акваториями: испарение с поверхности океана, перенос и конденсация влаги в атмосфере и выпадение осадков прямо над морем. Хотя в таком гидрологическом цикле, как подсчитали, участвует 4/5 общего количества воды, совершающей круговорот в природе, нам от этого пользы мало; но та меньшая часть общего количества осадков, которая выпадает над сушей, необходима для жизни.

Гидрологический цикл на суше (рис. 9.6) состоит из нескольких стадий: испарения с поверхности моря или других источников воды, распространения влаги над землей ветром в виде пара или облаков, выпадения осадков и затем прямого, или поверхностного, стока воды в море. Однако на суше осуществляется еще несколько второстепенных замкнутых циклов, поэтому лишь около 1/5 выпавших на землю осадков снова возвращается в море.

Главный источник влаги в воздухе – это испарение из акваторий Мирового океана, озер, прудов, рек, из почвы или с влажных поверхностей. Мировой океан дает около 85% общего количества влаги. Эта влага разносится ветром на большие расстояния и в конце концов выпадает в виде осадков. Часть той влаги, которая выпадает на землю в виде дождя, снега или в виде других осадков, просачивается в почву, рыхлые или даже твердые породы, превращаясь в грунтовые воды. Часть осадков испаряется, иногда еще высоко в воздухе, часть задерживается на поверхности в снежниках, ледниках, пру-



РИС. 9.6

Гидрологический цикл. Солнечное тепло испаряет влагу из морей и озер, прудов, водохранилищ, рек, почвы, растений, падающего дождя. Кроме того, влага поступает за счет транспирации растений и сублимации снега и льда. Осадки выпадают, когда относительно легкий, теплый и влажный морской воздух перемещается в сторону суши и вверх и остывает либо над наклонным фронтом более холодных и тяжелых континентальных воздушных масс, либо в системе конвекционных грозовых потоков, либо поднимаясь над горными массивами. Влага, выпавшая в виде осадков, может аккумулироваться в снежниках, ледниках, прудах, озерах, в почвенных и грунтовых водах. Некоторое количество воды стекает сразу же после выпадения осадков. Грунтовые воды снова выходят на поверхность и испаряются или вливаются в потоки, текущие к океану. Таким образом, гидрологический цикл завершается стоком воды.

дах, озерах или в растениях, а часть воды в потоках и реках – в форме поверхностного стока – устремляется вниз к понижениям в рельефе, озерам или морям.

Значительная часть влаги, выпавшей на суше, просачивается в землю. Иногда дождь едва смачивает верхние несколько сантиметров почвы, и поверхностного стока воды не происходит. Он есть только там, где влаги выпадает больше, чем может просочиться в грунт. С поверхностным стоком на мостовых в городах иногда связаны проблемы дренажной и канализационной сети.

Большая часть воды, просачивающейся в грунт, возвращается в воздух, испаряясь из почвы или при транспирации растений. Некоторое количество воды, просочившейся в землю, позже выходит на поверхность в виде источников и в зонах просачивания. После выхода на поверхность вода может испаряться или вливаться в постоянные потоки, текущие и в периоды между дождями.

ВЛИЯНИЕ ЧЕЛОВЕКА

Мы располагаем множеством способов изменить гидрологический цикл, особенно сток воды. К ним относится разнообразная деятельность по землеустройству, *строительству плотин через речные русла* и по отведению воды или даже повороту течения рек вспять. Тип, степень и характер использования растительности и земли в том или ином речном бассейне можно приспособить, например, для того, чтобы вызвать большее просачивание воды в почву, задержать сток, замедлив таяние снега и льда, и увеличить тем самым общий сток. То, что в высокогорье снежные запасы создаются естественным путем, накапливаясь зимой и тая поздней весной и в начале лета, делает этот снег особенно важной формой осадков. Чтобы лучше использовать такой способ хранения запасов влаги, люди пытаются разными путями увеличить мощность снегового покрова. В шт. Вашингтон предпринимались попытки ускорить таяние ледника летом, чтобы увеличить сток тогда, когда особенно велика потребность в воде для орошения и производства электроэнергии.

Среди множества планов снабжения водой засушливых областей земного шара предложен Проект водного и энергетического союза стран Северной Америки. *В этом проекте рассматривается вопрос* о том, как собрать воду, стекающую с гор западной Канады, и распределить ее между районами Канады, запада США и *Мексики, где не хватает воды.*

Человек может влиять и на другие части гидрологического цикла. Водоемы можно опустошить или наполнить и хранить в них воду. Утечка из расположенных на поверхности водохранилищ может увеличить просачивание воды в грунт. Несколько таких водохранилищ построили намеренно, а ряд других с утечкой воды – неумышленно. Воздействуя на погоду, можно увеличить количество осадков, где и когда это требуется, и принять меры против наводнений. Можно использовать также атомную энергию для осуществления искусственного водного цикла с превращением соленой воды в пресную, что позволяет использовать морскую воду и большие запасы соленых подземных вод.

КЛИМАТ

Атмосфера – это среда, в которой формируется как погода, так и климат. *Погода* представляет собой ежедневное и ежечасное сочетание метеорологических условий, в том числе температуры, атмосферного давления, ветра, влажности, облачности и осадков. *Климат* – это совокупность проявлений погоды во всех ее вариациях в течение продолжительных периодов времени. Его можно охарактеризовать посредством среднегодовых значений температуры, разности между

Таблица 9.1

Классификация климатов

Тропические климаты
- Тропические джунгли в экваториальном поясе низкого давления – Конго, бассейн Амазонки
- Тропическая саванна (с влажным и сухим сезонами) в пассатных широтах, которые несколько сдвигаются в зависимости от времени года, – Бирма, африканский вельд, Судан

Засушливые (аридные) климаты – потенциальное испарение превышает количество осадков
- Пустыни и степи низких широт в субтропических поясах высокого давления – Сахара, Аравийский полуостров, Австралия
- Пустыни и степи средних широт во внутренних частях материков или позади гор – Иран, Монголия, Большой Бассейн на юго-западе США

Теплые (мезотермальные) климаты – умеренно жаркие
- Средиземноморский (субтропический с сухим летом) – Италия, Испания, Калифорния
- Влажный (гумидный) субтропический – юг Китая, юго-восточные районы США
- Морской климат западных побережий с продолжительным дождливым периодом – Западная Европа, юго-восточные районы Аляски

Снежные (с низкими температурами) климаты – умеренно холодные
- Влажный (гумидный) континентальный в средних широтах с сильными ветрами – северные районы центральной части США, Центральная Европа, северные районы Китая
- Субарктический климат высоких широт – северные районы Аляски, Канады и Сибири

Полярные климаты
- Тундра – обрамление Северного Ледовитого океана
- Ледовые щиты – Антарктида, Гренландия

Высокогорные климаты
- Локальные климаты горных хребтов и плато, изменяющиеся в зависимости от высоты над уровнем моря и географической широты, – Анды, Гималаи, Скалистые горы, Тибет, Кения, Мексика

экстремальными значениями температуры, влажности, облачности, количества осадков и распределения их по временам года, штормов и ветров.

Различные климаты, встречающиеся на Земле (табл. 9.1), свидетельствуют о контролирующем влиянии нескольких климатических факторов: 1) географической широты, 2) поясов постоянного высокого и низкого давления, 3) господствующих ветров, 4) штормов и взаимодействующих воздушных масс, 5) распределения суши и акваторий, 6) расстояния до моря, 7) барьеров в виде горных цепей, 8) океанических течений, 9) высоты над уровнем моря. Различия в направлении и силе ветра, дожди, температура, снег и лед и другие особенности климата влияют на активность геологических процессов в разных климатических зонах. Кроме того, поскольку почвы, растительность и сток воды в реках определяются главным образом климатическими условиями, многие геологические процессы – особенно выветривание минералов и горных пород и эрозия суши, обусловленная работой ветра, воды и льда, – сильно различаются в зависимости от климата.

Точно так же, как и сегодня, господствующие ветры влияли на геологические процессы в прошлом. Они влияли на циркуляцию вод в древних морях и, следовательно, на направление переноса мелководных морских осадков. Господствующие западные ветры все так же несли эоловый песок к востоку, где из него образовались мощные толщи песчаников, особенно в шт. Юта.

В субтропическом поясе постоянного высокого давления, где опускающийся воздух нагревается и, значит, становится сухим, расположены семь огромных пустынь: Сахара в Африке, Тар на западе Индии, Калахари на юге и юго-западе Африки, Аравийская пустыня, пустыня Виктория в Австралии, Атакама в Южной Америке и Сонора на юго-западе США и северо-западе Мексики. Существованию пустынь Калахари и Атакама, кроме того, способствуют холодные океанические течения, направленные от берега.

Широко распространенные пустынные отложения соли и гипса, обнаруженные в настоящее время на территории шт. Нью-Йорк, Мичиган, Канзас и даже в канадской провинции Саскачеван, заставляют предположить, что эти породы образовались в поясах высокого атмосферного давления, которые в геологическом прошлом смещались по широте в результате спрединга океанического дна и дрейфа континентов.

Благодаря разнообразному влиянию климатических условий на почвы, растительность, водные ресурсы, земледелие, промышленность, жилищное строительство, на здоровье людей и удобства жизни климатом в значительной степени определяется то, как человечество использует землю в разных частях планеты.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ

Атмосфера состоит главным образом из азота, кислорода, водяного пара и аргона. Ее давление на уровне моря составляет приблизительно 0,4 кг/см^2, а на высоте 5,5 км оно равно всего лишь половине этой величины. По вертикали атмосфера разделяется на следующие зоны: изменчивую тропосферу внизу, холодную стратосферу и более теплые зоны на самых верхних уровнях.

Атмосфера имеет огромное значение как среда, передающая тепло и свет Солнца. Тепло поглощается в основном водяным паром, углекислым газом и озоном и затем распределяется путем конвекции, излучения и теплопроводности.

Из-за перепадов давления воздух циркулирует в тропосфере в виде пассатов, господствующих западных ветров, вертикальных воздушных потоков, полярных ветров, циклонических ураганов и разнообразных ветров меньшего масштаба. Эти перемещения воздушных масс неравномерно распределяют влагу по земному шару.

Гидрологический цикл состоит из испарения (главным образом в море), конденсации (которой благоприятствуют взвешенные частицы), выпадения осадков, возможной инфильтрации на суше и появления воды вновь в родниках и других выходах подземных вод и, наконец, – после больших потерь за счет испарения и транспирации растениями – стока воды к морю.

Климат сильно меняется от района к району в зависимости от географической широты, высоты над уровнем моря, господствующих ветров, препятствий в виде гор и близости к океану. Так как климат влияет на выветривание пород и эрозию суши, атмосфера является важной в геологическом отношении средой.

ВОПРОСЫ

1. И магнитосфера (гл. 1), и атмосфера выполняют защитную функцию для твердой Земли. От чего они защищают?
2. Какова роль атмосферы в нагревании земной поверхности?
3. Опишите общую схему циркуляции воздуха в атмосфере и расскажите о причинах этой циркуляции.
4. Каким образом неровности рельефа, как, например, горы, влияют на циркуляцию воздуха в атмосфере?
5. Является ли распределение суши и воды важным для циркуляции воздуха в атмосфере?
6. Чем отличается погода от климата?
7. От каких факторов зависит климат?
8. Опишите в общих чертах стадии гидрологического цикла.
9. Какие силы или источники энергии управляют гидрологическим циклом?

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Atkinson B. W., 1968, The Weather Business, Aldus Books, Inc., London.

Calder N., 1975, The Weather Machine, The Viking Press, New York.

Chandler T. J., 1972, Modern Meteorology and Climatology, Nelson, London.

Ponte L., 1976, The Cooling, Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs, N. J.

Riehl H., 1972, Introduction to the Atmosphere, 2d ed., McGraw-Hill Book Company, New York.

Trewartha G. T., 1968, An Introduction to Climate, 4th ed., McGraw-Hill Book Company, New York.



10 ВЫВЕТРИВАНИЕ ПОРОД И ПОЧВЫ

Твердую наружную оболочку Земли часто называют *коренными породами*. Обычно они разбиты трещинами и перекрыты рыхлым материалом, который описывается под названием наносов, или *реголита*. Последний состоит из частиц разного размера, образовавшихся из подстилающих коренных пород или из чужеродного материала, принесенного ветром, водой или льдом. Чаще всего верхняя часть реголита изменена до *почвы* – поверхностного слоя, способного поддерживать рост растений. Такое развитие реголита обусловлено изменением физической формы и химического состава поверхностных пород под действием воздуха и воды, этих «стихий» выветривания. Следовательно, термин *выветривание* применяется для обозначения процессов, вызывающих изменение горных пород. Работе воздуха и воды помогают различные организмы. Насыщенная воздухом вода *проникает в трещины, просачивается* в поры, растворяет и преобразует минералы, увеличивается в объеме при замерзании и расширяет трещины. Процессы, начавшись по трещинам, в конечном счете захватывают всю массу породы.

Выветривание пород – процесс отчасти физический, отчасти химический. Различают две фазы выветривания: *дезинтеграцию* и *химическое выветривание*, или *химическое разложение*. Дезинтеграция представляет собой механическое разрушение породы с образованием частиц меньшего размера. *Эти частицы состоят*

из того же самого материала, и минералы в них все еще выглядят свежими. При химическом разложении первичные минералы изменяются и замещаются новыми. Как правило, дезинтеграция и химическое выветривание пород идут одновременно. При этом физическое разрушение сильно облегчает доступ воздуха и воды, разрушающих породу. Что касается эрозии, то выветривание представляет собой лишь первую ее ступень – подготовку материала к перемещению. Термин эрозия включает понятие о механическом измельчении и переносе, а также разрыхлении и растворении.

ФИЗИЧЕСКОЕ РАЗРУШЕНИЕ

Замерзание воды. Лед, образуясь в породах, расклинивает их или вызывает морозное вспучивание. Замерзающая в порах и трещинах вода стремится разрушить породу, так как при замерзании она увеличивается в объеме на 9% и в процессе ее кристаллизации создается высокое давление. Хотя это давление гораздо меньше того, которое необходимо для разрушения крепкой свежей породы, его вполне достаточно для разрушения пород, уже ослабленных трещинами или затронутых выветриванием. Таким образом легко дробятся породы с высокой пористостью, например песчаники или частично измененные породы, поровое пространство которых обычно занимает 10–30% объема. Так же разрушаются трещиноватые породы, в которых трещины распираются ледяными клиньями. Аналогичным образом на вспаханных под зябь полях в северных районах центральной части США почвы осветляются, становятся пушистыми и легкими для вспашки благодаря тому, что зимой и ранней весной они периодически замерзают и оттаивают. Морозное вспучивание приподнимает поверхностные частицы, выносит на поверхность булыжники и выталкивает вверх столбы, сваи и фундаменты.

Под действием мороза в сочетании с другими процессами выветривания могут образоваться необычные эрозионные формы, такие, как, например, «Игла Венеры» (рис. 10.1) и «Старый горец» в шт. Нью-Гэмпшир.

Нагревание и охлаждение. Стальные мосты и бетонные тротуары расширяются в жару и уменьшаются в объеме в холодное время; точно так же чередование нагревания и охлаждения, вызванное суточными и сезонными колебаниями температуры, воздействует на породы. Днем температура воздуха над вершинами гор

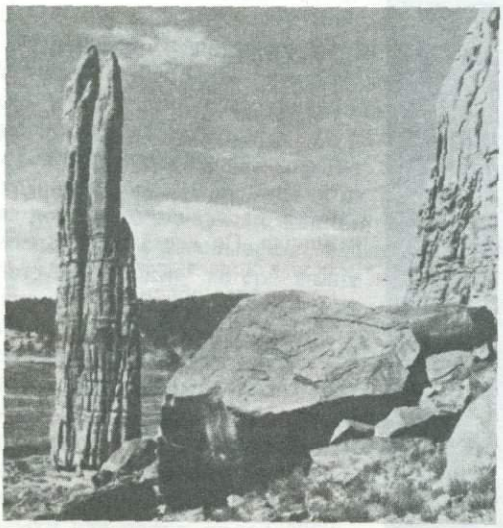


РИС. 10.1
«Игла Венеры» (слева) высотой более 60 м отделилась от скалы (справа) вследствие разрушения трещиноватых пород вдоль вертикальных трещин. Главная причина этого – физическое выветривание. (Фотография Туристического бюро шт. Нью-Мексико.)

может достигать 40°С и более, так что породы становятся теплыми или даже горячими на ощупь, а ночью, когда температура воздуха может упасть почти до точки замерзания, породы остывают. Происходящие в результате этого расширение и сжатие пород, казалось бы, должны способствовать развитию трещин, но степень этого влияния остается неясной. Проведенные в лаборатории эксперименты по многократному нагреванию и охлаждению сухого гранита в интервале 110°С (89 400 раз, что соответствует более чем 200 годам) дали отрицательные результаты. Возможно, требуется большее время, или же здесь не хватает каких-то других факторов.

Большинство высоких горных вершин, не защищенных снегом, сильно разбиты трещинами и могут быть покрыты каменными россыпями, состоящими из угловатых глыб, многие из которых перемещаются вниз по склону. Некоторые вершины разрушаются, пока не приобретут форму куполов, окаймленных скоплениями огромного количества обломков, ждущих дальнейшей транспортировки.

Скопления обломков пород, оторгнутых от скалистых выступов в результате выветривания и скатившихся вниз под действием силы тяжести, называются *осыпями* (рис. 10.2). Угол склона осыпи близок к углу естественного откоса материала и обычно равен 25–35°; он зависит от размера и угловатости обломков и от степени дальнейшего изменения склона под влиянием воды, снега и льда.

Рост кристаллов. В результате химических реакций минералов с кислородом, водой и углекислым газом возникают новые минералы, которые увеличивают объем породы. Рост новых кристаллов

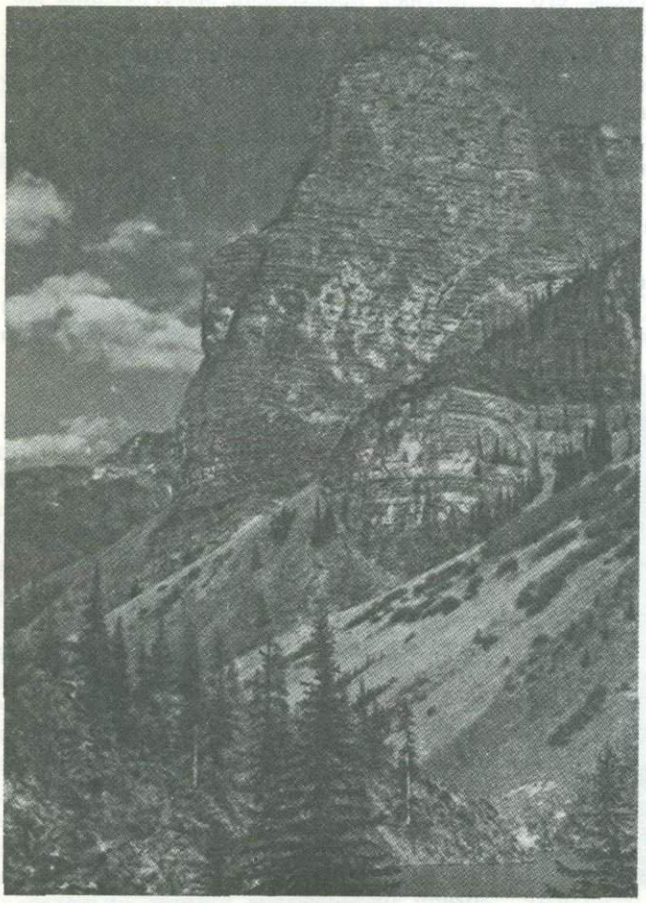


РИС. 10.2

Делювиальные конусы у подножия горы «Вавилонская башня» в долине Тен-Пикс-Валли («Десяти пиков»), национальный парк Банф, провинция Альберта, Канада. По мере того как от скал в ходе выветривания отделяются обломки, они перемещаются под действием силы тяжести вниз, в осыпь. Светлые участки скал – места недавнего отслоения, пополнившего накопления делювиального конуса. (Фотография Канадского национального туристического бюро.)



РИС. 10.3
Дуб, растущий в трещине и раскалывающий глыбу известняка; окрестности города Кернвилл, шт. Техас. (Фотография И. Х. Комстока.)

способствует разрушению пород, так как они с силой раздвигают прежние минералы. Достаточно даже небольшого изменения биотита и полевого шпата. Так, на обнажающихся на поверхность гранитах может образоваться оболочка из несцементированных кристаллов мощностью 10–20 м, как это наблюдается на гребнях гор Ларами в шт. Вайоминг, где такой материал, называемый *дресвой*, добывают, чтобы использовать в качестве железнодорожного балласта. Накопление соли, кальцита и других минералов ниже дневной поверхности в засушливых областях также оказывает разрушающее действие, подобное действию ледяных клиньев.

Разрушение животными и растениями. Растения и животные играют заметную роль в физическом выветривании. Корни прорастают в трещины и расщелины и выталкивают куски породы вверх и в стороны (рис. 10.3), иногда на расстояние до 1 м, точно так же, как они приподнимают и разламывают асфальтовые тротуары. Если ветер валит деревья с корнем, обнажающиеся породы подвергаются дальнейшему разрушению. Дезинтеграции пород способствует рытье нор животными, такими, как земляные черви, муравьи и грызуны, и вытаптывание растительного покрова крупными животными, особенно копытными млекопитающими. Люди тоже вносят свою лепту, делая выемки для дорог, проходя тоннели, разрабатывая карьеры и рудники и возделывая землю. «Вспарывание» целинного дерна в прериях, расчистка кустарников и залесенных участков, равно как и уничтожение лесов вырубкой и огнем, нарушают в отдельных областях существующий баланс между развитием растительного покрова, выветриванием и эрозией почвы, косвенно вызывая убыстрение эрозии и возобновляя выветривание на больших площадях.

Особые случаи разрушения пород. При определенных условиях разрушение приводит к необычным результатам благодаря процессам *шелушения*, *сфероидального выветривания* и *дезинтеграции зерен*.

Шелушение[1]. Причиной этого вполне рядового процесса, при котором от гладкой поверхности подвергающихся выветриванию пород отслаиваются чешуйки или толстые пластины, параллельные поверхности породы, является увеличение объема внешней части породы из-за расклинивающего действия льда, чередующегося нагревания и охлаждения, химических изменений или всех этих процессов вместе. Наружная часть породы отрывается от внутренней до тех пор, пока, наконец, не отвалится и из-под нее не обнажится свежая порода, чтобы в свою очередь подвергнуться атаке выветривания. При шелушении на большинстве пород, независимо от их состава, остаются гладкие плоские или искривленные поверхности. Округлые валуны, булыжники и галька,



РИС. 10.4
Отслаивание пластин породы на горе Хаф-Дом («Полукупол») в Йосемитском национальном парке. Глыбы гранита, разрушенного в результате выветривания, соскальзывают вниз, по пути раскалываясь на более мелкие обломки. Крутые скалы на переднем плане образовались в результате отслаивания породы вдоль крутых трещин и последующей эрозионной деятельности реки Мерсед и существовавшего прежде в этой долине ледника. (Фотография Мэттьюза, Геологическая служба США.)

оказавшись в условиях выветривания, тоже шелушатся. Горы округлой формы, такие, как, например, Стоун-Маунтин в шт. Джорджия и Хаф-Дом («Полукупол») в долине Йосемите в Калифорнии, уже расчлененные в результате декомпрессии – снятия нагрузки на толстые пластины, шелушатся с образованием тонких плоских и искривленных чешуй (рис. 10.4). На куполе Хаф-Дом крутые скалы на переднем плане образовались вследствие отслаивания чешуй вдоль крутой системы трещин и последующей эрозионной деятельности ледника, существовавшего прежде в этой долине.

Сфероидальное выветривание. Постепенное разрушение ограниченных трещинами блоков от краев к центру называется сфероидальным выветриванием (рис. 10.5). Порода вдоль трещин частично или полностью превращается в глину и другие продукты выветривания, тогда как внутренние части монолитов остаются сравнительно свежими и твердыми. Неравномерное увеличение площади испытывающей выветривание поверхности ведет к разрушению породы по вновь образующимся концентрическим трещинам. Мало измененные ядра могут иметь размер валунов, галек или быть еще меньше. Их округлая форма обусловлена выветриванием на месте, а не окатыванием. В случае продолжения выветривания размер ядер под действием дальнейшего шелушения будет уменьшаться до тех пор, пока вся порода не превратится в однородную выветрелую массу.

Дезинтеграция зерен. Ослабление и отделение зерен грубозернистых пород, таких, как граниты, называется дезинтеграцией зерен. При продолжающемся процессе разрушения отшелушившиеся пластинки и обломки пород испытывают дальнейшие дифференцированные воздействия. Разные минералы реагируют на них по-разному. Темноцветные минералы, например роговая обманка и биотит, поглощают тепло и отдают его легче, чем светлоокрашенные полевые шпаты и кварц. Кроме того, каждый ми-



РИС. 10.5
Сфероидальное выветривание, *при котором угловатые,* разбитые трещинами блоки в результате шелушения превращаются в округлые валуны. Долина Американ-Ривер, возле Ривертона, шт. Калифорния. (Фотография Элиота *Блекуэлдера.*)

нерал по-своему реагирует на химическое воздействие. Поэтому в агрегате сросшихся минералов, таком, как гранит, напряжения, возникающие при выветривании, стремятся отделить зерна минералов друг от друга. В конце концов минеральные зерна обособляются и в результате образуется песок, состоящий из несвязанных между собой зерен различных минералов. Мелкие зерна могут удаляться ветром или водой, а крупные, обычно в виде агрегатов, остаются на месте, подвергаясь дальнейшей дезинтеграции.

Дезинтеграция зерен происходит всюду, где обнажаются крупнозернистые породы. О дресве на территории шт. Вайоминг мы уже упоминали. В шт. Колорадо пологие склоны горы Пайкс-Пик покрыты рыхлой породой и обломками минералов. В районе Догтаун-Коммонс на мысе Энн, шт. Массачусетс, огромные гранитные валуны раскрошились и превратились в кучи, состоящие из кристаллов песка, а около Медфорда отщелушившиеся пластины диабаза, слагающего дайку, разрушились и частично разложились до образования мягкой зернистой массы, состоящей из темных кристаллов.

ХИМИЧЕСКОЕ ВЫВЕТРИВАНИЕ

Химическое выветривание представляет собой процесс разрушения, при котором породы распадаются вследствие химического изменения слагающих их минералов. Породы разлагаются, или разрушаются, когда образующие их минералы изменяются в результате *гидролиза, гидратации, карбонизации, растворения* и *окисления.*

Гидролиз. При выветривании гидролиз разрушает атомную структуру кристаллических минералов, особенно силикатов, благодаря действию воды и растворенных в ней ионов. Молекула воды имеет полярное строение: один ее конец несет слабый положительный заряд, обусловленный двумя атомами водорода, другой – отрицательный заряд, обусловленный атомом кислорода. Каждый конец молекулы может присоединиться к противоположно заряженному иону кристалла и вынести его. Кроме того, вода слабо диссоциирует на ион водорода (H^+) и ион гидроксильной группы (OH^-), которые в таком случае приобретают свободу и могут вступить в реакцию с кристаллическими веществами. Природные воды обычно содержат растворенные ионы некоторых других веществ, особенно HCO_3^-, SO_4^{2-}, Cl^-, Ca^{2+}, Mg^{+2}, Na^+ и K^+. Эти ионы также могут замещать заряженные атомы в кристаллах

или реагировать с ними, нарушая таким образом первичную кристаллическую структуру. Кальций, магний, натрий и калий имеют тенденцию растворяться во вступающих с ними в контакт растворах и образовывать бикарбонаты. Соединения алюминия и железа обычно гидролизуются с образованием нерастворимых гидроокислов. Кварц выносится из силикатов в виде коллоидной суспензии в воде или в виде растворимой кремниевой кислоты (H_4SiO_4). Многие минералы особенно уязвимы для гидролиза из-за слабых атомных связей, прежде всего кислородных связей в силикатах.

Так как силикаты составляют около половины объема внешней части континентальной земной коры, их выветривание под действием гидролиза особенно важно. Для гидролиза силикатов характерны следующие реакции:

$$2KAlSiO_3O_8 + 3H_2O + 2CO_2 \rightarrow Al_2Si_2O_5(OH)_4 + H_4SiO_4 + 2KHCO_3,$$

ортоклаз — вода — двуокись углерода — каолинит — кремнекислота — бикарбонат калия

$$2NaAlSi_3O_8 + 3H_2O + 2CO_2 \rightarrow Al_2Si_2O_5(OH)_4 + H_4SiO_4 + 2NaHCO_3,$$

альбит — вода — двуокись углерода — каолинит — кремнекислота — бикарбонат натрия

$$CaAl_2Si_2O_8 + 3H_2O + 2CO_2 \rightarrow Al_2Si_2O_5(OH)_4 + Ca(HCO_3)_2.$$

анортит — вода — двуокись углерода — каолинит — бикарбонат кальция

При этих реакциях одновременно происходит несколько превращений: в результате гидратации образуется каолинит, в результате карбонизации – бикарбонаты калия, натрия и кальция, которые все растворимы в воде, а кварц выносится из ортоклаза и альбита, становясь растворимым в виде слабой кремнекислоты или в коллоидной форме в растворах бикарбонатов калия, натрия и кальция.

Гидратация – это химическое присоединение воды к минералам горных пород с образованием новых минералов, главным образом гидросиликатов и гидроокислов. О роли гидратации в формировании каолинита из полевых шпатов во время их гидролиза говорилось выше. К другим гидросиликатам, которые образуются путем гидратации уже существовавших силикатов, относятся такие минералы, как хлорит, серпентин, тальк и цеолиты. Еще один пример гидратации – формирование гипса из ангидрита (реакция обратима):

$$CaSO_4 + 2H_2O \rightleftharpoons CaSO_4 \cdot 2H_2O.$$

Карбонизация. Кристаллы, содержащие ионы кальция, магния, натрия и калия, вступают в реакцию с природными водами, насыщенными углекислотой, с образованием карбонатов и бикарбонатов этих элементов. Такой процесс химического разложения называется карбонизацией. Все поверхностные воды содержат углекислый газ, поступающий из атмосферы или из разлагающегося в почве растительного вещества. Растворенный углекислый газ реагирует с водой; при этом образуется углекислота:

$$H_2O + CO_2 \rightleftharpoons H_2CO_3.$$

Углекислота диссоциирует на ионы водорода (H^+), бикарбоната (HCO_3^-) и несколько ионов карбоната (CO_3^{2-}). Поэтому насыщенная углекислотой вода растворяет многие вещества легче, чем химически чистая вода, и, значит, является активным агентом выветривания.

Растворение. Воды, содержащей углекислоту, хотя она и имеет лишь слабый заряд, очень много, и в такой воде растворяются бикарбонаты кальция, магния, натрия и калия. Следовательно, растворение этих веществ происходит вместе с карбонизацией и играет ключевую роль в химическом выветривании пород, так как при этом из них удаляются некоторые компоненты. Даже менее растворимые алюминий и железо в небольших

количествах могут быть вынесены из породы. В поверхностных водах содержится гораздо больше растворенных бикарбонатов, чем сульфатов и хлоридов.

Некоторые породы растворяются особенно легко. Очень хорошо растворяются в воде каменная соль и гипс. Пригодные для разработки пласты каменной соли (NaCl) и гипса ($CaSO_4 \cdot 2H_2O$) обычно сохраняются в областях с гумидным климатом вследствие того, что они перекрыты слоями водонепроницаемых глин или глинистых пород; впрочем, в пустынях и соль, и гипс могут залегать прямо на поверхности. Другие растворимые породы – это известняки и мраморы; и те и другие состоят из кальцита ($CaCO_3$). Реакция обратима:

$$CaCO_3 + H_2CO_3 \rightleftharpoons Ca^{2+} + 2HCO^-$$

кальцит (твердый); угле-кисло-та; ион каль-ция; ион бикар-боната

Обнаженные поверхности известняка и гипса вследствие растворения обычно подвергаются травлению с образованием желобков и выемок. В породах, состоящих из двух разных веществ, одно из которых растворяется легче другого, развиваются неровные поверхности, выступы которых сложены менее растворимым материалом. Примерами могут служить бугры и гряды кремнистого вещества на поверхности известняков.

Окисление. Окисление в геологическом смысле – это присоединение кислорода к минералам, особенно к минералам, содержащим железо. Воздух и вода в ионизированной форме разрушают железистые силикаты, такие, как оливин, пироксены и амфиболы, и превращают двухвалентное железо в трехвалентное. Первоначально зеленый или черный цвет минералов при образовании этим путем окиси (гематита) или гидроокиси (гётита или лимонита) железа изменяется до красного, желтого или бурого. Типичная реакция окисления происходит при выветривании оливина:

$$2MgFeSiO_4 + 2H_2O + 1/2O_2 + 4H_2CO_3 \rightarrow$$

оливин; вода; кис-лород; угле-кислота

$$Fe_2O_3 + 2Mg(HCO_3)_2 + 2H_4SiO_4,$$

гематит; растворимый бикарбонат магния; растворимая кремнекислота

или в частично ионной форме

$$2MgFeSiO_4 + 8H^+ + 2O^{2-} + 2OH^- + 4HCO_3^- \rightarrow$$

оливин; ион водо-рода; ион кисло-рода; ион гидрок-сильной группы; ион бикарбонат

$$Fe_2O_3 + 2Mg(HCO_3)_2 + 2H_4SiO_4.$$

растворимый бикарбонат магния; гематит; растворимая кремнекислота

Окисление пирита и других сульфидов ведет к образованию серной кислоты:

$$FeS_2 + H_2O + 7/2O_2 \rightarrow FeSO_4 + H_2SO_4.$$

пирит; вода; кислород; сульфат железа; серная кислота

Образовавшийся таким путем сульфат закиси железа при взаимодействии с водой (гидролизе) распадается на $Fe(OH)_3$ и H_2SO_4, как и при окислении пирита; окисляются и сера, и железо. Серная кислота воздействует на породы, при этом формируются каверны растворения, а сопутствующие процессу окись и гидроокись железа окрашивают и обесцвечивают поверхность породы. Даже небольшая примесь сульфида железа ухудшает качество строительного камня. Причиной того, что некоторые кровельные сланцы меняют свой зеленый цвет на серый или бурый, является главным образом окисление железосодержащих минералов, как при обычном выветривании.

Органические процессы. Растения и животные помогают не только физическому разрушению, но и химическому разложению, и происходит это несколькими способами. Лишайники, которые одними из первых начинают расти на недавно обнажившейся породе, поглощают из породы определенные химические вещества и разъедают ее. Корни других растений удаляют новые порции неорганического материала. При разложении органического вещества выделяются некоторые органические кислоты (одна из них – гуминовая) и углекислый газ; и кислоты,

и углекислый газ увеличивают растворяющую способность воды. Например, в присутствии органических кислот заметно повышается растворимость кварца, железа и алюминия.

Химическая активность мельчайших, но многочисленных и вездесущих бактерий, в результате жизнедеятельности которых образуются аммиак, азотная кислота, углекислый газ и другие химически активные вещества,– это еще один фактор, влияющий на изменение пород и формирование почвы. В то же время растения задерживают влагу, замедляют эрозионные процессы и, следовательно, продлевают химическое выветривание.

Основные результаты химического выветривания. Самый распространенный продукт химического выветривания – это рыхлый глинистый материал, в разной степени окрашенный за счет гематита или лимонита. Чистая глина служит промышленным сырьем для изготовления керамики и наполнителей и для других целей; бóльшая часть глин, образовавшихся из гранитов, содержит различные количества относительно нерастворимых минералов, таких, как кварц, мусковит и акцессорные минералы. Глины, образовавшиеся из других пород, могут содержать другие остаточные минералы. Из выветрившихся рудных жил может высвобождаться золото, а из ультраосновных пород – алмазы. В отдельных местах такие остаточные отложения и связанные с ними склоновые и речные отложения становятся источником ценных минералов.

На равнинах и пологих склонах химическое выветривание может захватывать породы на большую глубину. В округе Колумбия граниты разрушаются до глубины около 25 м, а возле города Атланта, шт. Джорджия,– до 30 м. Известняки на северо-западе шт. Джорджия выветриваются до глубины 60 м, а глинистые породы в Бразилии – до глубины 120 м; эти цифры очень велики.

ВЛИЯНИЕ КЛИМАТА

Характер и степень процессов выветривания определяются в основном климатическими условиями. Для полного и глубокого химического выветривания особенно благоприятен жаркий влажный климат экваториального пояса. Ливневые дожди и высокая температура ускоряют химические процессы; кроме того, здесь велико влияние органических агентов выветривания.

Сухой климат жарких пустынь ограничивает химическое выветривание, но полностью его не исключает. Так как дожди выпадают редко и нерегулярно, то просачивание воды имеет второстепенное значение. Однако некоторое количество воды удерживается в капиллярной форме благодаря поверхностному натяжению. Поскольку эта капиллярная вода поднимается к поверхности, при ее испарении из нее осаждаются соли. Они цементируют рыхлый поверхностный материал или же образуют порошкообразный налет или твердый слой на поверхности земли. Если выделение солей происходит в течение длительного времени, то под землей может образоваться слой мощностью 1 м и больше, состоящий из смеси кремнезема, карбонатов и сульфатов кальция, магния и натрия. Такую породу называют *каличе* (чилийская селитра).

Контраст между влиянием умеренного влажного и сухого климатов хорошо виден на примере Египетского обелиска, презентованного городу Нью-Йорку. Обелиск простоял много веков без видимых повреждений в условиях умеренного сухого климата на севере Египта, однако вскоре после того, как его перевезли в Сентрал-Парк Нью-Йорка, он начал разрушаться, так что пришлось принимать специальные меры для его сохранения.

В умеренных зонах с влажным климатом химическое и физическое выветривание обычно протекает с небольшой скоростью. В холодном сухом климате арктических районов происходит главным образом физическое разрушение пород. На процессы выветривания в горных рай-

онах влияют местные климатические условия, которые зависят от высоты над уровнем моря, географической широты и количества осадков. Количество влаги в атмосфере зависит от близости к морю, господствующих ветров, высоты облаков и т. д. На очень высоких горных вершинах климат бывает сухим, прохладным или холодным, и характер выветривания здесь во многом такой же, как в арктических областях.

ИЗБИРАТЕЛЬНОЕ ВЫВЕТРИВАНИЕ

Никогда все породы или все части одной и той же породы не выветриваются равномерно. Сильно трещиноватые участки разрушаются и разлагаются химически легче, чем массивные разности, и одни компоненты породы растворяются легче других. В слоистых породах разные слои реагируют на выветривание по-разному (рис. 10.6).

В конечном счете все это богатое разнообразие приводит к избирательному выветриванию: легко удаляемые части породы выносятся, а менее измененные, прочные части остаются. Из веществ раз-

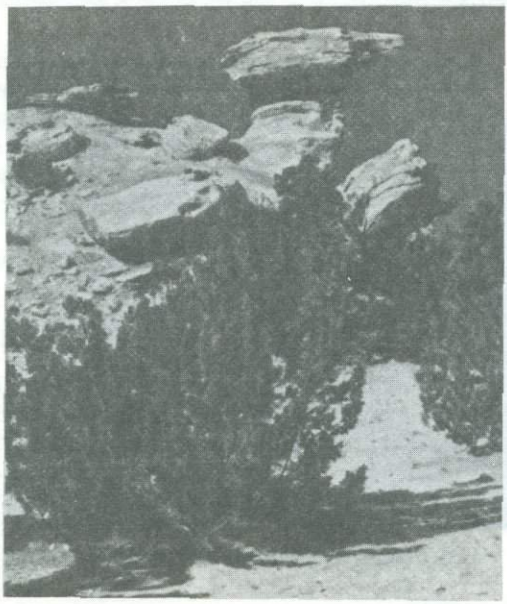


РИС. 10.6
Скала «Верблюд» около города Санта-Фе, шт. Нью-Мексико. Необычная форма этой скалы обусловлена избирательным выветриванием. (Фотография Туристического бюро шт. Нью-Мексико.)

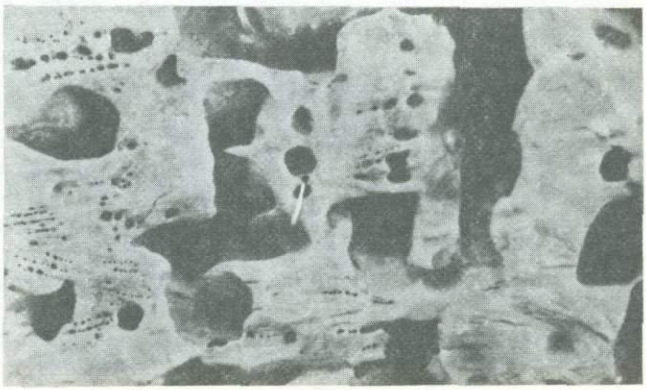


РИС. 10.7
Каверны, образовавшиеся в результате избирательного выветривания. Цемент растворился, и менее крепкие участки песчаника были вымыты; при этом образовались изолированные или соединяющиеся друг с другом каверны. Длина ручки молотка (в центре снимка) 30 см. (Фотография Эрдмана, Геологическая служба США.)

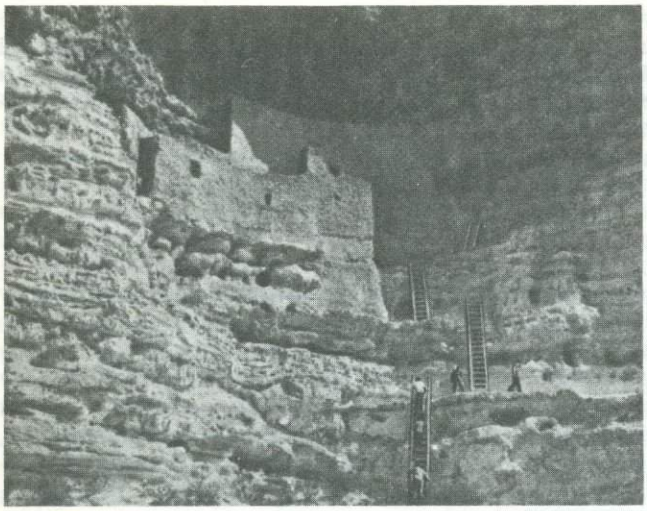


РИС. 10.8
Национальный памятник «Дворец Монтесумы» около Камп-Верда, шт. Аризона. В результате избирательного выветривания в скале образовались гроты, которые местные жители впоследствии приспособили под жилье. (Фотография железнодорожной компании «Атчисон, Топика и Санта-Фе».)



РИС. 10.9
Эрозионные столбы (истуканы), образовавшиеся вследствие избирательного выветривания, национальный парк Йохо, провинция Британская Колумбия. Крупные обломки пород в брекчии защищают лежащие под ними породы эрозионных столбов от выветривания и эрозии. (Фотография Канадского национального бюро путешествий.)

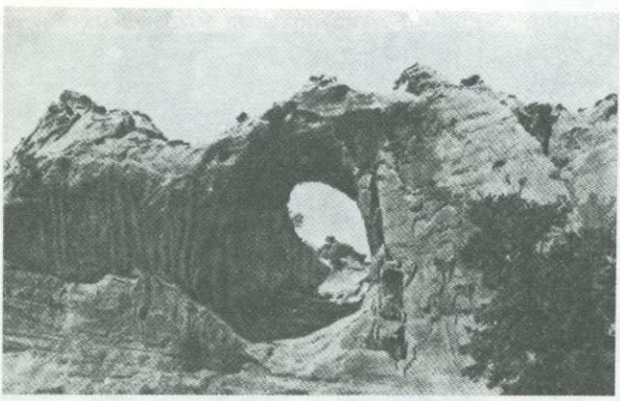


РИС. 10.10
Каменное «окно», северо-западная часть шт. Нью-Мексико. Этот естественный мост образовался в результате избирательного выветривания и эрозии песчаников. (Фотография Туристического бюро шт. Нью-Мексико.)

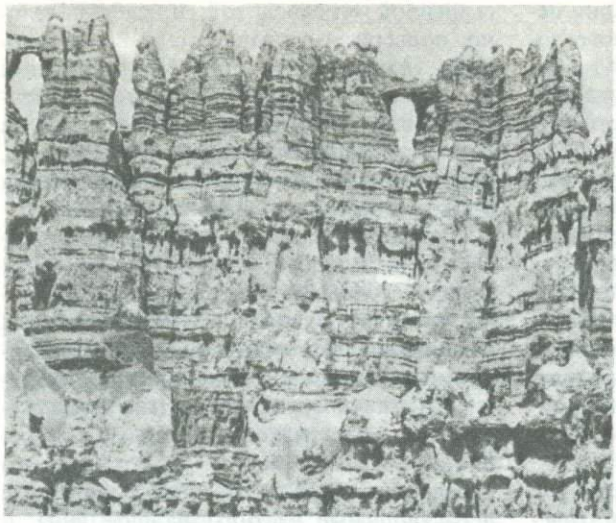


РИС. 10.11
Пинк-Клиффс («Розовые скалы») в национальном парке Брайс-Каньон, шт. Юта. Горизонтально залегающие слои мягких известняков с вертикальными трещинами, подвергшиеся выветриванию и размыву дождевой водой. (Фотография Транстихоокеанской железной дороги.)

личного минерального (а значит, и химического) состава и разной твердости легче всего выветриваются более растворимые и менее крепкие, и на обнаженных поверхностях пород образуются ячейки, выемки и углубления (рис. 10.7, 10.8).

Останцы причудливой формы называются *эрозионными столбами* или *истуканами* (рис. 10.9). Другие формы выветривания – «каменные окна», мосты, расселины по трещинам, различные ребристые поверхности, поверхности, испещренные желобками и кавернами (рис. 10.10, 10.11). Удаление рыхлого материала происходит под действием силы тяжести, дождевого смыва и ветра.

ВЫВЕТРИВАНИЕ ГЛАВНЫХ ТИПОВ ПОРОД

Граниты. Разрушаясь полностью, гранит распадается на слагающие его минералы – кварц, полевой шпат, роговую обманку и слюду, причем частицы имеют песчаную размерность. При неполном разрушении гранита получаются агрегаты этих минералов более крупного размера.

Если гранит разрушается на месте своего образования, то полевые шпаты замещаются глинистыми минералами и растворяются, а роговая обманка и, возможно, биотит замещаются гематитом или лимонитом с небольшим количеством глинистого вещества и тоже растворяются. Однако кварц, мусковит и акцессорные минералы (например, циркон и гранат) сохраняются почти неизменными. Калий, натрий, кальций, магний и кремнезем выносятся с растворами. После этого остаются песчанистые слюдистые глины, в той или иной степени окрашенные гематитом или лимонитом. Если содержание железа невелико, такие глины после промывки и удаления зерен кварца и чешуек слюды можно использовать для изготовления керамики.

Базальты разрушаются механически до базальтовых обломков размером от крупных глыб и валунов до песчаной и алевритовой фракции. Их базальтовый состав, как правило, не вызывает сомнения.

Так как обычные базальты состоят из плагиоклаза с высоким содержанием кальция, а также из пироксена и оливина, при их химическом разложении образуются глины, значительное количество гематита или лимонита и существенное количество растворимых кальция, магния, натрия и кремнезема. Остаточные глины, лежащие на базальтах, обычно окрашены в глубокие тона красного, коричневого или желтого цвета.

Песчаники. Продукты выветривания песчаников зависят от их минерального состава. Кварцевые песчаники имеют тенденцию снова превращаться в рыхлые кварцевые пески, так как кварц устойчив к любым химическим изменениям, не считая удаления цемента из межзерновых промежутков. Аркозовые (полевошпатовые) песчаники во время выветривания ведут себя почти так же, как граниты, а граувакки, состоящие из кварца, полевых шпатов, железомагнезиальных минералов, обломков пород, алевритового и глинистого материала, дают, как и следует ожидать, смесь продуктов выветривания. Почти то же самое можно сказать и о конгломератах.

Известняки. Выветривание известняков особенно сильно зависит от климатических условий, в которых оно происходит. Самые благоприятные условия – высокая температура окружающей среды и обилие осадков. В областях с теплым и влажным климатом известняки легко выветриваются; при этом образуются понижения в рельефе, поскольку продукты выветривания выносятся в виде растворов и перемещаются текучими водами в виде обломков, у которых сопротивление механическому разрушению невелико.

В областях с аридным и полуаридным климатом известняки образуют устойчивые хребты или возвышенности. В таких условиях эти породы, уже трещиноватые, разрушаются дальше посредством механического выветривания (рис. 10.12). Хотя известняки растворяются в воде, насыщенной углекислотой, и, следовательно, подвержены химическому выветриванию, которое даже при благоприятных условиях (избыток влаги) протекает медленно, в аридных областях известняки, на которых не произрастает растительность, долгое время сохраняются в виде утесов или бронирующих поверхностей.

Плоские обнаженные поверхности известняков в любом климате могут выветриваться довольно неравномерно, потому что участки химически более чистых известняков легче растворяются. Поверхностные воды, частично несущие углекислый газ и органические кислоты, стекают по известняковым скалам, по трещинам и пустотам и по мере этого растворяют породы. Дезинтегрированные нерастворимые частицы падают вниз, и в конце концов на поверхности известняков образуются широкие, более или менее параллельные борозды, желобки и выемки. Стекая через расширяющиеся в результате растворения трещины и расселины, большая часть поверхностных вод в районах, сложенных известняками, может превратиться в подземные воды.

Известняки, загрязненные примесями, выветриваются до глинистых почв, которые в теплом климате имеют обычно красный цвет. Такие почвы содержат кремнистые частицы и другие нерастворимые остатки, сохраняющиеся после исчезновения известняков. В областях с аридным климатом эти остаточные продукты обычно выдуваются и уносятся ветром в виде пыли.

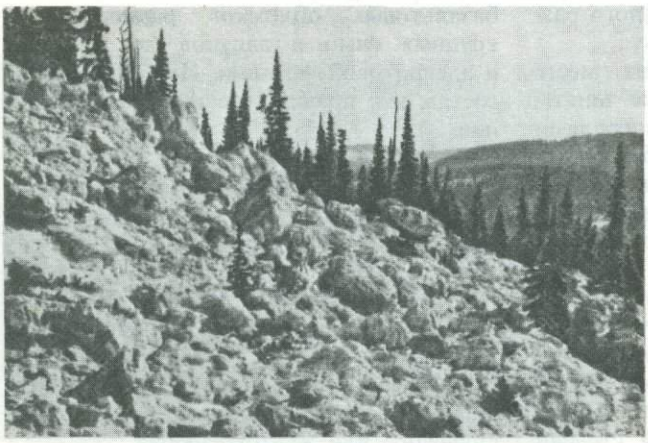


РИС. 10.12
Глыбовая осыпь выветрелых известняков в верховьях ущелья Туэлвмайл-Каньон, шт. Юта. На таком склоне не может образоваться остаточный слой почвы, так как мелкие продукты выветривания смываются водой. (Фотография Лесной службы США.)

ПОЧВА

Почва представляет собой естественную смесь неорганического минерального материала, живого и мертвого органического вещества, воздуха и воды; она имеет характерные структуру, текстуру, цвет и другие физические свойства. Почва образует тонкий слой в верхней части рыхлых отложений (реголита) и формируется при выветривании частично дезинтегрированных и химически разложившихся пород. С точки зрения человека, образование почвы – несомненно самый важный результат выветривания. От места к месту почвы различаются не только по мощности, но и по способности поддерживать рост растений.

Составные части почв. Минеральное вещество почвы может быть представлено песком, алевритом, глиной или смесью частиц этих размерностей, например песчанистым суглинком, алевритистым суглинком или алевритисто-глинистым суглинком. Почвы образуются при выветривании твердых пород или аллювиальных отложений, ледниковых наносов, лёссов и других рыхлых материалов.

Органическое вещество почв состоит из живых микробов (бактерий, грибков и т. д.), земляных червей, личинок насекомых, корней растений, частично разложившихся остатков растений и животных, экскрементов живущих в почве организмов и из различных органических соединений, возникших при химическом распаде. Если происходит неполное разложение органического вещества (с помощью микробов), то выделяются лигнин, целлюлоза, крахмал, азотистые аминокислоты и другие первичные элементы растений, образуя сложную, более или менее коллоидную субстанцию, которая называется *гумусом*. Гумус обеспечивает питательными веществами почвенные микроорганизмы, а также крупные растения, способствует инфильтрации и задержанию влаги в почве, участвует в химическом обмене, влияет на структуру почв и улучшает пахотные земли. От количества гумуса в почве может зависеть выбор землепользования, скажем решение вопроса в пользу леса или пашни, или выбор культуры, например выбор между рожью и кукурузой.

По очевидным причинам и воздух, и вода являются необходимыми ингредиентами почв. Хорошая обработка почвы включает действия, которые обеспечивают свободный доступ и циркуляцию воздуха и воды. Для того чтобы сохранить почву и получать наибольшие урожаи, нужно поддерживать почвенный гумус (лучше всего увеличивая его мощность), правильно используя севооборот, покровные культуры и остатки злаков, внося органические удобрения и предотвращая эрозию почвы.

Живые организмы в почве важны во многих отношениях. Некоторые из них накапливают азот, необходимый для роста растений. В атмосфере содержится неистощимый запас азота, но растения не могут его использовать: им нужно, чтобы растворимые соединения азота присутствовали в растворах, содержащихся в почве. Определенные виды бактерий живут на корнях растений в симбиозе с ними (например, на корнях гороха, бобов, клевера, люцерны, акации) и удерживают азот. Они захватывают азот из воздуха, содержащегося в почве, и превращают его в растворимые нитраты. В этом случае связанный азот становится доступным для питания растений.

Почвенный профиль. Хорошо развитая, или зрелая, почва имеет характерный профиль (рис. 10.13, 10.15). В нем прослеживаются сверху вниз три основных горизонта, которые обозначают буквами A, B и C. Эти горизонты различаются по цвету, структуре, составу и текстуре; мощность их изменчива. Горизонт A (перегнойно-элювиальный) представляет собой верхний слой почвы, обычно богатый органическим веществом и почвенными организмами. Часть растворимых солей горизонта может быть в его нижней части выщелочена. Средний горизонт B (элювиальный), который иногда называют подпочвенным, более или менее окислен и выщелочен, и в нем в результате инфильтрации могут накапливаться глинистые или железистые мине-

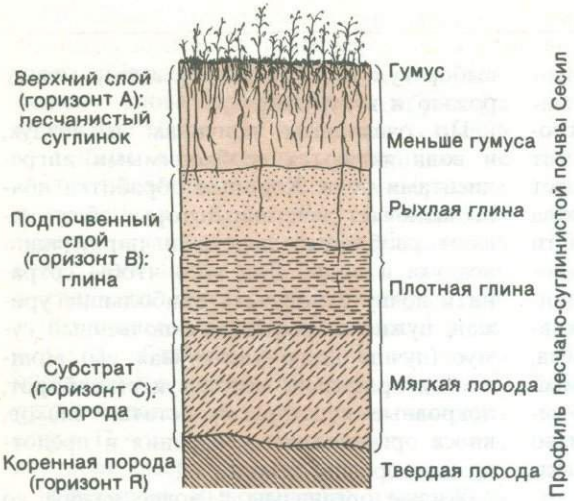


РИС. 10.13
Разрез типичной зрелой почвы с четко выраженной зональностью, Корн-Белт, США. Горизонты А, В и С описаны в тексте.

ралы. Глинистые частицы выносятся из горизонта А и откладываются на минеральных зернах и стенках капилляров. В некоторых участках благодаря такому вторичному отложению минералов образуется сплошная глинистая или железистая корка (хардпэн), которая препятствует движению воды вниз. Горизонт С представляет собой рыхлую и частично выветрелую материнскую породу. Самые заметные в поле особенности, характерные для этого горизонта,– разрыхленное состояние и частичное окисление. Горизонт С залегает на неизмененной материнской породе, обычно коренной. Профессиональные почвоведы используют это расчленение почвы на три горизонта или применяют специальные термины; например, уровень накопления растительного материала вблизи поверхности выше минеральной фракции горизонта А выделяется как горизонт О.

Факторы, влияющие на образование почвы. Главные факторы, которые влияют на формирование почвы,– это *климат, растительность* и *почвенные организмы, рельеф, материнские породы* и *время.*

Климат. Климат определяет не только тип выветривания, но и тип растительности, которые участвуют в формировании почвы. С климатом связано просачивание воды через почву, выщелачивание растворимого вещества и переотложение минеральных солей. В районах с гумидным климатом почвы, как правило, выщелочены сильнее, чем в аридных и полуаридных областях. При выщелачивании удаляется известь и другие вещества, и почва становится более кислой. Высокая температура ускоряет химические реакции, происходящие в почве, как непосредственно–химическим путем, так и посредством реакций, вызываемых живыми организмами. В гумидных областях органические кислоты, образовавшиеся при разложении гумуса, ускоряют выщелачивание почвы.

Растительность и *почвенные организмы.* Растительность способствует просачиванию воды и имеет тенденцию защищать почву от эрозии, удерживая частицы почвы и не давая им перемещаться под действием ветра и воды; тем самым она позволяет почве развиваться до зрелого состояния. Пожары в лесах, на торфяниках и на полях в конечном счете оказывают пагубное влияние. О роли организмов говорилось выше.

Рельеф. Местность с расчлененным рельефом обычно эродируется, тогда как на равнинах продукты выветривания остаются на месте; рельеф суши влияет также на инфильтрацию и движение грунтовых вод. Кроме того, с рельефом связано положение уровня грунтовых вод. Если уровень грунтовых вод совпадает с поверхностью земли или расположен вблизи нее, то развитие почвы существенно затормаживается. Вместо нее могут

образоваться торф или грязь. Различие между почвами северных и южных склонов связано с разным количеством солнечного света, неодинаковым испарением, разной растительностью и крутизной склонов.

Материнские породы. Влияние различных типов пород как источника материала для почв заметно на ранних стадиях почвообразования, но на конечный результат этого процесса материнские породы влияют мало. При одном и том же сочетании условий из самых разнообразных пород формируются почти одинаковые почвы.

Время. Как и в случае большинства других геологических объектов, время является ключевым фактором в процессе развития почв. Чаще всего для того, чтобы образовался зрелый почвенный профиль, необходимы тысячи или десятки тысяч лет, хотя произрастание растений может начаться быстрее, чем через тысячелетие. Процесс формирования юных почв сначала протекает быстро, но по мере того как мощность горизонтов увеличивается, он замедляется. Некоторые юные почвы, с поверхности которых частицы все время выносятся, могут никогда не достичь стадии зрелости или по крайней мере им для этого потребуется значительное время.

В случае достаточного времени и подходящего тропического или субтропического климата зрелая почва подвергается полному выщелачиванию, теряет поддерживающие рост растений питательные вещества, органические вещества и даже бóльшую часть кремнезема и превращается в образование, аккумулирующее преимущественно окислы и гидроокислы алюминия и железа; это образование называют *латеритом*. На части территории Индии, в Юго-Восточной Азии, на Ямайке и в других странах Карибского бассейна, в Бразилии и Центральной Африке развиты неплодородные древние латеритные почвы. В некоторых местах в этих почвах встречаются промышленные месторождения бокситов – сырья для производства алюминия. Часть почв на Гавайских островах и на юго-востоке США является полулатеритной.

Плодородие почв. Постоянная продуктивность почвы зависит от приемов хозяйствования, в том числе от использования удобрений, севооборота и мер по предотвращению эрозии. Крайне необходимые растениям вещества, которые вносят в почву в виде удобрений,– это азот, фосфор и калий. Кроме того, кислые или щелочные почвы хорошо реагируют на внесение кальция в виде гашеной извести, высокосортного известняка или гипса. Некоторым злакам необходимы микроэлементы, такие, как марганец, цинк, медь, кобальт, молибден, бор и сера. Потеря основных элементов усугубляется их непрерывным и невозвратимым удалением в большой массе овощных культур, фруктов, табака и зерна.

Нитраты поступают в почву либо естественным путем благодаря бобовым растениям, либо их получают искусственно из горных пород или с помощью электричества из атмосферного азота. Прежде их получали из пустынных отложений в Чили. Фосфаты получают из фосфоритов, которые добывают в шт. Флорида, Теннесси, Айдахо и Монтана; фосфаты обогащают химическим путем до «суперфосфата». Соли калия, которые до первой мировой войны вывозились почти исключительно из Германии, в настоящее время добывают из соленых озер и шахт на западе Техаса, в шт. Нью-Мексико и в провинции Саскачеван в Канаде.

Обычная причина потери плодородия – эрозия пахотных земель за счет ветра и воды (рис. 10.14). Самый ценный, верхний слой почвы в то же время наиболее уязвим для эрозии (рис. 10.15, 10.16). Его разрушение происходит под влиянием естественных причин (характер растительного покрова, наклон поверхности, ветры в сухие сезоны, интенсивность осадков и т. д.) и приемов хозяйствования (тип выращиваемых культур, способ обработки почвы, распахивание склонов, использование покровных культур, плотность стада животных, выжигание стерни). Истощение почвы из-за неумения хорошо обрабатывать ее вызывает обнищание сельских жителей и голод, а отсутствие средств приводит к тому, что за



РИС. 10.14
Эрозия почвы за счет плоскостного смыва на бобовом поле около Торранса, шт. Нью-Мексико. Хотя плоскостная эрозия и размыв дождями в условиях полуаридного климата происходят спорадически, влияние их велико. Как видно на фотографии, верхний слой почвы смыт и, таким образом, ее плодородие уменьшилось. (Фотография Службы охраны почв.)

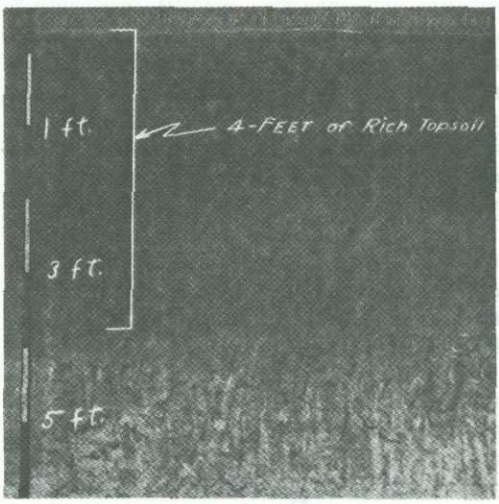


РИС. 10.15
Почвенный профиль с мощным слоем гумуса в горизонте А на равнине в восточной части шт. Техас. (По материалам Службы охраны почв.)

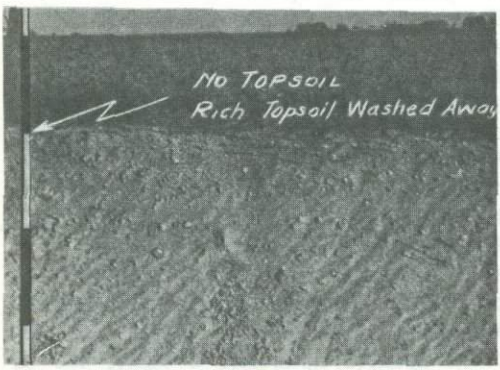


РИС. 10.16
Почвенный профиль на пологом склоне поблизости от места, изображенного на рис. 10.15. Вследствие эрозии слой гумуса из горизонта А вынесен. (По материалам Службы охраны почв.)

почвой ухаживают все хуже и она дает все меньшие урожаи. Таким образом, возникает порочный круг.

Погребенные почвы. Особый интерес для геологов представляют полностью или частично сохранившиеся почвенные профили, погребенные под более молодыми отложениями, а на западе США, возможно, под лавовыми потоками. Во многих местах в северных районах центральной части США почвы, образовавшиеся на ледниковых наносах или лёссах, перекрыты более молодыми валунными глинами или лёссовыми отложениями. Благодаря содержащейся в них глине, органическому веществу, красному или бурому цвету, который обусловлен окислением железа, и выщелоченному состоянию горизонта В эти почвы в хороших обнажениях сразу бросаются в глаза. Во многих случаях в них содержится достаточное количество углерода, иногда в виде торфа или ископаемой древесины, для того, чтобы определить возраст «ископаемой» почвы радиоуглеродным методом, что помогает изучению стратиграфии четвертичных отложений и четвертичных климатов.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ

Разрушение горных пород путем выветривания и образование в результате *почв имеют первостепенное значение для* человечества. Посредством различных физических и химических процессов горные породы разрушаются, и формируются рыхлые глинистые отложения (*реголит*). *Дезинтеграция пород вызывается* расклинивающим действием льда и морозным вспучиванием, нагреванием и охлаждением (?), ростом вторичных кристаллов, расклинивающим действием *корней растений*, *жизнедеятельностью* животных. В результате формируются каменные моря, осыпи, поверхности, покрытые обломками пород, дресва.

Химическое выветривание горных пород осуществляется путем процессов гидролиза, гидратации, карбонизации, растворения, окисления и жизнедеятельности организмов. Многие породообразующие минералы замещаются глинистыми минералами, окрашенными окислами или гидроокислами железа. В то же время ионы кальция, магния, натрия и калия высвобождаются и выносятся в растворе вместе с кремнеземом.

Теплый влажный климат благоприятен для химического выветривания, а в условиях *холодного сухого климата выветривание* обычно ограничивается механическим разрушением. В жарких сухих областях на поверхности могут формироваться отложения солей и самородной чилийской *селитры*.

В результате неравномерного выветривания пород образуются поверхности *с желобками и выемками (кавернами)*, эрозионные столбы (истуканы), естественные мосты и другие причудливые формы выветривания.

Из-за неодинакового первичного минерального *состава выветривание гранитов*, базальтов, песчаников, известняков и других пород происходит по-разному.

Почва представляет собой совокупность минерального и органического вещества, *воздуха и воды, способную поддерживать* рост растений. Особое значение имеют почвенные организмы. Почвы формируются в результате выветривания коренных пород на месте или из рыхлого материала, перенесенного из других областей; на их формирование влияет климат, растительность, рельеф, состав материнских пород и время. Почвенные профили имеют различные характеристики на разных стадиях развития – юной, зрелой и дряхлой. Латериты – это дряхлые почвы тропических районов. Истощение запасов ценных химических элементов в почве можно компенсировать внесением минеральных удобрений.

Погребенные почвы, особенно в разрезах *ледниковых отложений, можно* использовать при изучении четвертичной стратиграфии и климатологии.

ВОПРОСЫ

1. Дайте определение термина «выветривание».
2. Каковы главные агенты физического выветривания и как они действуют?
3. Какие процессы происходят при химическом выветривании горных пород?
4. Опишите вещества, характерные для типичной почвы, и их количественные соотношения.
5. Какие факторы больше всего влияют на формирование почв?
6. Как влияет климат на выветривание пород и формирование почв?
7. Из пород совершенно одинакового состава в разном климате образуются почвы, различающиеся по внешнему виду, химическому составу и плодородию. Почему это так?
8. Мировую проблему питания обычно призывают решать путем использования пустынь и глухих джунглей в слаборазвитых странах. Безотносительно к огромным затратам, используя свои знания о почвах, климатах и выветривании, расскажите, с какими проблемами мы сталкиваемся (не считая огромных затрат), пытаясь использовать почвы пустынь и джунглей для производства продуктов питания.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Birkeland P. W., 1974, Pedology, Weathering, and Geomorphological Research, Oxford University Press, New York.

Carroll D., 1970, Rock Weathering, Plenum Press, New York.

Hunt C. B., 1972, Geology of Soils, W. H. Freeman and Company, San Francisco.

U.S. Dept. of Agriculture, 1957, Soils, Yearbook of Agriculture.



11 ГРАВИТАЦИОННЫЙ ПЕРЕНОС

По мере того как породы выветриваются и разрушаются физическими и химическими процессами, которые рассматривались в гл. 10, на них действуют физические силы, удаляющие обломки и перемещающие их вниз по склону, туда, где из них в конце концов могут сформироваться новые осадки и осадочные породы. Данная система транспортировки материала включает ряд механизмов, которые будут рассмотрены в следующих главах. Эти механизмы различаются, в частности, по скорости движения, по расстояниям, на которых они действуют, и по текучести среды, в которой осуществляется движение. При одних процессах перемещение происходит непрерывно, при других – эпизодически.

Прежде всего рассмотрим *гравитационный перенос*, т. е. перемещение под действием силы тяжести, – процесс, при котором материал перемещается вниз по склону в твердом или полужидком состоянии и в котором участвует небольшое количество воды или льда. Рассматривая гравитационный перенос, следует обратить внимание на движущую силу, перемещаемый материал, постоянство или непостоянство условий окружающей среды, скорость движения и процессы перемещения. Только изучив эти вопросы, мы сможем приступить к классификации процессов гравитационного переноса.

ДВИЖУЩАЯ СИЛА

Хотя трудно представить, чтобы на какой-либо планете гравитационный перенос мог бы долго продолжаться без подогрева изнутри (для образования тектонических или вулканических гор) или поступления солнечной энергии (для реализации атмосферного и гидрологического циклов), все же сила тяжести играет чрезвычайно важную роль, вызывая движение вещества вниз по склону. Эффект действия силы тяжести зависит при этом от характера склона, по которому происходит движение, и внутреннего сцепления и прочности горных пород, реголита и почвы, участвующих в этом процессе.

Склон. Силу тяжести, действующую на поверхности, можно разложить на две составляющие (рис. 11.1, *а*), одна из которых ориентирована в направлении склона (F_s), а другая – под прямым углом, или нормально, к склону (F_n). Сила, направленная вдоль склона, перемещает материал вниз, но ее действие затормаживается силой трения, которая возникает между склоном и движущимся материалом. Пока сила трения больше составляющей силы тяжести F_s, материал остается в устойчивом положении и не перемещается.

Сила трения является функцией как составляющей силы тяжести F_n, направленной под прямым углом к склону, так и физических свойств материала, лежащего на склоне или слагающего склон. Составляющая F_n зависит исключительно от угла наклона. По мере того как наклон увеличивается, составляющая F_n (и, следовательно, сила трения) уменьшается, а F_s возрастает (рис. 11.1, *б*). На вертикальной поверхности F_n равна нулю, и сила трения, замедляющая перемещение по склону, тоже равна нулю. В другом предельном случае, на горизонтальной поверхности, составляющая F_n равна полной силе тяжести, а F_s равна нулю (рис. 11.1, *в*). Таким образом, чем круче склон, тем сильнее он разрушается посредством гравитационного переноса материала. Склон, подвергающийся воздействию гравитационного переноса, стремится приобрести большую устойчивость за счет общего уменьшения угла наклона. Так, на крутом склоне (рис. 11.1, *б*) гравитационный перенос будет происходить до тех пор, пока не сформируется пологий склон вроде изображенного на рис. 11.1, *а*.

В то время как действие гравитационного переноса направлено к достижению равновесия, при котором склон становится устойчивым, другие геологические факторы и деятельность человека могут увеличивать его крутизну. Так, волны у морских берегов, реки и ледники обычно подрезают основания склонов. Вынос отсюда материала увеличивает общий угол склона и уменьшает его устойчивость. Строительство зданий, шоссе и разработка поверхностных месторождений приводят к увеличению крутизны склонов и часто стимулируют процессы гравитационного переноса.

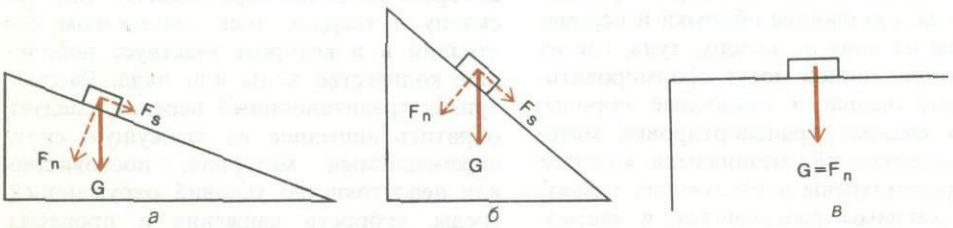


РИС. 11.1

Сила тяжести, действующая на предметы, расположенные на склоне, раскладывается на две составляющие: F_s – силу, направленную вдоль склона и вызывающую гравитационный перенос, и F_n – силу, перпендикулярную поверхности склона и препятствующую перемещению. По мере того как склон становится круче от положения *а* до положения *б*, F_s увеличивается и вызывает сползание материала. При положении *в* F_n равна силе тяжести G, а F_s равна нулю.

МАТЕРИАЛ

Наиболее важные параметры материалов, подвергающихся переносу под действием силы тяжести, связаны со структурой, текстурой и сцеплением между перемещаемыми частицами. Структура определяется размером, формой и характером сортировки зерен и связана с механизмом транспортировки. Взаимное прорастание или хорошая цементация зерен минералов препятствуют гравитационному переносу, и тогда текстура может стать фактором, контролирующим процесс перемещения. Перенос материала могут облегчать ослабленные плоскости, такие, как поверхности напластования, разрывы, трещины, отдельность и сланцеватость.

Сцепление между зернами, обломками или блоками, которые испытывают перенос под действием силы тяжести, обусловлено шероховатостью разделяющих частицы поверхностей и отсутствием сплошных ослабленных плоскостей. Сцепление может уменьшиться при добавлении веществ, выполняющих роль смазки, главным образом воды. Их поступление может произойти естественным путем, как, например, в случае талой или дождевой воды, или искусственно, например в результате ирригации или за счет утечки воды из водохранилищ. Вода прежде всего отделяет частицы друг от друга, обволакивая их пленкой, уменьшающей трение между ними. Кроме того, вода может уменьшить эффективный вес более крупных масс породы благодаря выталкивающей силе, вследствие чего перпендикулярная к склону составляющая силы тяжести F_n тоже уменьшится. В особых случаях вода может абсорбироваться глинистым веществом; это вызывает его разбухание, в результате чего образуются мощные пласты скользкой грязи, которые облегчают движение. И наконец, на некоторых склонах добавление воды облегчает гравитационный перенос вследствие увеличения веса материала за счет накопления воды в порах породы или почвы.

В поведении пород под действием силы тяжести их первоначальный состав чаще не играет большой роли. Чрезвычайно крутые склоны (вплоть до 90° и больше) обнаружены на всех видах магматических, осадочных и метаморфических пород. Некоторые массивные магматические породы чаще других пород образуют очень высокие (более 1000 м) крутые склоны. Однако такие склоны формируются потому, что в этих породах отсутствуют слоистость и сланцеватость, которые характерны для осадочных и метаморфических пород. Первостепенное значение имеют степень выветривания и текстурные особенности пород.

ОКРУЖАЮЩАЯ СРЕДА

Влияние окружающей среды на устойчивость склонов в большой степени зависит от климата и искусственного обводнения. Более сухой климат благоприятен для сохранения крутых склонов; там же, где осадков выпадает больше, склоны выполаживаются из-за существования чехла рыхлых отложений, медленно ползущих вниз по склону. В областях, лишенных естественной растительности из-за деятельности человека, например обработки земли, роста городов или выжигания лесов и кустарников, склоны разрушаются быстрее вследствие отсутствия корневой системы и растительного покрова, которые обычно укрепляют склоны.

СКОРОСТЬ ПЕРЕМЕЩЕНИЯ МАТЕРИАЛА

Скорость процессов гравитационного переноса сильно зависит от механизма перемещения. Скорость изменяется в весьма широких пределах, от 100 м/с и более при падении и обрушении пород до практически незаметных смещений,

связанных с медленным оползанием, или крипом, почвы. Скорость такого медленного течения вниз по склону измеряется лишь несколькими метрами в столетие.

В действительности все перемещения такого рода происходят эпизодически. В одни периоды склон относительно устойчив, в другие он теряет устойчивость, и начинается движение материала. Перемещение может быть вызвано какими-либо регулярно повторяющимися событиями, такими, как сезонные дожди, таяние снега или оттаивание грунта, или чрезвычайными событиями, например землетрясениями.

СПОСОБЫ ПЕРЕМЕЩЕНИЯ

При гравитационном переносе материал может перемещаться разными способами. К ним относятся падение, скатывание и скольжение обломков по крутым склонам, вызывающие полную дезинтеграцию первичного материала и в результате образование скоплений несцементированных обломков. Может происходить также простое соскальзывание по склону больших масс пород, причем деформация внутри самих этих масс будет невелика. И наконец, перемещение может носить характер пластического течения или течения полужидкой массы, в результате чего форма и внутреннее строение первичного материала могут измениться как незначительно, так и коренным образом.

На одном и том же склоне эти процессы могут чередоваться во времени, в том числе даже на продолжении одного эпизода гравитационного переноса. Так, склон, на котором происходит медленное пластическое течение (крип), может внезапно обрушиться и превратиться в оползень. В его пределах могут сохраниться участки с ненарушенной первичной структурой и участки, на которых оползень имеет вид несцементированной массы беспорядочно перемешанных фрагментов.

КЛАССИФИКАЦИЯ СКЛОНОВЫХ ПРОЦЕССОВ

Исходя из вышеизложенного, мы можем разделить процессы гравитационного переноса на три главные категории в зависимости главным образом от скорости и механизма перемещения:

1) крип, или медленное течение, в том числе крип почвы, коренных пород, сползание осыпей, каменных потоков (каменных глетчеров), солифлюкция;

2) быстрое течение, в том числе течение грунта, грязевые потоки, обвалы (обломочные лавины) и оползни;

3) скольжение и падение, в том числе камнепады, соскальзывание обломков и глыб, снежные лавины и оползни-обвалы.

КРИП, ИЛИ МЕДЛЕННОЕ ТЕЧЕНИЕ

Крип представляет собой медленное, но непрерывное перемещение вниз по склону почвы и рыхлых пород чехла под действием силы тяжести.

Крип почвы. Признаки крипа имеются почти на каждом склоне, покрытом почвой. Он проявляется в наклоне изгородей и телеграфных столбов, разрушении и смещении подпорных стенок, искривлении стволов деревьев; оползание почвы отклоняет деревья вниз по склону, тогда как в процессе роста они стремятся снова вернуться в вертикальное положение. Может даже нарушаться линейность полотна дороги и железнодорожных путей.

Разрушение склонов посредством крипа может происходить и при развитии на поверхности сплошного покрова дерна. В верхней части дренажных канав в шт. Канзас медленное сползание глин

и почвы происходит под дерном. Там, где в почве, торфе или дерне содержатся валуны, ниже по склону можно наблюдать окатыши, или катуны. На некоторых задернованных склонах развиты серповидные уступы и трещины, от очень маленьких до крупных, достигающих в длину 30 м, концы которых («рога») направлены вниз по склону. Такие формы рельефа возникают из-за неодинаковой скорости движения материала по наклонной поверхности.

Скорость крипа, которая если и обнаруживается, то обычно только в течение больших промежутков времени, зависит от таких факторов, как изменение температуры, количество атмосферных осадков, угол склона, тип почвы и характер материнской породы (рис. 11.2). В эоловых почвах, таких, как лёсс, способных давать чуть ли не отвесные склоны, крип развивается чрезвычайно медленно, а слабо сцементированные песчаные почвы с высоким содержанием окатанных зерен легче реагируют на воздействие силы тяжести, и крип в них заметнее. Измеренная скорость составляет 3 м за 100 лет. На залесенных склонах переплетенные корни деревьев обычно замедляют движение материала, особенно если он представлен более грубыми частицами. Однако глинистые и другие тонкозернистые минералы почвы свободно проникают сквозь переплетение корней.

В областях с чередованием периодов замерзания и оттаивания скорость крипа увеличивается вследствие расклинивающего действия льда и морозного вспучивания. Силу морозного вспучивания измерили опытным путем и установили, что давление достигает 140 т/м^2. Морозное вспучивание приподнимает поверхностный материал в направлении, перпендикулярном склону горы, и может сдвинуть его на целый метр кверху. Впоследствии, когда замерзший грунт оттаивает, валуны и другие обломки горных пород под влиянием силы тяжести оседают вниз по вертикали, в результате чего их новое положение на склоне оказывается ниже первоначального. Следовательно, при повторяющихся эпизодах замерзания и оттаивания материал перемещается по наклонной поверхности значительно быстрее, чем в случае, если бы температура никогда не опускалась ниже точки замерзания.

В теплом климате крип облегчается действием других факторов. Поверхность глинистых склонов в сухие сезоны может растрескиваться, и, когда такие трещины усыхания заполняются, материал перемещается вниз на большее расстояние, чем вверх. В жарких полуаридных областях, где породы и минеральные зерна разрушаются под действием процессов выветривания, бóльшая часть образовавшихся обломков скатывается вниз по склону. При прочих равных условиях крип идет быстрее в рыхлом материале (реголите), насыщенном водой, но движение происходит даже в областях с наиболее сухим климатом.

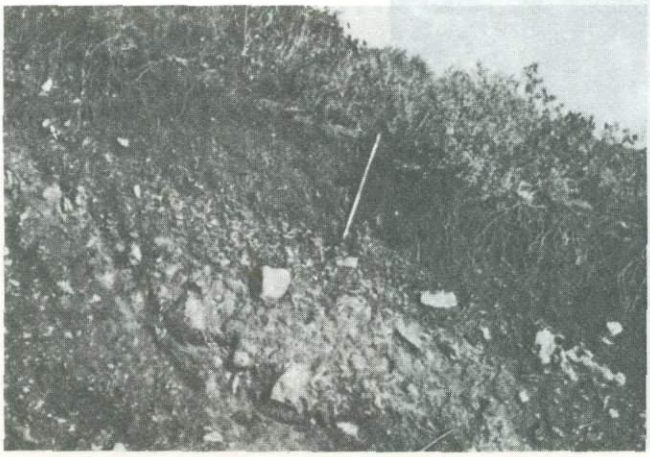


РИС. 11.2
Почва на склоне холма около хребта Трейл-Ридж в шт. Юта. Бóльшая часть подвергшегося выветриванию материала сформировалась выше по склону, но переместилась вниз благодаря оползанию и действию мороза. (Фотография Лесной службы США.)

Крип в коренных породах – это медленное скольжение вниз по склону крупных монолитов или блоков, которое происходит там, где на склонах обнажаются массивные породы с хорошо развитой трещиноватостью. При этом процессе зазор между отколовшимся по трещине монолитом и коренным выходом постепенно увеличивается и в конце концов монолит перекашивается в соответствии с углом наклона склона. В слоистых осадочных толщах или в сланцеватых породах слои загибаются вниз по склону (рис. 11.3). В некоторых обнажениях на склонах гор плоскости напластования не только изгибаются, но могут даже приобретать наклон, обратный истинному падению.

Сползание осыпей и каменных потоков (каменных глетчеров). Сползание осыпей (делювия) – это медленное движение вниз по склону средних по размеру неправильной формы обломков, слагающих осыпь. Такие обломки падают со скал, разрушающихся под влиянием различных агентов выветривания (рис. 11.4). Оползание (крип) этого типа наблюдается всюду, где существуют крутые осыпные склоны; его скорость определяется климатическими условиями. В районах с сильными колебаниями температуры она выше, чем в областях, где суточные изменения температуры малы, как, например, на небольших высотах в тропиках. Самое быстрое движение свойственно холодным районам, где интенсивное проявление сил, возникающих за счет попеременного замерзания воды и последующего таяния льда в пространстве между обломками и внутри обломков, стремится сместить материал вниз по наклонной плоскости.

Каменные глетчеры (которые, кроме того, очень точно называют каменными потоками или каменными реками) встречаются местами в горных районах и в более северных областях (рис. 11.5), где движущийся материал часто скапливается на крутых склонах и в промоинах, образуя обломочные шлейфы, по форме и поведению напоминающие ледники и реки. В их движении важную роль играет действие мороза и цементирующая их масса льда, но главным фактором является, по-видимому, сила тяжести. Их продвижению способствует, кроме того, чередующееся замерзание воды и таяние льда в пространстве между обломками породы.

Растения, особенно корни деревьев, проникающие в трещины и другие доступные для них полости, могут расклинивать и расшатывать глыбы горных пород, отдавая их таким образом во власть силы тяжести, под воздействием которой они перемещаются вниз по склону. Точно так же привести обломки и частицы пород в неустойчивое состояние могут роющие животные и даже шаги животных, проходящих по склону. Может показаться, что все это мало влияет на понижение рельефа,

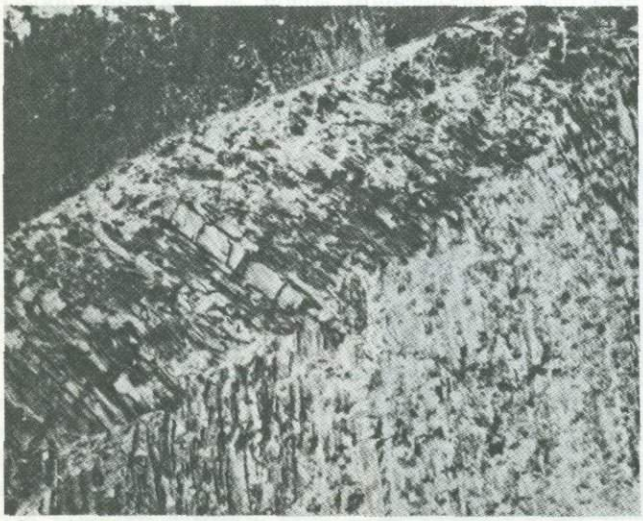


РИС. 11.3

Крип коренных пород, округ Морган, западные районы шт. Виргиния. Крутопадающие слои осадочных пород близ поверхности наклонены вниз по склону. В конечном счете слои под действием силы тяжести могут изогнуться настолько, что приобретут наклон, параллельный склону. В неглубокой выработке на этом обнажении можно было бы получить ложное представление о падении слоев. (Фотография Стоуса, Геологическая служба США.)

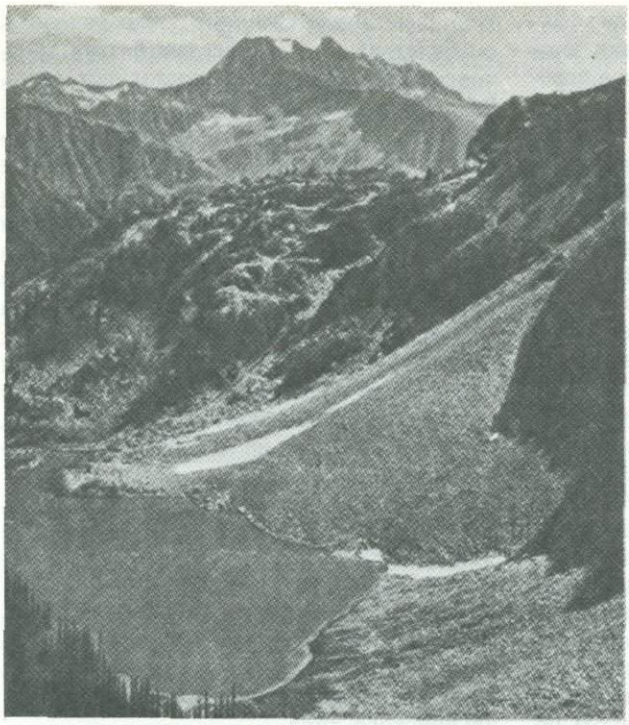


РИС. 11.4
Осыпающийся и оползающий по склону материал возле озера Джейд, национальный парк Маунт-Ревелсток, провинция Британская Колумбия. Обратите внимание на относительную грубость рыхлого материала. Обломки на осыпных склонах легко скатываются и сползают вниз. (Фотография Бюро национальных парков Канады.)



РИС. 11.5
Каменный глетчер в районе реки Коппер на Аляске. Частицы пород впаяны в ледяную массу, которая медленно сползает вниз по склону. Чередующееся замерзание и оттаивание ледяного матрикса (вмещающей массы) способствует проталкиванию этой массы вниз. (Фотография Моффита, Геологическая служба США.)

но растения и животные, как и другие факторы гравитационного перемещения, вносят свой вклад в процесс медленного переноса обломков горных пород на более низкие уровни.

Солифлюкция. Термином «солифлюкция», или «течение почвы», обозначается оползание почвы, которое происходит там, где грунт промерзает на значительную глубину. Когда в теплое время года земля оттаивает, верхняя оттаявшая часть сползает по нижезалегающему мерзлому материалу. Поскольку оттаивание распространяется с поверхности на глубину, талые воды не могут просочиться вниз и верхний промерзший слой почвы в конце концов насыщается водой. В этих условиях он будет двигаться вниз как вязкая жидкость, даже если уклон составляет всего 0,5°. В такой движущейся массе тонкообломочного материала могут переноситься во взвешенном состоянии довольно крупные глыбы горных пород.

Солифлюкция особенно эффективна в горных районах выше линии развития древесной растительности и в полярных и приполярных областях, где существует вечная мерзлота или многолетнее промерзание грунта на глубине, а поверхностные слои размягчаются вследствие летнего таяния содержащегося в них льда.

БЫСТРОЕ ТЕЧЕНИЕ

Причины, которые вызывают медленное течение материала, и факторы, которые влияют на это течение, могут привести и к более быстрому перемещению частиц, например к течению грунта, грязевым потокам и обвалам (обломочным лавинам), но в последнем случае акцентируются условия, благоприятствующие движению. Следовательно, мы не можем провести четкой границы между медленным и быстрым течением.

Течение грунта. Наиболее простая форма течения обломочного материала – течение грунта. Хотя это наименее яркая форма движения, такое течение происходит постоянно, и его конечные результаты могут быть поразительными. По своей природе грунтовые потоки являются оползнями, но движение происходит так медленно, что требуется очень много времени для того, чтобы масса грунта достигла нового устойчивого положения ниже по склону. Перемещение обычно происходит на пологих склонах, и до его завершения проходят месяцы или годы. Немного существует склонов, лишенных грунтовых потоков.

Грязевые потоки (сели). Грязевые потоки, или сели, по своей природе похожи на солифлюкцию, за исключением того, что они движутся намного быстрее и обычно текут по руслам существовавших прежде водотоков. В горах, где имеются крутые склоны и большое количество подходящего материала и где в результате сильных ливней или быстрого таяния мощных толщ зимнего снега может образоваться большой запас воды, часто возникают производящие большое впечатление сели альпийского типа.

Превосходным примером такого грязевого потока альпийского типа может служить поток, образовавшийся на юге Калифорнии в мае 1941 г., когда в не по сезону теплые дни быстро растаяла мощная толща накопившегося за зиму снега и образовавшаяся вода вызвала начало движения. Источником материала служили главным образом выветрелые слюдяные сланцы в зоне дробления разлома Сан-Андреас, высоко на северном склоне хребта Сан-Габриель. Здесь, в верховьях ущелья Хит-Каньон, рыхлый обломочный материал начал скользить вниз по склону, затем сорвался и с шумом устремился вниз, оставив после себя крутой уступ, по форме напоминающий веер, высотой до 300 м, с почти вертикальным дугообразно изогнутым обрывом в верхней части, высотой 30–50 м. Масса обломков не могла быстро проскочить в ущелье через узкий, похожий на горлышко бутылки проход, в результате чего выше его скопилась груда обломочного материала мощностью до 10 м, и более жидкая часть селя стала стекать в виде каскада с этой груды более грубого материала. Напор, сдерживаемый сформиро-

вавшимся таким образом временным препятствием, приводил время от времени к прорывам грязи; периодически выталкиваемая в виде серии волн жидкая грязь с грохотом и скрежетом мчалась вниз, выплескиваясь на высоту до 6 м, снося деревья, кусты, строения, а заодно и очевидцев этого события. Волны грязи поступали почти неделю, поток достигал максимума в полдень, затем постепенно спадал и иссякал ночью. Более жидкие порции грязи содержали 25–30% воды (по весу) и примерно поровну тонко-, средне- и грубообломочного материала, в том числе крупные валуны. В 2 км от начала потока было много обломков до 1 м в диаметре.

В верхнем течении поток двигался быстро, но с расстоянием, по мере уменьшения уклона русла, скорость его падала. На половине пути вниз фронт волны, верхняя часть которого двигалась быстрее нижней, сохранял скорость в среднем около 3 м/с, но в нижнем конце ущелья скорость грязевого потока не превышала 0,5 м/с. В ходе движения материал более тщательно перемешивался и становился похож на свежезамешанный бетон. Там, где поток обладал достаточной силой, он нес погруженные в грязь валуны, там же, где грязь становилась более вязкой или, как в нижней части склона, уменьшалась скорость течения, более тяжелый материал постепенно оттеснялся к краям или выталкивался во фронт потока с образованием здесь скопления грубого материала. Когда шел передовой вал грязи, в некоторых местах она выплескивалась за края своего русла, откладывая часть груза в виде валов грязи.

Ширина этого грязевого потока обычно колебалась от 6 до 50 м, хотя в нескольких местах она достигала 100–300 м. Следы его течения наблюдаются на протяжении 24 км вниз по долине, приблизительно на 1500 м ниже его истока. В перемещение было вовлечено около 1 млн. $м^3$ обломочного материала. В самом нижнем течении потока его движение продолжалось при уклоне ложа около 14 м/км.

Грязевые потоки альпийского типа отмечаются не только в США и Канаде, но и в Андах, Альпах, Гималаях и других местах. Они представляют собой одну из эффектных форм перемещения масс, происходящего в высоких горах в зонах умеренного климата.

Более обычная разновидность грязевых потоков – потоки пустынного типа возникают в засушливых и полузасушливых областях, когда выпадают обильные ливни, и на склоны средней крутизны, где скапливается большое количество обломочного материала, внезапно поступает много воды. Особенно легко такие потоки образуются в тех местах, где в сильно выветрелых породах содержится достаточно глинистого или алевритового материала, служащего смазкой. При движении грязевого потока вниз по крутой долине в него попадает все больше и больше обломков, и в конце концов нагрузка во фронтальной части потока становится так велика, что обломочный материал на какое-то время, как плотина, перегораживает долину. Однако под напором воды вся эта вязкая фронтальная дамба движется вперед вместе со всеми несортированными обломками, погруженными в массу грязи.

В ряде районов США сели представляют собой обычное явление, причем в некоторых областях они вызывают значительные разрушения. Самые большие разрушения бывают связаны с прорывами фронтальной дамбы, образовавшейся там, где грязевой поток выходит из узкой долины на широкую поверхность аллювиального конуса выноса. Суспензионная смесь воды и алевритисто-глинистого материала прорывается через фронтальную дамбу и с ужасающей силой устремляется вперед, неся гигантские валуны и более мелкие обломки. Вдоль фронта хребта Уосатч к северу от города Солт-Лейк-Сити почти каждый каньон имеет конус выноса, образованный грязевыми потоками; многие из этих потоков перегораживали дороги, повреждали или разрушали здания и губили многие акры хороших сельскохозяйственных угодий. Сходные явления отмечаются в гористых районах шт. Аризона, Невада и Калифорния, где огромное количество обломков горных пород выносится с гор и откладывается в предгорьях. На рис. 11.6 изображен грязевой поток в шт. Невада.

Третья разновидность грязевых потоков – это *лахары*, или вулканические гря-



РИС. 11.6
Край современного грязевого потока, или селя, высохшего и растрескавшегося под лучами солнца, на аллювиальном конусе выноса у западного склона хребта Стиллуотер, округ Черчилл, шт. Невада. В районах с сухим (аридным) климатом грязевые потоки образуются в тех случаях, когда обильные ливни смывают глинистые или алевритовые частицы пород с крутых склонов в виде жидкой грязи. (Фотография Элиота Блекуэлдера.)

зевые потоки. Грязевые потоки этого типа обычно образуются после сильного дождя на крутых склонах действующих вулканов, недавно засыпанных мощными, находящимися еще в неустойчивом положении отложениями пыли и пепла.

Оползни. Движение оползня характеризуется перемещением с умеренной скоростью крупной массы породы; скольжение происходит по искривленной поверхности, проходящей внутри склона, и сопровождается деформацией в оползающей массе (рис. 11.7). В верхней части оползня и вдоль его поверхности обычно развивается хрупкая деформация, а на более глубоких уровнях внутри оползневого тела преобладает пластическая деформация вследствие того, что давление и содержание воды с глубиной увеличиваются. Таким образом, верхняя часть оползня бывает отмечена серией эскарпов (рис. 11.8), которые возникают по мере того, как оползень отрывается от более устойчивых частей склона и движется вниз. Однако нижний конец оползневого тела маркируется грядами и буграми сжатия и беспорядочным рисунком течения материала. Поверхность скольжения, по которой движется оползень, имеет, как правило, вогнутую форму: она круче в верхней части склона и выполаживается к его подножию. Перемещение оползней обычно происходит эпизодически, но, раз начавшись, продолжается непрерывно путем сползания по слою смазки вдоль поверхности скольжения в основании оползня.

Обвалы (обломочные лавины). В районах с влажным климатом грязевые потоки образуются редко, но на крутых склонах в гористой местности происходит перемещение обломочного материала, которое отчасти напоминает быстрое движение снежных лавин. Такое быстрое скольжение называется обвалом или обломочной лавиной. Лавины обрушиваются в пределах сравнительно узких зон вслед за обильны-

РИС. 11.7
Оползень, при котором происходит гравитационный перенос как в виде монолитной массы пород, так и в виде обломков. Перемещение происходит главным образом по искривленной поверхности скольжения с отчетливыми уступами у верхнего края и с зоной пластического течения в основании. Подобно всем процессам гравитационного переноса оползневые перемещения стремятся уменьшить в отдельных местах среднюю крутизну склона.





РИС. 11.8

Оползень блокового типа около города Пойнт-Фермин на побережье Калифорнии. В оползнях этого типа тело оползня до некоторой степени сохраняет свою целостность. (Фотография компании «Спенс эйр фотос».)

ми дождями, которые увеличивают вес рыхлого материала на крутых склонах. Соскальзывание обычно происходит по гладкой поверхности подстилающих пород.

Многочисленные лавины обломочного материала отмечаются в Аппалачах, горах Уайт-Маунтинс и Грин-Маунтинс Новой Англии и в северо-западных, прилегающих к Тихому океану районах США. Они представляют собой обычное явление там, где имеются крутые склоны с плохо закрепленным, легко осыпающимся материалом. С обломками пород может смешиваться значительное количество снега и льда, и на заснеженных склонах обломочная лавина может постепенно смениться снежной лавиной. Лавины оставляют обнаженные уступы в местах своего зарождения и сметают препятствия на пути следования.

СКОЛЬЖЕНИЕ И ПАДЕНИЕ

Свободное падение, скатывание, сползание, скольжение и тому подобные явления – обычные и характерные формы перемещения пород и обломочного материала всюду, где действующая на них сила тяжести не уравновешивается другими силами. Хотя перемещение этого типа обычно сопровождает другие виды движения масс, оно и само по себе может определять скорость движения. Когда материал получает возможность двигаться свободно, он устремляется вперед с такой скоростью,

какую позволяет развить сопротивление, которое ему приходится преодолевать. Так, при свободном падении скорость определяется только ускорением силы тяжести и сопротивлением воздуха. Обломки, падающие таким образом, разбиваются при ударе о поверхность внизу, и с этого места могут катиться, сползать или скользить до тех пор, пока не иссякнет энергия движения.

Камнепады, соскальзывание обломков и глыб горных пород. Свободное падение, или камнепад,– основной процесс, питающий обломочным материалом отложения подножий, обычно развитые в областях с расчлененным рельефом. Продукты разрушения горных пород могут накапливаться в виде масс конусообразной формы до тех пор, пока не образуется угол естественного откоса, характерный для такого материала (максимальный угол естественного откоса равен примерно 30°). Когда угол откоса достигает этой величины, ничто уже не препятствует движению обломков при последующих камнепадах. Обломки, ударяясь о поверхность осыпи, могут, следовательно, подтолкнуть другие несцементированные куски породы. После этого часть или вся масса потревоженного материала может скатиться или соскользнуть вниз по склону или скалам до той точки, где движение снова на время приостанавливается.

Крупные глыбы или валуны, которые скатываются или соскальзывают в горные реки и перегораживают их, могут продолжить свое путешествие вниз после того, как река постепенно вымоет из-под них щебень и обломки. Процесс вымывания многократно повторяется, движение возобновляется снова и снова каждый раз, когда глыбы теряют равновесие, и таким образом происходит их перемещение вниз. При этой форме переноса большое количество обрушившихся обломков подвергается выветриванию.

Снежные лавины представляют собой быстрое соскальзывание снега. Когда лавины неоднократно сходят по боковым ущельям крупных горных долин, они очищают дно ущелий от рыхлого материала, оставляя на своем пути обнаженные «лавинные желоба», сложенные коренными породами; эти желоба бросаются в глаза в залесенных районах благодаря отсутствию в них почвенного слоя и деревьев. Когда лавины достигают дна главной долины, в результате инерции часть снега может быть вынесена даже на противоположный склон долины, прежде чем лавина повернет и пойдет вниз по долине.

Оползни-обвалы. Оползни-обвалы похожи на оползни, но масса породы и включенные в нее обломки скорее разбиваются на осколки, чем перемещаются в виде сплошного оползневого тела. Обычно они сходят внезапно, и последствия их бывают катастрофическими: за несколько минут миллионы кубометров материала могут



РИС. 11.9
Оползень-обвал Мадисон 1959 г. в шт. Монтана и новое озеро, образовавшееся в результате того, что оползень перегородил реку Мадисон. (Фотография Стейси, Геологическая служба США.)

переместиться на расстояние, измеряемое километрами.

В месте зарождения оползней-обвалов остаются «шрамы», а ниже – в беспорядке нагроможденные друг на друга глыбы. В оползневых впадинах возникают озера, *другие озера образуются во временно* перегороженных, подпруженных долинах; кроме того, на неправильно бугристой поверхности сползшей массы остаются впадины, которые могут заполняться водой (рис. 11.9). На карте и геологическом профиле оползня-обвала Мадисон в шт. Монтана (рис. 11.10, 11.11) заметно множество признаков растяжения и сжатия, которые могут иметь место при формировании таких оползней. Хотя в оползне-обвале в небольшом масштабе и происходит хрупкая деформация, скорость перемещения и возникающие особенности рельефа заставляют предположить, что в целом он ведет себя, возможно, как жидкое тело. Это *обусловлено, вероятно, присутствием воз*духа, сжатого внутри падающей и скользящей массы обломков, а также высокой кинетической энергией слагающих его частиц.

Особенно благоприятны для формирования оползней-обвалов следующие условия: 1) крутые склоны (прибрежные утесы, берега рек, дорожные выемки, каньоны, уступы сбросового происхождения, ледниковые долины), 2) мягкие, легко скользящие, плотные породы (глина, вулканический пепел и туф, серпентиниты, тальковые породы, любые сильно выветрелые породы), 3) трещиноватые или сильно разрушенные породы вверху, 4) наклон (падение) *слоев осадочных пород по склону* и 5) обильные дожди или таяние снега.

К непосредственным причинам движения материала можно отнести следующие: 1) чрезмерное увеличение крутизны склона за счет естественной эрозии или при земляных работах, 2) перегрузка в верхней *части склона*, 3) *землетрясения*, 4) увеличение порового давления воды, уменьшающее сцепление материала, 5) изменение уровня воды, 6) растворение цемента в породах, 7) подмыв весенними водами и 8) «самопроизвольное разжижение», происходящее при уплотнении насыщенного водой материала. Роль воды особенно велика, так как она увеличивает вес, уменьшает сопротивление скалыванию и устраняет удерживающее влияние поверхностного натяжения. У любого рыхлого выветрелого материала, очень ослабленного и перегруженного благодаря насыщению *водой, имеется тенденция к обрушению.* Для наглядности приведем пример: куча сухого песка устойчива при среднем угле естественного откоса, куча влажного, насыщенного воздухом песка сохраняет устойчивость при большом угле естественного откоса из-за поверхностного натяжения *воды, песок же, пропитанный водой, обру*шивается с образованием очень пологого склона.

Оползни-обвалы предупреждают и искусственно контролируют следующими способами: 1) уменьшением угла склона, 2) террасированием склонов, 3) перехватом или отведением поверхностных вод, 4) отведением грунтовых вод через тоннели, дренажные трубы и колодцы, 5) облицовкой асфальтом, бетоном или камнем для защиты от воды, 6) искусственным уплотнением материала, 7) замораживанием на месте, как при строительстве плотин, 8) на небольших оползнях – строительством дамб из камней и бетона или *предохранительных стенок для удержания* материала на месте.

В течение последних нескольких столетий произошло много разрушительных оползней-обвалов и оползней-потоков. В 1855 г. масса обломочного материала длиной 1000 м, шириной 300 м и высотой 200 м *спустилась по долине* реки Тибр в Италии. Она перегородила долину таким образом, что деревня Сен-Стефано была затоплена и оказалась под водой на глубине 15 м. Много людей погибло, и много построек было разрушено.

В Канаде, в провинции Квебек к северу от Бакингема, в реку Льевр спустился оползень площадью 0,4 км^2. На твердых *породах возникла глинистая терраса*, а через несколько дождливых дней глины пропитались водой, вес их увеличился, и они соскользнули дальше. Скорость при этом была так велика, что большая масса глинистого материала выплеснулась на противоположный склон долины на высоту до 7,5 м

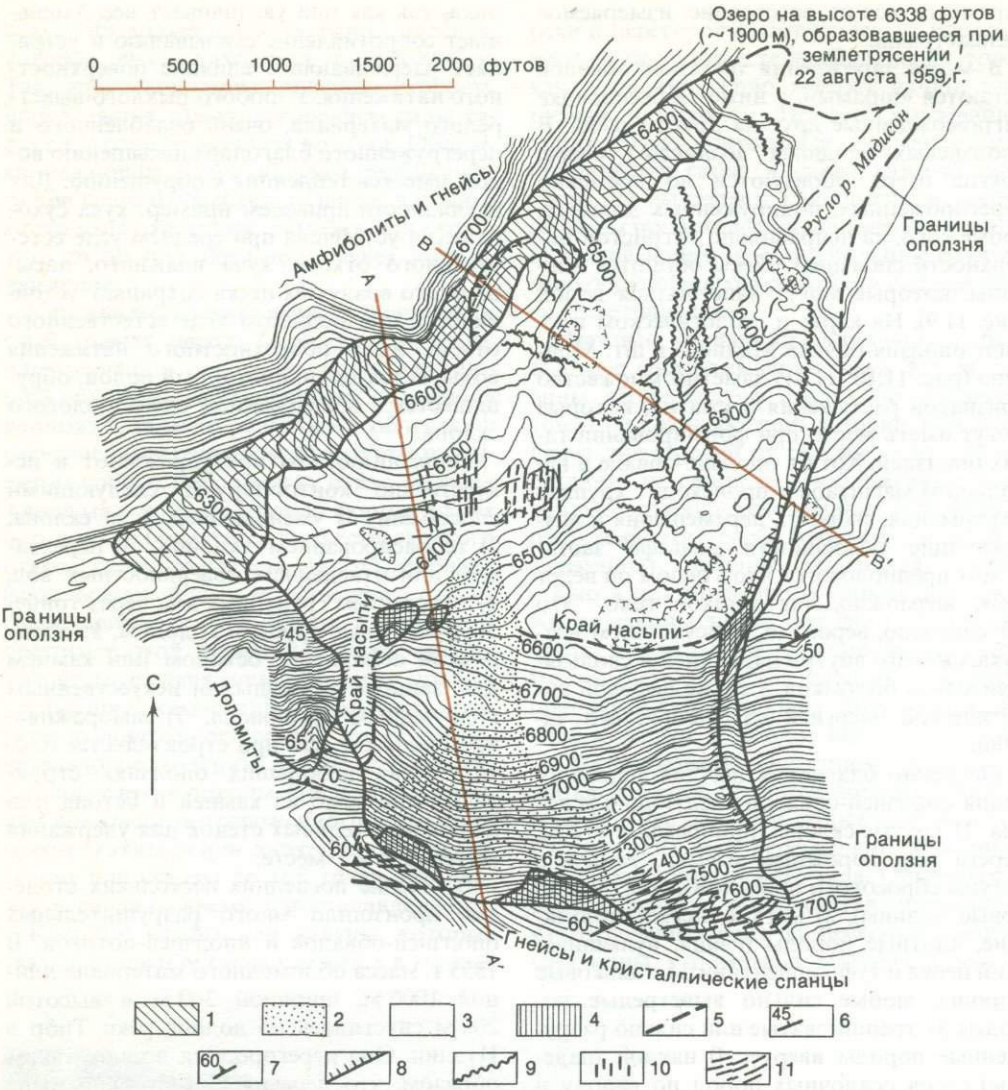


РИС. 11.10

Карта оползня-обвала Мадисон, шт. Монтана. Породы в пределах сползшей массы: *1* – обломки доломитов; *2* – обломки, обвалившиеся позже; *3* – обломки гнейсов и кристаллических сланцев; *4* – коренные породы; *5* – зона сдвига; *6* – падение и простирание слоев; *7* – падение и простирание сланцеватости; *8* – внутренний оползневой уступ; *9* – гребни сжатия; *10* – линии течения; *11* – расселины. Изолинии проведены через 20 футов (во впадине – через 10 футов). Отсчет ведется от среднего уровня моря.

Другой разрушительный оползень произошел в Канаде в 1903 г. близ города Франка в провинции Альберта. Здесь вся фронтальная часть горы Тертл-Маунтин, объем которой оценили в 30 млн. м^3, оторвалась и понеслась вниз, к подножию горы, а затем ее выбросило на противоположный склон долины до высоты 120 м. В длину этот оползень достигал примерно 4 км. Весь процесс сползания длился меньше двух минут.

В шт. Вайоминг, в долине Гро-Вентр, расположенной к югу от Йеллоустонского парка, в 1925 г. произошел гигантский

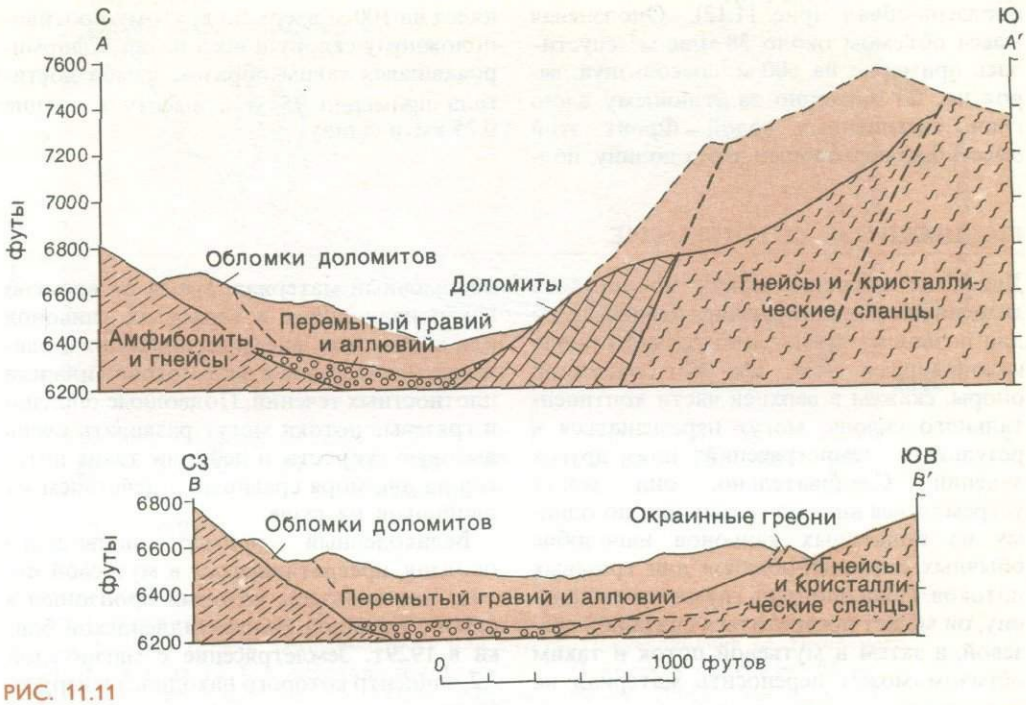


РИС. 11.11

Геологические профили через оползень-обвал Мадисон по линиям AA′ и BB′, показанным на рис. 11.10. Отсчет ведется от среднего уровня моря. (U.S. Geol. Survey Prof. Paper 435, fig. 60.)

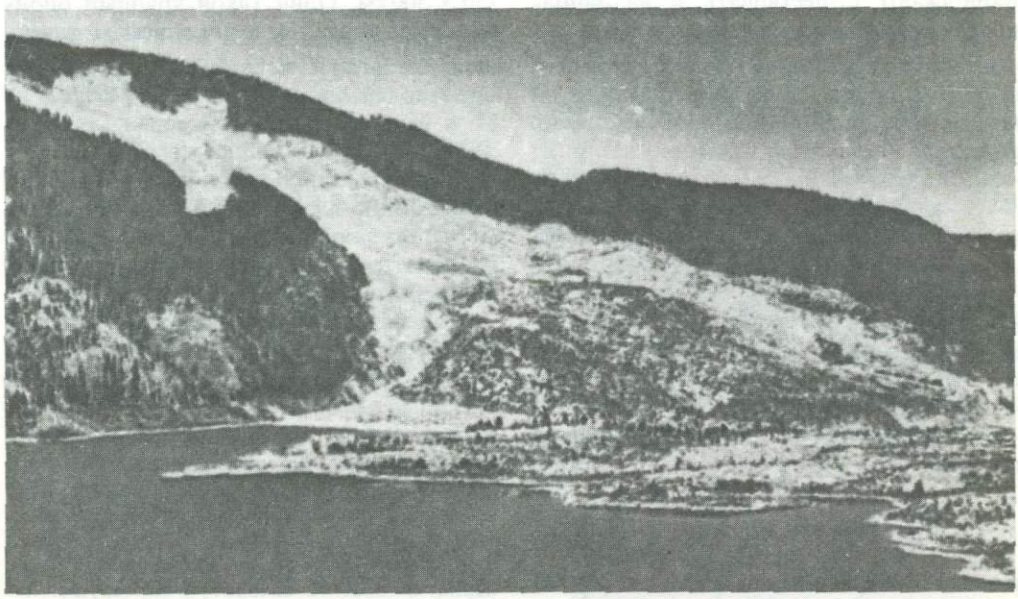


РИС. 11.12

Оползень-обвал 1925 г. в нижней части долины Гро-Вентр. Эта гигантская светлоокрашенная масса объемом около 40 млн. $м^3$ соскользнула с горного склона (на снимке слева), поверхность которого параллельна падению слоя глины, и, запрудив долину, образовала на ее дне озеро. В подошве оползень имеет ширину около 1 км.

оползень-обвал (рис. 11.12). Оползневая масса объемом около 38 млн. м^3 спустилась примерно на 600 м, соскользнув, вероятно, по наклонно залегающему слою глин, насыщенных водой. Фронт этой массы был переброшен через долину, поднялся на 100 м вверх по крутому противоположному склону и осел назад. Сформировавшаяся таким образом дамба достигала примерно 75 м в высоту и свыше 0,75 км в длину.

ПОДВОДНОЕ ОПОЛЗАНИЕ

Движение вещества может происходить даже на дне моря. Изучение океанического дна позволяет предположить, что осадки, накопившиеся там, где нет надежной опоры, скажем в верхней части континентального склона, могут перемещаться в результате землетрясений или других явлений. Следовательно, они могут устремляться вниз по склону или по одному из подводных каньонов наподобие обычных оползней-обвалов или грязевых потоков. Пока оползень спукается по каньону, он может превратиться сначала в грязевой, а затем в мутьевой поток и таким образом может переносить материал на большое расстояние от тех мест, где началось движение. Подводные каньоны, обычно развитые на континентальном склоне, продолжают существовать и не заполняются осадками, возможно, потому, что обломочный материал, время от времени накапливающийся в верховьях каньонов или вблизи них, внезапно приходит в движение и выносится в виде потоков ила или плотностных течений. Подводные оползни и грязевые потоки могут развивать очень высокую скорость, и действие таких потоков на дне моря сравнимо с действием их двойников на суше.

Великолепный пример подводного оползня, превратившегося в мутьевой поток,–это оползень, который произошел в районе Большой Ньюфаундлендской банки в 1929 г. Землетрясение с магнитудой 7,2, эпицентр которого находился у верхнего края континентального склона, послужило толчком для образования нескольких подводных оползней на площади 150 × 300 км. Один такой крупный оползень, вызванный землетрясением, мгновен-

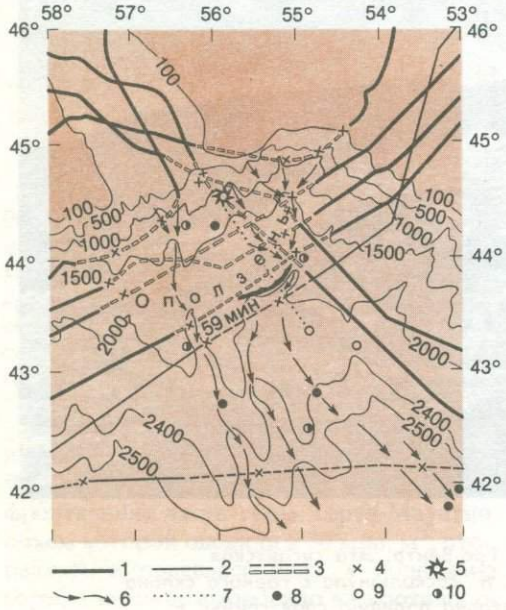


РИС. 11.13

Местоположение подводного оползня 1929 г., в результате которого образовался мутьевой поток и произошел обрыв кабелей в районе Большой Ньюфаундлендской банки. *1*–кабели, оборванные оползнем; *2*–кабели, оборванные мутьевым потоком; *3*–кабели, которые были заменены во время ремонта; *4*–обрыв кабеля; *5*–эпицентр землетрясения; *6*–мутьевой поток; *7*–профиль МОВ. Состав керна: *8*–песок и алеврит; *9*–ненарушенные полупелагические осадки; *10*–нарушенные полупелагические осадки. (По Хизену и Дрейку: *Heezen, Drake*, 1964. Copyright American Association of Petroleum Geologists.)

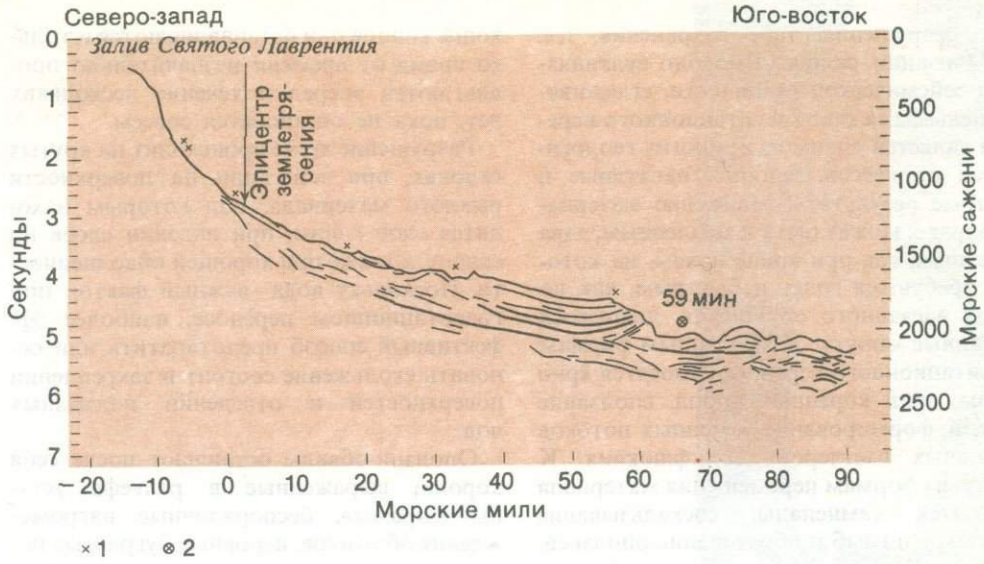


РИС. 11.14

Сейсмический профиль через оползень Большой Ньюфаундлендской банки, построенный методом отраженных волн. *1* – телеграфные кабели, оборванные во время землетрясения; 2 – телеграфный кабель, оборванный 59 мин спустя. Преувеличение вертикального масштаба в воде 22 : 1, в осадках – примерно 15 : 1. (1 морская сажень = 1,83 м, 1 морская миля = 1,852 км.) (По Хизену и Дрейку: *Heezen, Drake*, 1964. Copyright American Association of Petroleum Geologists.)

но разорвал шесть трансатлантических кабелей и привел в движение илистый мутьевой поток. Этот поток понесся вниз по континентальному склону и разорвал один за другим в правильной последовательности 12 вспомогательных кабелей в 28 *местах за следующие 13 ч 17 мин (рис.* 11.13). Мутьевой поток двигался над оползнем и вокруг него разносил обломочный материал веером на расстояние до 350 км и более у подножия континентального склона. По точно известному времени каждого следующего обрыва кабеля вычислили скорость мутьевого потока, которая в верхней части континентального склона достигла 90 км/ч и уменьшилась примерно до 20 км/ч у места последнего обрыва кабеля, в 730 км от эпицентра землетрясения. Поток, который *распространялся вдоль направления* перемещения главного оползня и движение которого убыстрялось, достиг первого целого кабеля на расстоянии 18 км от собственно оползня, имеющего длину 100 км, за 59 мин. В 1961 г. с помощью сейсмического *профилирования методом отраженных* волн установили, что мощность оползневого тела превышает 400 м (рис. 11.14). Мощность осадков, отложенных мутьевым потоком, в керне, взятом из его русла, чуть больше 1 м. Мутьевые потоки в подобной обстановке помогают объяснить происхождение широко распространенных ритмично-слоистых отложений, которые обнаруживаются у континентального подножия и поблизости от абиссальных равнин.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ

Сила тяжести, будучи одной из основных движущих сил геологических процессов, является главной причиной градации – сглаживания рельефа земной поверхности. Сила тяжести раскладывается на две составляющие, действующие в направлении

либо разрушения, либо сохранения, т. е. стабилизации, склона. Подобно вулканизму и сейсмической активности, сглаживание рельефа за счет гравитационного переноса является одним из немногих геологических процессов, дающих наглядные и быстрые результаты. Движение материала, однако, может быть и медленным, едва заметным, как при крипе почвы, на который требуются годы, и быстрым, как во время внезапного обрушения, длящегося считанные минуты. К медленным формам гравитационного переноса относятся крип почвы, крип коренных пород, сползание осыпей, формирование каменных потоков (каменных глетчеров), солифлюкция. К быстрым формам перемещения материала относятся камнепады, соскальзывание обломков и глыб и образование оползней, снежные и обломочные лавины (обвалы), течение грунта, грязевые потоки (сели), оползни-обвалы. Некоторые оползни-обвалы начинают двигаться медленно, какое-то время перемещаются толчками, затем скорость их резко возрастает, и в конце концов они останавливаются и только время от времени незначительно продвигаются вперед в течение нескольких лет, пока не остановятся совсем.

Разрушение легче происходит на крутых склонах, при залегании на поверхности рыхлого материала, под которым находится слой глины, при падении слоев по склону, а также при хорошей обводненности. Поскольку вода – важный фактор при гравитационном переносе, наиболее эффективный способ предотвратить или основить скольжение состоит в закреплении поверхностей и отведении подземных вод.

Оползни-обвалы оставляют после себя хорошо выраженные в рельефе уступы – «шрамы», беспорядочные нагромождения обломков, неровные бугристые поверхности и связанные с ними озера.

Оседание и оползание под водой вызывают образование мутьевых потоков, которыми осадки разносятся на большие расстояния в глубоководных зонах морского дна.

ВОПРОСЫ

1. Какими факторами окружающей среды контролируются процессы гравитационного переноса?
2. Какие свойства пород или рыхлого материала способствуют гравитационному переносу?
3. С помощью каких процессов материал перемещается вниз по склону?
4. Перечислите типы гравитационного переноса в зависимости от его скорости (очень медленные, медленные, быстрые, очень быстрые).
5. Некоторые процессы гравитационного переноса преобладают при определенных климатических условиях. Сравните условия, при которых склоны устойчивы и при которых происходит гравитационный перенос, в областях гумидного и аридного климата.
6. Как могут влиять на гравитационный перенос землятрясения?
7. Какие виды деятельности человека приводят к увеличению скорости гравитационного переноса?
8. Какими, по вашему мнению, должны быть склоны на планете, где сила тяжести меньше земной, – круче или положе, чем на Земле? Почему?

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Eckel E. B. (ed.), 1958, Landslides in Engineering Practice, Highway Research Board, Special Report, National Research Council, Washington, D. C. [Имеется перевод: *Эккель Э. Б.*, ред., Оползни и инженерная практика. – М.: ИЛ, 1960.]

Howe E., 1909, Landslides in the San Juan Mountains, Colorado, Including a Consideration in Their Causes and Their Classification, U. S. Soc. Surv. Prof. Paper 67.

Legget R. F., 1962, Geology and Engineering, 2d ed., McGraw-Hill Book Company, New York.

Muller S. W., 1947, Permafrost or Permanently Frozen Ground and Related Engineering Problems, J. W. Edwards, Inc., Ann Arbor, Mich.

Sharpe C. F. S., 1938, Landslides and Related Phenomena, Columbia Univ. Press, New York; reprinted 1960, Pageant Books, Paterson, N. J.

Terzaghi K., 1950, Mechanisms of Landslides, Geol. Soc. Amer. Bull., Berkey Volume, pp. 83–123.



12 ПОДЗЕМНЫЕ ВОДЫ

И *постоянные водные потоки*, и *родники*, и гейзеры, и колодцы, и карстовые пещеры в известняках обязаны своим существованием одному общему источнику – подземным водам. Ниже поверхности земли, там, где нет испарения, в порах и трещинах почвы и пород содержится большое количество воды. Эта вода медленно просачивается из областей инфильтрации, где она поступает в грунт в результате выпадения осадков, к областям разгрузки, где подземные воды выходят на поверхность. Под землей находится примерно в 37 раз больше воды, чем во всех озерах, реках и болотах мира. В этой главе рассматриваются геологические условия, контролирующие эту важную часть земных ресурсов, и влияние подземных вод на породы, в которых они заключены и через которые движутся.

ПРОИСХОЖДЕНИЕ ПОДЗЕМНЫХ ВОД

Ниже поверхности земли встречаются три генетических типа воды: *метеорная* (атмосферная), *погребенная* (реликтовая) и *магматическая* (ювенильная) вода. Несомненно, большая часть подземных вод – это метеорная вода, которая поступает из атмосферы, выпадая в виде дождя или снега. Метеорная вода составляет почти

100% воды, участвующей в гидрологическом цикле (см. гл. 9), и является источником почти всех подземных вод.

Погребенная вода – это вода, сохранившаяся в пространстве между частицами осадочных горных пород еще с тех пор, когда они откладывались на дне океана. В погребенной воде содержатся растворенные соли, но по химическому составу она обычно отличается от современной морской воды. В течение длительных геологических эпох, пока погребенная вода находилась в породах, в ней растворилось дополнительное количество солей, а также произошло отложение из нее во вмещающие породы минерального вещества.

Магматическая вода представляет собой воду, поступающую из магматических тел, расположенных на глубине, в которых первоначально может содержаться до 10% растворенной воды. Бóльшая часть этой воды отжимается в окружающие породы, когда магма кристаллизуется с образованием магматических пород. Во время этого процесса из магматических вод могут осаждаться рудные минералы и образовываться, например, медная, свинцовая, цинковая и серебряная руды. Хотя все подземные воды возникли, вероятно, в результате магматической деятельности, в настоящее время количество воды, поступающее из этого источника, совсем невелико по сравнению с количеством метеорной воды, которая поступает из атмосферы. Вода горячих источников в областях современного вулканизма, возможно, отчасти имеет магматическое происхождение.

КОНТРОЛИРУЮЩИЕ ФАКТОРЫ

Распространение и движение подземных вод контролируются в основном *пористостью* и *проницаемостью* горных пород.

Пористость. Заключенная внутри породы вода может заполнять крупные и мелкие трещины, зоны разломов, пустоты, образовавшиеся за счет растворения, межзерновое пространство, т.е. пустоты между отдельными минералами и зернами осадков, называемые порами. Пористость пород или почв – это отношение объема порового пространства к общему объему материала, включая поры. Таким образом, если в 1 л песка при полном насыщении водой содержится 0,3 л воды, то говорят, что пористость равна 30%, так как 0,3 общего объема приходится на пространство между зернами. У разных пород пористость различна: от менее 1% в нетрещиноватых гранитах до более 40% в слабо сцементированном песчанике. Выветрелые, сильно трещиноватые слоистые породы обычно обладают большей пористостью, чем массивные магматические породы.

Пористость осадочного материала зависит главным образом от формы и расположения слагающих его частиц, степени их сортировки, от цементации и уплотнения, которому подверглись отложения со времени их накопления, от выноса (выщелачивания) растворимых веществ и от характера трещиноватости. Влияние всех этих факторов показано на рис. 12.1.

Проницаемость. Проницаемость породы или почвы измеряется их способностью пропускать жидкость. Проницаемость изменяется в зависимости от размера и формы пор и от того, в какой степени и насколько поры соединяются между собой. Проницаемые породы всегда пористы, но породы с высокой пористостью не обязательно обладают высокой проницаемостью. Например, вулканическая пемза с пенистым строением – порода с очень высокой пористостью, но очень низкой проницаемостью. Кусок пемзы может плавать много дней, потому что его поры не связаны между собой и воде трудно в них проникнуть. Однако слой, состоящий из частиц пемзы песчаной размерности, обладает высокой проницаемостью из-за большого количества сообщающихся пустот между частицами.

Скорость течения воды сквозь породу зависит от трения, которое воде прихо-

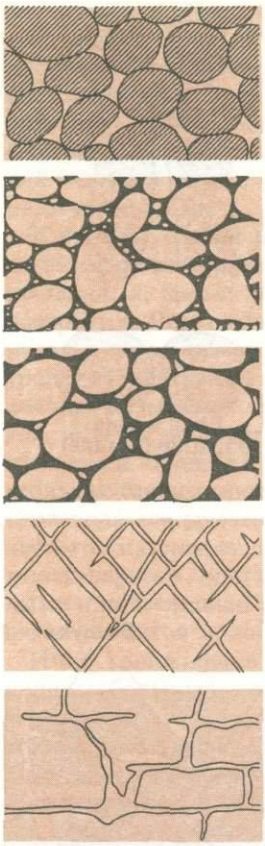


РИС. 12.1
Факторы, влияющие на пористость пород. *1* – хорошо отсортированные осадки обладают высокой пористостью; *2* – плохо отсортированные осадки имеют меньшую пористость из-за того, что пространство между более крупными частицами заполнено более тонким материалом; *3* – образование минерального цемента может вызывать уменьшение пористости; *4* – наличие трещин и поверхностей напластования может привести к возникновению пористости; *5* – при растворении породы трещины могут расширяться, увеличивая пористость.

дится преодолевать: чем больше трение, тем меньше скорость. Трение вызывается взаимодействием воды и поверхности, с которой она соприкасается; следовательно, чем больше площадь этой поверхности, тем больше трение. В крупнозернистом песке и гравии, в которых между крупными зернами нет более мелких частиц, трение невелико; они, таким *образом, хорошо проницаемы. С другой* стороны, тонкозернистый материал, подобный глинам и глинистым сланцам, несмотря на высокую пористость, имеет большую площадь поверхности зерен, а значит, обеспечивает большое трение и поэтому является относительно непроницаемым.

Кроме того, тонкозернистая структура глин и глинистых сланцев обеспечивает большую площадь поверхности, к которой, за счет действия молекулярных сил, тонкая пленка воды прилипает так плотно, что вода не может течь. Эти породы имеют низкую проницаемость, и даже в том случае, если их пористость чрезвычайно высока, они являются плохими проводниками воды. Пласты одновременно и пористых, и проницаемых пород, содержащие большое количество воды, называются *водоносными горизонтами.*

ЗОНАЛЬНОСТЬ ПОДЗЕМНЫХ ВОД

При сооружении глубокого колодца обычно встречают две зоны подземных вод (рис. 12.2). В верхней части находится *зона аэрации*, в поровом пространстве которой может содержаться и вода, и воздух. Любая вода в этой зоне является подвешенной водой. Мощность зоны аэрации изменчива, так как ее нижняя граница определяется второй зоной, *зоной насыщения*, в которой поры заполнены подземными водами.

Зона аэрации разделяется на три подзоны: подзону увлажнения почвы, промежуточную подзону и капиллярную оболочку. Границы этих подзон могут быть нечеткими. Подзона увлажнения почвы расположена сразу же под поверхностью земли. Она имеет особое значение, по-

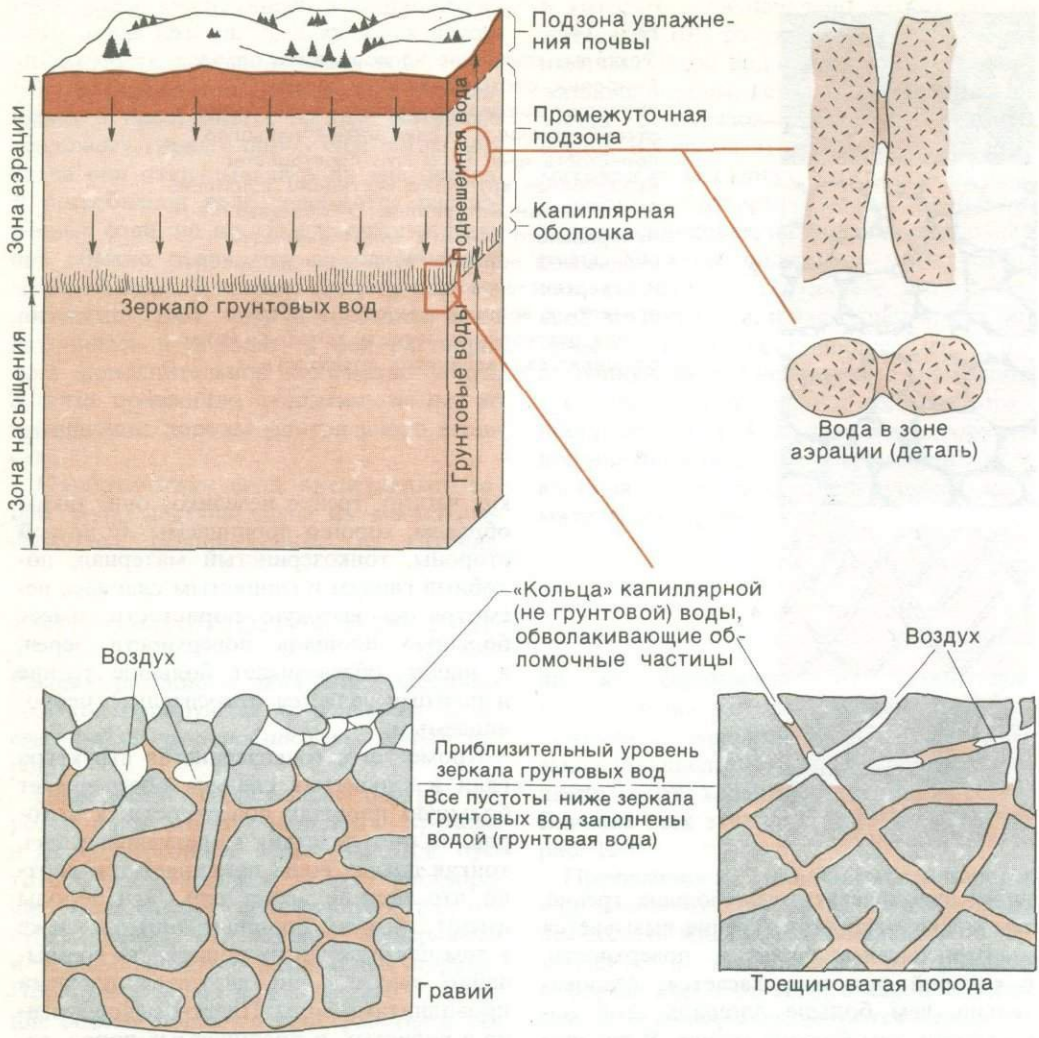


РИС. 12.2
Размещение подземных вод.

скольку именно из нее большинство растений получает воду. Часть почвенной влаги испаряется прямо из почвы или посредством транспирации растениями.

Растения сильно увеличивают площадь поверхности, с которой влага может испаряться. Кроме того, часть снега и дождя, падающая на лесной полог, испаряется с листьев и ветвей и никогда не достигает земли.

С помощью растений из верхнего горизонта почвы удаляется большое количество воды. Транспирация растениями может быть равна испарению с поверхности свободной воды или даже превышать его. В областях с хорошо развитым растительным покровом она больше, чем испарение из подзоны увлажнения почвы. Корни некоторых растений могут достигать капиллярной оболочки или зоны насыщения и фактически отсасывать воду из подземного резервуара и вызывать понижение уровня подземных вод. Из растений такого типа чаще всего встречаются ива, тополь трехгранный и растущий на засоленных почвах можжевельник.

Значительное обмеление или пересыхание некоторых рек на юго-западе США приписывается разрастанию можжевельника, высаженного в этом районе с декоративными целями более 100 лет назад. Считают, что уничтожение таких растений местами могло бы помочь сберечь подземные воды.

В промежуточной подзоне вода располагается ниже корневой системы многих растений, и, кроме того, вода из нее не испаряется. Через промежуточную подзону вода просачивается на более низкие уровни. У ее нижней границы, в подзоне, которая называется капиллярной оболочкой, имеется дополнительная влага. В капиллярной оболочке мощностью от нескольких сантиметров до нескольких метров вода всасывается в поры тонкозернистого материала под действием сил молекулярного притяжения между рыхлыми или несвязанными твердыми частицами и жидкой водой.

Ниже капиллярной оболочки вода заполняет бóльшую часть пор в почве или породе, так что в колодце, если выкопать его до этой глубины, будет стоять вода. Это – *зона насыщения*, а заключенные в ней воды называются *грунтовыми водами*. Если породы достаточно проницаемы, то из этой зоны с помощью колодцев можно получать воду.

Зеркало грунтовых вод. Верхняя граница зоны насыщения называется зеркалом, или уровнем, грунтовых вод. Зеркало грунтовых вод имеет тенденцию в сглаженном виде повторять конфигурацию поверхности земли: под возвышенностями высота его больше, чем под соседними долинами. В горных районах со средним количеством выпадающих осадков уровень грунтовых вод может располагаться на несколько сотен метров ниже поверхности земли (рис. 12.3). В областях с сухим климатом, где дождей выпадает мало, а испарение велико, зеркало грунтовых вод может находиться на очень больших глубинах. Вблизи постоянно текущих рек, озер или других водоемов зеркало грунтовых вод приближается к поверхности земли.

Уровень подвешенных грунтовых вод. Масса воды в проницаемой породе может находиться в подвешенном состоянии в зоне аэрации выше главного уровня грунтовых вод. В аридных и полуаридных областях линзы подвешенной воды могут быть важным источником воды. Обычно они располагаются над телами водонепроницаемых пород, имеющими неправильную форму, или в линзах и клиновидных толщах песка и гравия, которые улавливают и удерживают просачивающуюся вниз воду (рис. 12.3). Если в такой ситуации, копая колодец, нарушить водонепроницаемый слой, то последствия будут гибельными: линза подвешенной воды уйдет вниз.

На северо-востоке Северной Америки в некоторых частях территории, испытавшей оледенение, где большие площади покрыты мощным слоем глинистых ледниковых наносов, выше регионального уровня грунтовых вод могут располагаться также озерные котловины. В таких озерах подвешенная вода сохраняется,



РИС. 12.3

Схема, на которой показаны локальный уровень подвешенной воды и положение регионального уровня грунтовых вод по отношению к долине, возвышенности, постоянной реке, озеру и болоту.

а не просачивается вниз, к главному зеркалу грунтовых вод, благодаря водонепроницаемым слоям глины между дном озера и региональным уровнем грунтовых вод. Накопление на дне котловин органогенно-обломочного материала может уменьшать проницаемость пород до такой степени, что становится возможным формирование и сохранение озер.

Инфильтрация – просачивание воды вниз через зону аэрации к зеркалу грунтовых вод – зависит от количества и интенсивности выпадающих осадков, рельефа местности, проницаемости породы или почвы и характера растительности.

Сначала, когда капли слабого дождя начинают падать на проницаемый материал, например на песчаную почву, поверхностного стока не происходит. Он не возникает до тех пор, пока самый верхний слой почвы не будет насыщен водой. Если же дождь выпадает на водонепроницаемый материал, то вода немедленно стекает по его поверхности. Это различие связано с проницаемостью поверхностного слоя: почвы, мостовой или любого другого материала.

Чем круче наклон поверхности, тем больше воды стекает. На почти ровной поверхности скорость течения воды ничтожна, и поэтому вода может просачиваться в течение длительного времени. Растения, растительные остатки и мелкие неровности рельефа препятствуют стоку поверхностных вод и увеличивают время, в течение которого может происходить инфильтрация.

При наклонном залегании слоев под землю уходит больше воды, чем при горизонтальном их положении. Вода, проходящая через наклонные пласты, следует по наиболее поницаемым горизонтам. Если слои коренных пород или почвы лежат горизонтально, то скорость инфильтрации лимитируется слоями с наименьшей проницаемостью, через которые вода должна пройти.

ДВИЖЕНИЕ ПОДЗЕМНЫХ ВОД

Медленное течение воды по сообщающимся порам и мелким трещинам в зоне насыщения называется *фильтрацией*. Фильтрация подземных вод зависит от наклона зеркала грунтовых вод или от гидравлического (напорного) градиента (величина падения уровня грунтовых вод, деленная на расстояние, на котором это падение имеет место), от водопроницаемости слоев различных пород, а также от их наклона.

Давление жидкости в какой-либо точке, обусловленное весом вышележащей жидкости, называется *гидростатическим давлением*. Гидростатическое давление больше под поднятиями зеркала грунтовых вод, чем на той же высоте, но под пониженными его участками. Разность гидростатического давления и вызывает течение воды (рис. 12.3). Грунтовые воды движутся по пути наименьшего сопротивления из областей с высоким гидростатическим давлением под горами в области с низким гидростатическим давлением под долинами. Разница в высоте зеркала грунтовых вод между дождевыми и засушливыми годами, естественно, больше под возвышенностями, чем под долинами, и в результате получение воды из неглубоких колодцев на возвышенностях не так надежно, как в низинах.

Глубина, до которой проникают поверхностные воды, меняется в зависимости от пористости и проницаемости пород. В некоторых проницаемых породах поверхностные воды просачиваются на глубину в несколько тысяч метров, тогда как в почти непроницаемых породах лишь очень немного воды скапливается глубже нескольких сотен метров. Если наименьшее сопротивление вода встречает при движении непосредственно вниз благодаря наклону пластов или разломам, обладающим высокой проницаемостью, то вода может просачиваться вниз до значительных глубин, прежде чем она по какому-нибудь проницаемому слою или трещине сможет снова подняться на поверхность.

Проницаемость массивных магматиче-

ских и метаморфических пород зависит главным образом от количества и размера трещин. Если трещин мало или нет совсем, то на глубине более нескольких десятков метров редко обнаруживаются значительные запасы воды. В медьсодержащих породах полуострова Кивино в шт. Мичиган были пройдены шахты на глубину более 1 км от поверхности земли. В нижней части многих шахт породы оставались сухими. Однако в других районах в шахтах и тоннелях, пройденных на большую глубину, было обнаружено значительное количество воды. Следы хлорида кальция, сброшенного в озеро, расположенное на 470 м выше тоннеля Моффет в шт. Колорадо, были обнаружены в воде, просачивающейся по трещинам в этом тоннеле, не позднее чем через два часа.

Количественная оценка течения грунтовых вод. Решающий шаг в понимании движения грунтовых вод был сделан в 1856 г. Генри Дарси. Он установил, что расход грунтовых вод прямо пропорционален гидравлическому градиенту и площади поперечного сечения водоносного горизонта. Эти соотношения выражаются следующим уравнением:

$$Q\,(\text{расход воды}) = V(\text{скорость течения}) \times A\,(\text{площадь поперечного сечения водоносного горизонта}),$$

где

$$V = P\,(\text{коэффициент проницаемости}) \times I\left(\frac{\text{уклон или разница высот}}{\text{пройденное расстояние}}\right).$$

Следовательно,

$$Q = P \times I \times A.$$

Коэффициент проницаемости зависит от всех свойств водоносного горизонта, влияющих на проницаемость, и от свойств жидкости, влияющих на течение. Течение через мелкие поры является скорее ламинарным, чем турбулентным, и, следовательно, значение имеет вязкость воды, зависящая от температуры.

Коэффициент проницаемости (P), измеряемый в футах в день, колеблется от величин менее 10^{-4} в непроницаемой среде до 10–10^3 в чистом песке и 10^5 в чистом гравии. Значит, чистый песок, чистый гравий или смесь чистого песка и гравия образуют хорошие водоносные горизонты. Очень мелкий песок, алеврит, смесь песка, алеврита и глины и слоистые глины являются плохими водоносными горизонтами, а невыветрелые и уплотненные глинистые породы практически непроницаемы для воды.

По данным о проницаемости пород и наклоне зеркала грунтовых вод можно вычислить ожидаемую скорость течения; обычно она колеблется от нескольких миллиметров до нескольких метров в день. Например, при наклоне зеркала грунтовых вод 1,88 м/км (10 футов на милю) и $P = 10^5$ футов в день для чистого гравия скорость течения равна 0,7 м (2,5 фута) в день. В тонкозернистом песке, где $P = 10^{-1}$ футов в день, скорость течения воды равнялась бы 0,0007 м в день. Если бы наклон зеркала грунтовых вод был равен 18,8 м/км (100 футов на милю), то скорость течения была бы в 10 раз больше.

Такие расчеты скорости течения воды основываются на площади поперечного сечения водоносного горизонта, а не на площади поперечного сечения пор, по которым в действительности проходит вода. *Истинная скорость течения в порах*, по-видимому, в несколько раз больше, чем скорость, получаемая из уравнения Дарси. Все же она чрезвычайно мала по сравнению со скоростью течения рек на поверхности земли или потоков в крупных подземных карстовых каналах. *Движение воды по большим полостям*, например по расширенным в результате растворения трещинам, является турбулентным точно так же, как и течение воды в реках или по трубам.

Подземные воды и реки на поверхности земли. Бóльшая часть рек питается грунтовыми водами из источников и за счет общего просачивания. Такие реки, известные под названием *эфлюентных* (питаемых грунтовыми водами), приурочены к низинам, расположенным на зеркале грунтовых вод, так что эти воды

стекают в реки. В области, где зеркало грунтовых вод находится отчетливо ниже уровня рек, вода из рек уходит под землю. Такие реки называются *инфлюентными* (питающими грунтовые воды). Каждый инфлюентный поток вызывает формирование гребня в нижележащем зеркале грунтовых вод. Инфлюентные потоки часто бывают перемежающимися из-за отсутствия поверхностного стока в засушливые периоды. Река может в одной части своего течения питаться за счет грунтовых вод, а в других – терять воду. Многие реки теряют воду во время паводка, когда происходит подъем зеркала грунтовых вод на примыкающих к ним поймах и в других водоносных горизонтах, и питаются грунтовыми водами в засушливое время года. Большая часть рек, которые продолжают течь во время длительных сухих сезонов, сохраняется благодаря поступлению грунтовых вод. Другими источниками питания рек могут служить искусственные водохранилища и таяние снега и ледников.

Инфильтрация воды из реки в значительной степени зависит от водопроницаемости ее ложа. Если ложе и берега реки образованы алеврито-глинистым материалом, то потери за счет инфильтрации могут быть невелики. Большое количество алевритовых и глинистых частиц в переносимом рекой материале способствует запечатыванию русла и предотвращению обильной утечки воды. Подобным же образом глину используют для укрепления оросительных канав и каналов с целью предотвратить потерю воды за счет инфильтрации.

Родники. Родники встречаются там, где грунтовые воды выходят на поверхность земли через естественные отверстия. Скорость и характер истечения воды из родников зависят от количества воды и от проницаемости и текстуры пород (рис.

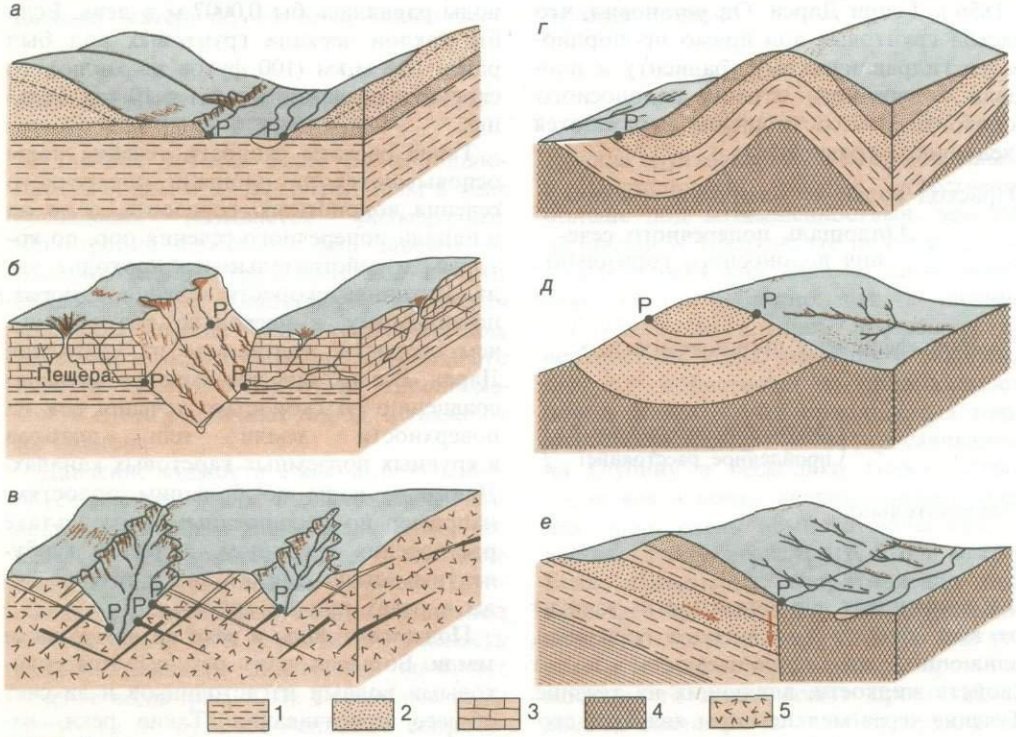


РИС. 12.4

Типы строения коренных пород, благоприятные для образования родников. Родники обозначены буквой Р. *1* – глинистые породы; *2* – песчаники; *3* – известняки; *4* – алевролиты; *5* – магматические породы.

12.4). В тех местах, где водоносный горизонт залегает на водоупоре и зеркало грунтовых вод подходит к поверхности земли, вода может просачиваться в виде сотен маленьких источников. В тех породах, в которых благодаря наличию разрывов или расширенных за счет растворения трещин или проницаемых зон течение воды сосредоточивается в небольшом числе более крупных родников, со временем могут возникнуть хорошо выраженные подземные потоки. Родники могут выходить вдоль разломов, секущих водонепроницаемые слои. Вода некоторых источников изливается на дно моря, откуда она может подниматься сквозь толщу более плотной соленой воды, прежде чем смешается с ней. В районах с дефицитом воды выявление и перехват родников на морском дне могут служить ценным источником пресной воды.

Подсчитано, что в США имеется 65 источников первой величины со средним суточным расходом воды не менее 2,8 $м^3/с$. 38 источников сосредоточено на территории шт. Айдахо, Орегон и Калифорния; они выходят вдоль обнажающихся на поверхности разрывов и неровных поверхностей лавовых потоков или через развитые здесь наносы гальки и гравия. 24 источника приурочены к расширенным в результате растворения трещинам и разрывам в известняках в районе Озарк на территории шт. Миссури и Арканзас, к зоне разлома Белконс в шт. Техас и к территории шт. Флорида. Три источника бьют из песчаников в шт. Монтана; полагают, что большой расход воды этих источников обусловлен разломами или какими-то другими особыми чертами строения.

ЗАПАСЫ ПОДЗЕМНЫХ ВОД

Подземные воды относятся к числу природных ресурсов, от которых в настоящее время зависит значительная часть населения земного шара. Ими снабжается множество городов, они широко применяются в сельском хозяйстве и промышленности. Подсчитано, что колодцы и источники дают в среднем 110–130 млн. $м^3$ (120 млрд. л) воды в сутки, т. е. примерно 1/5 общего количества воды, используемой для орошения, в промышленности и для домашних нужд.

Большая часть используемых подземных вод извлекается из неконсолидированных осадков, водопроницаемых твердых осадочных пород и лавовых потоков. Среди неконсолидированных осадков главным источником служат аллювиальные пески и галечники, ледниковые наносы, речные террасы и поймы и песчаные отложения прибрежных равнин. Галечники и гравий дают наибольшие поступления, пески – немного меньшие, а поступление воды из аргиллитов, глин, отложений грязевых потоков и морен невелико. В консолидированных породах самый большой выход воды можно ожидать из водопроницаемых песчаников, пористых известняков, сильно трещиноватых пород, таких, например, как кварциты и граниты, и из трещиноватых, пузырчатых или кавернозных базальтовых потоков.

Для увеличения проницаемости пород вблизи колодцев и скважин в них иногда производят взрывы или заливают кислоту. Предложенный метод разрушения твердых пород с помощью атомных взрывов мог бы способствовать увеличению инфильтрации, просачивания и восстановлению уровня воды в колодцах, если бы удалось решить проблему радиоактивности. Выход воды из глинистых пород обычно очень невелик, если только в этих породах не развита сильная трещиноватость. Выход воды из известняков может быть большим там, где трещины расширены за счет растворения, и значительно меньшим там, где трещины в известняках встречаются редко, а растворение было назначительным.

Проницаемость большинства магматических пород зависит от количества и размера рассекающих их трещин. Некоторые лавовые потоки и отложения, состоящие из кусочков пемзы, настолько проницаемы для воды, что по ним редко текут реки. В то же время некоторые пло-

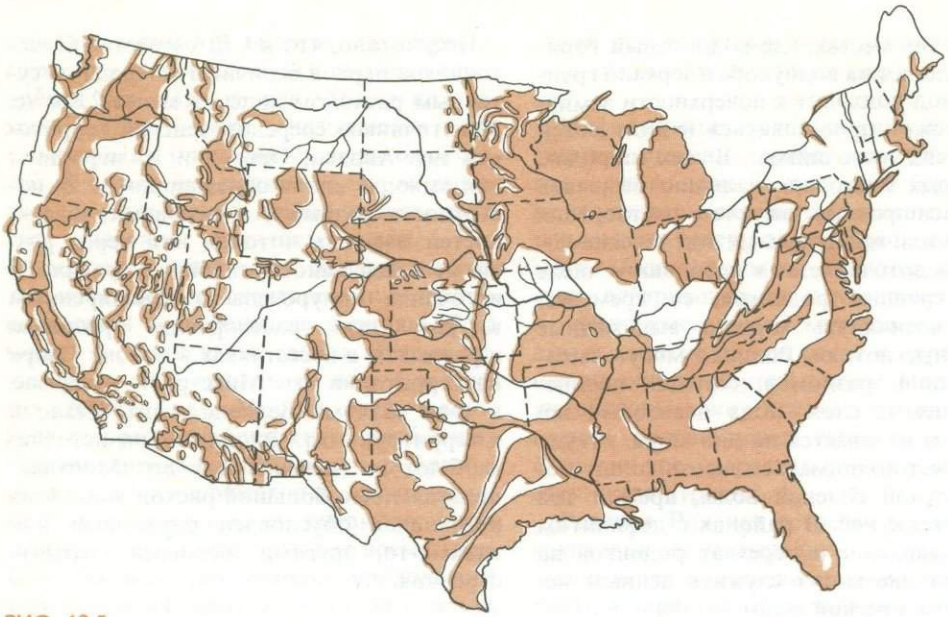


РИС. 12.5

Области развития подземных вод на территории США (по Х.И. Томасу: *H.E. Thomas*, Conservation of Ground Water, MeGraw-Hill Book Company, 1951). На схеме показаны площади, где в отдельных скважинах можно получить около 200 л или больше воды в минуту с содержанием растворенного минерального вещества не более 2000 млн$^{-1}$ (включено несколько площадей, где в действительности используется вода с более высокой минерализацией).

щади, сложенные гранитами, настолько водонепроницаемы, что в их водном режиме резко доминирует поверхностный сток. На рис. 12.5 суммированы данные по распределению на территории США водоносных горизонтов, дающих значительное количество воды.

Колодцы и скважины. Рытье колодцев и бурение на воду восходят к древнейшим историческим эпохам. Впервые бурение с целью получения воды было произведено в Китае и Индии. Ирригационные работы с использованием колодезной воды производились в Вавилоне еще за 2000 лет до н.э. В настоящее время в Индии и США из колодцев и скважин орошается больше земель, чем из рек.

Многие колодцы представляют собой просто мелкие углубления, выкопанные или пробуренные в земле ниже уровня грунтовых вод. Они служат резервуарами, в которые стекают грунтовые воды и из которых воду можно откачивать. Места для большинства новых колодцев и скважин, предназначенных для получения большого количества воды, выбирают очень осторожно, лишь после тщательного гидрологического анализа таких факторов, как количество атмосферных осадков на питающей площади, литология пород, их текстура и водопроницаемость.

Даже в случае пород с высокой проницаемостью удаление воды через колодец или скважину понижает уровень грунтовых вод в сторону колодца (скважины) (рис. 12.6). В породах с низкой проницаемостью депрессионная воронка имеет вид конуса с крутыми стенками, радиус которого может быть не более нескольких сотен метров. Однако в однородных проницаемых песках и гравии депрессионная воронка колодца, из которого откачивают много воды, может распространяться на несколько километров и накладываться на депрессионную воронку соседнего колодца или скважины. Если из

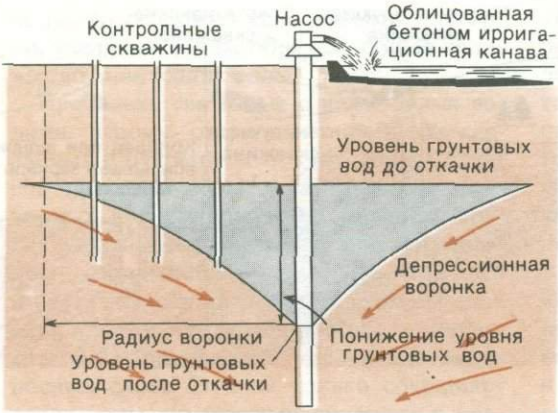


РИС. 12.6
Депрессионная воронка в зеркале грунтовых вод вокруг скважины, из которой производят откачку.

системы колодцев (скважин) нужно выкачать много воды, то располагать их следует таким образом, чтобы максимальный выход воды можно было получить из наименьшего числа колодцев.

В некоторых районах на территории США с начала 1800-х гг. практикуется искусственное подпитывание колодцев. Воду можно закачивать в грунт, увеличивая таким образом гидростатическое давление, скорость инфильтрации и уменьшая время, необходимое для восстановления в колодце прежнего уровня воды. Это служит двум целям – сохранению воды и улучшению ее качества, а кроме того, позволяет, увеличив скорость пополнения, иногда за счет добавления воды с поверхности, уменьшить минерализацию грунтовых вод и изменить их температуру.

Артезианские колодцы и скважины. Артезианские колодцы получили свое название от французской провинции Артуа, где во многих колодцах вода поднималась выше поверхности земли и била фонтаном. Сегодня название «артезианский» распространяется на любой колодец, где грунтовые воды поднимаются выше отметки, на которой они были встречены сначала; вода не обязательно должна изливаться на поверхность.

Артезианское течение возникает вследствие разности гидростатического давления в различных частях замкнутого водоносного горизонта. Водоносный горизонт в артезианской системе можно сравнить с водопроводной трубой из проницаемых пород, в которой приток воды больше, чем расход. Для самоизливающегося артезианского колодца (скважины) в слоистых осадочных породах необходимы следующие условия (рис. 12.7):

1) должен присутствовать водоносный горизонт, который может содержать и поставлять воду;
2) сверху и снизу водоносный горизонт должен быть ограничен водонепроницаемыми слоями, сдерживающими воду и предотвращающими ее утечку;
3) водоносный горизонт в области питания должен размещаться гипсометрически выше, чем в местах, где расположены колодцы.

Эти требования относятся только к осадочным слоям. Некоторые артезианские воды получены из пород других типов, даже из неконсолидированных осадков, но там, где артезианские воды вскрываются колодцами и скважинами, они должны находиться под гидростатическим давлением.

Во многих случаях области питания артезианских вод находятся в десятках и даже в сотнях километров от скважин. Большинство скважин в артезианском бассейне, образованном знаменитыми песчаниками Дакота в шт. Северная и Южная Дакота, достигают глубины 300 м и более и расположены на расстоянии 250 км от области питания. Этот водоносный горизонт дает основную массу



РИС. 12.7

Схема с изображением условий, благоприятных для артезианских колодцев и скважин. Вода в артезианских колодцах и скважинах поднимается выше вскрытой бурением кровли водоносного горизонта песчаников. Скважина 2 тоже артезианская, хотя вода из нее не выливается на поверхность, как в скважине 1. В водоносном горизонте песчаников вода находится под гидростатическим давлением во всех точках, расположенных гипсометрически ниже области питания. В колодец или скважину, вскрывшую зеркало грунтовых вод, вода просачивается по трещинам.

используемой в обоих штатах воды.

Хотя в ледниковых наносах артезианские колодцы не достигают и 30 м глубины, в твердых породах артезианские воды встречаются на глубинах более 1 км.

Охрана подземных вод. В прошлом большинство жителей США никогда не задумывались о запасах воды. Это отношение было обусловлено достаточно высоким среднегодовым количеством осадков в густонаселенных районах и существованием крупных рек и озер внутри страны. Обычно люди мало думают о воде, как о полезном ископаемом, в котором они нуждаются, считая ее запасы неисчерпаемыми. Однако за последние несколько десятилетий в связи с увеличением численности населения и ростом потребления воды промышленностью мы стали лучше понимать, что трудности, связанные как с количеством, так и с качеством наших водных ресурсов, увеличиваются и что мы должны избавиться от расточительных и вредных привычек и придумать надежные способы сохранения запасов воды.

Для сохранения запасов подземных вод можно предпринять следующие шаги: 1) ограничить скорость откачивания воды так, чтобы она не превышала скорости естественного притока; 2) избегать потерь, особенно за счет вытекания или просачивания из колодцев и скважин; 3) предотвращать продвижение морской воды на сушу по водоносным горизонтам, которые выходят на поверхность на дне акваторий; 4) контролировать использование водоносных горизонтов для захоронения отходов; 5) уменьшить потери за счет испарения, используя для каждого полива сельскохозяйственных культур лишь необходимое и вовремя расходуемое количество воды и изменив технологию охлаждения промышленных вод; 6) способствовать пополнению запасов воды путем искусственного подпитывания колодцев и предотвращения избыточного стока поверхностных вод; 7) возвращать обратно в грунт воду, использованную для охлаждения в промышленности и кондиционирования воздуха, и восстановленную использованную воду. Одна из главных причин потерь пресной воды – это смешивание ее со сточными и другими отработанными водами, в результате чего она становится непригодной для повторного использования. Если применять не разбавление, а другие существующие методы очистки отработанной

воды, то ее можно использовать повторно, увеличив, таким образом, общее количество пригодной воды.

Проблемы, связанные с подземными водами. Кроме очевидных проблем, связанных с открытием и сохранением запасов питьевой воды, использование подземных вод сопровождается рядом других сложностей. Например, при интенсивном откачивании воды из колодцев и скважин уменьшается поддерживающая сила пластового давления воды, в результате чего происходит уплотнение водоносных слоев. Это не только сокращает дебит воды, но местами приводит к проседанию поверхности земли. В долине Сан-Хоакин в шт. Калифорния такое проседание грунта рвет полотно дорог, оросительные каналы и трубопроводы, которые требуют дорогостоящего ремонта. Кое-где на морском побережье, например у острова Лонг-Айленд, на полуострове Флорида, у берегов Мексиканского залива и в других местах, подток морской воды в грунтовые воды препятствует изливанию их на дно моря, но позволяет морской воде проникать в водоносные горизонты на суше, уменьшая таким образом запасы пресной воды. Часто наблюдается понижение регионального уровня грунтовых вод на несколько десятков метров и уменьшение артезианского напора. Некоторые водоносные горизонты находятся на грани истощения.

В ряде районов важной проблемой является загрязнение. Точно так же как безвредная или почти безвредная соль, которой посыпают дороги в снежные и морозные зимы, проникает в грунтовые воды, туда же попадают вредные примеси и ядовитые вещества. Загрязнение может произойти от туалетов, от зараженных поливных полей, от загонов для крупного рогатого скота и свинарников, от полей с минеральными удобрениями, от свалок мусора и «санитарных» отходов, от распыляемых ядохимикатов и отходов химических предприятий и т. д. Эту проблему приходится решать во многих районах.

ЭРОЗИОННАЯ ДЕЯТЕЛЬНОСТЬ ВОДЗЕМНЫХ ВОД

Там, где в породах развиты многочисленные трещины, вода быстро проникает вниз. Если породы легко растворяются, как, например, известняки, доломиты, гипсы и каменная соль, то просачивающаяся вода постепенно расширяет трещины. На пересечении трещин с пластами легкорастворимых пород могут образоваться горизонтальные камеры значительных размеров (рис. 12.8). На рис. 12.9 показаны те площади США, где растворение играет важную роль в формировании ландшафта. Химические аспекты растворения известняка природными водами, содержащими углекислоту, описаны в гл. 10.

Одним из наиболее достойных упоминания результатов растворения являются карстовые воронки и впадины. *Карстовая воронка* представляет собой впадину на поверхности земли, образовавшуюся либо в результате растворения пород без какого-либо физического их разрушения, либо за счет проседания пород над небольшими пустотами или участками пещер. Последний механизм – проседание – наиболее важен; к тому же он может привести к материальным потерям (рис. 12.10). В округе Орандж, шт. Индиана, на площади 2,5 км^2 насчитывается более 1000 карстовых воронок. Иногда они настолько закупорены органическим детритом, обломками пород и почвенным материалом, что в них образуются озера. Примером может служить озеро Алачуа-Лейк во Флориде. До 1871 г. сток поверхностных вод, дренировавших прерию Алачуа, происходил через крупную карстовую воронку. В 1871 г. отверстие на дне воронки засорилось и образовалось озеро длиной 13 км и шириной 6 км. Примерно через 20 лет отверстие снова открылось, и вода из озера ушла под землю.

Формирование одной из самых больших карстовых воронок в шт. Алабама, а может быть, и на всей территории США произошло в декабре 1972 г. Жите-

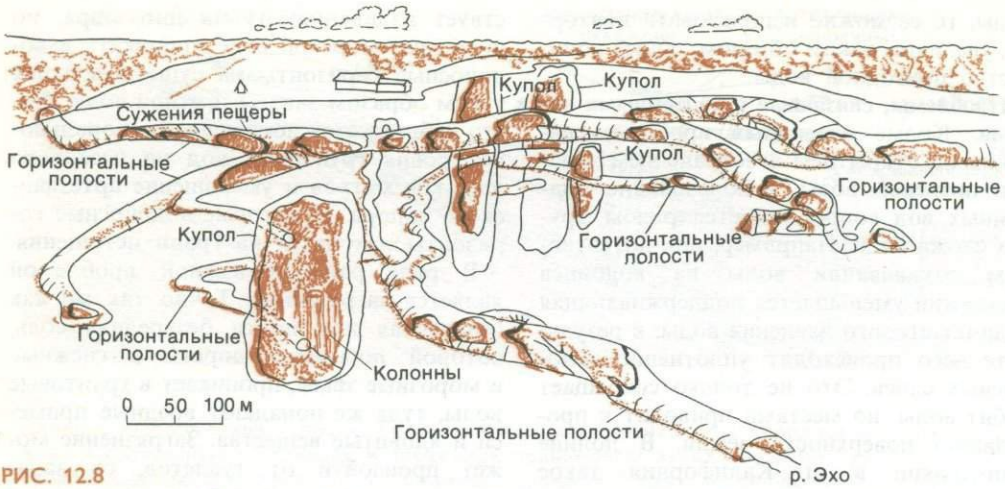


РИС. 12.8

Диаграмма части Мамонтовой пещеры, шт. Кентукки, на которой видны разные горизонты пещеры, приуроченные к горизонтально залегающим слоям известняков, и куполообразные полости, развившиеся по вертикальным трещинам. (По А. К. Лобеку, 1939.)

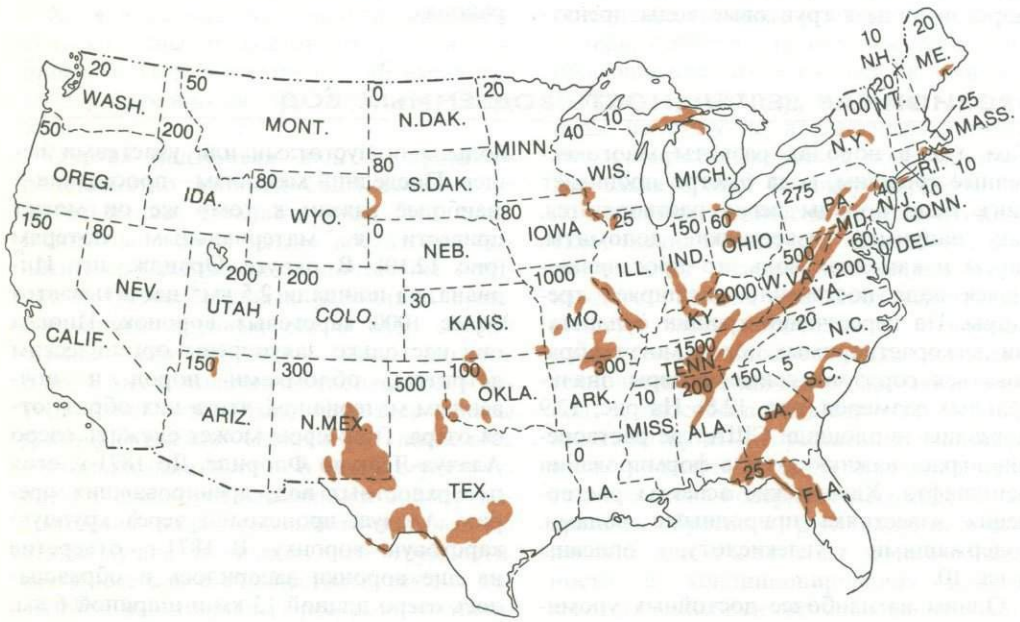


РИС. 12.9

Области на территории США, где большую роль в формировании ландшафта играет растворение. Цифры обозначают общее количество пещер в каждом штате; особенно много пещер в шт. Кентукки, Виргиния и Миссури. (По картам У. И. Дейвиса, Геологическая служба США, и из книги: *C. E. Mohr, H. N. Sloane* (eds.), Celebrated American Caves, Rutgers University Press, 1955.)

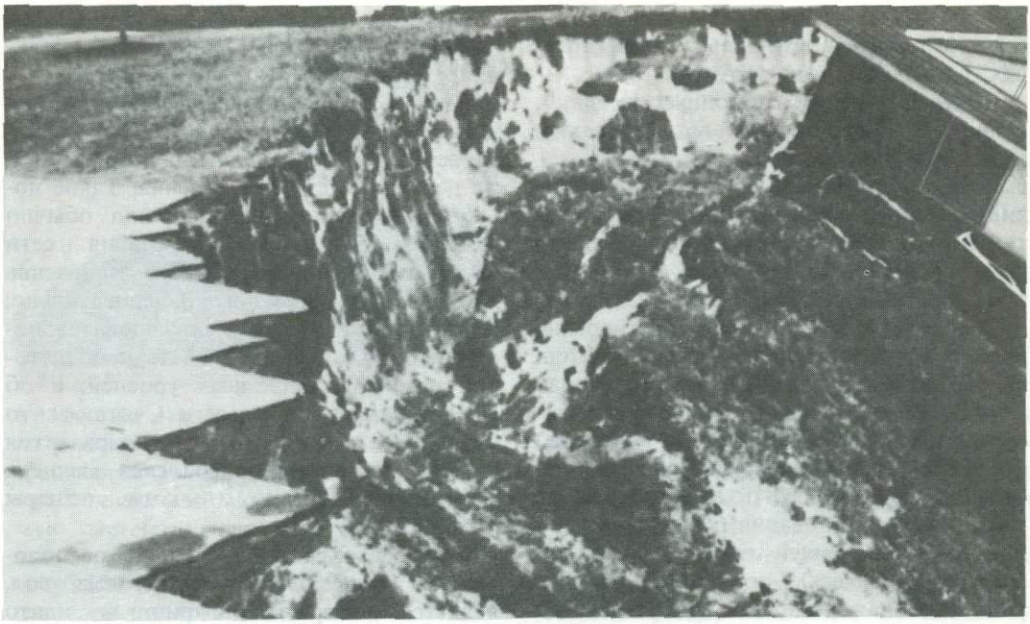


РИС. 12.10

Дом, провалившийся при проседании, вызванном растворением известняков под землей, Бартоу, шт. Флорида, 22 мая 1967 г. Возникшая карстовая воронка имела длину 160 м, ширину 40 м и глубину 20 м. (Фотография Геологической службы США.)

ли округа Шелби, шт. Алабама, 2 декабря были испуганы грохотом, от которого задрожали дома и вслед за которым стали ломаться и падать деревья. В результате обследования местности была обнаружена карстовая воронка длиной 140 м, шириной 115 м и глубиной 50 м. Она находится в пределах площади в 16 км^2, на которой развито свыше 1000 карстовых воронок и участков проседания. Коренные породы в этом районе представлены известняками и доломитами, выше которых располагается зона сильно выветрелых пород, где и происходит обрушение. Непосредственной причиной образования этой карстовой воронки было, возможно, то, что в ноябре здесь выпало очень много дождей, гораздо



РИС. 12.11

Идеализированная блок-диаграмма части карстового района на юге шт. Индиана. (По У. Дж. Уэйну: *W. J. Wayne*. The Compass, vol. 27, p. 218, 1950.)

больше, чем обычно; кроме того, могла сказаться откачка грунтовых вод в карьерах, расположенных восточнее.

Пещеры. В зонах тектонических нарушений и у поверхностей напластования, где известняки растворяются легче всего, выносится почти вся порода и остается лишь немного песка и глины. В результате этого в твердых породах с течением времени формируются узкие и широкие тоннели и полые камеры (рис. 12.8, 12.13).

Наиболее интенсивное растворение происходит у зеркала грунтовых вод или непосредственно ниже его. На сводах многих пещер наблюдаются такие характерные особенности, как карманы и сложные сетчатые рисунки, которые заставляют предположить, что проходы во время их формирования были заполнены водой, размывавшей породу. Вероятно, сеть цилиндрических тоннелей, по размерам подобная той, что изображена на рис. 12.8, образуется в результате течения воды под напором ниже зеркала грунтовых вод. План тоннелей во многом напоминает водоразборную систему большого города.

Наиболее крупные пещеры бывают почти горизонтальными даже при наклонном залегании пластов растворимых пород; это заставляет думать, что их положение контролируется зеркалом грунтовых вод. Породы легче всего растворяются около верхней границы зоны насыщения, потому что, как показано на рис. 12.12, смешивание просачивающихся сверху вод с теми, которые находятся внизу, всегда создает условия для дополнительного растворения карбоната кальция.

После образования главной пещеры уровень грунтовых вод может понизиться, пещера станет сухой и, возможно, даже доступной для наблюдения. Такое понижение уровня грунтовых вод обычно является результатом врезания сети местных рек, происходящего в течение длительного времени. Следовательно, образующиеся в такой последовательности пещеры могут рассказать и об истории развития подземных уровней, и об изменениях на поверхности. Считают, что примерами именно такого типа развития могут служить Карлсбадская пещера в шт. Нью-Мексико и многие пещеры шт. Миссури.

Примером системы пещер, расположенных ниже зеркала грунтовых вод, является пещера Биг-Спринг на плато Озарк, шт. Миссури, находящаяся сейчас в стадии формирования. Расход воды источника Биг-Спринг, стекающей в реку Каррент, составляет около 950 000 м^3 (примерно 1 млрд. л) в сутки; в этом количестве воды содержится приблизительно 190 т растворенного вещества. Вода начала поступать под напором из заполненной доверху системы пещер, когда река Каррент, углубляя свою долину, пропилила кровлю этих пещер. Положение прежних подземных водотоков можно наблюдать в скалах над источником Биг-Спринг. Запасы воды в источнике пополняются за счет атмосферных осадков и



РИС. 12.12

Смешивание грунтовых вод и вод зоны аэрации всегда приводит к тому, что вода становится недосыщенной кальцитом. Следовательно, зона смешивания, которая находится непосредственно ниже зеркала грунтовых вод, является зоной наибольшего растворения. (По Г. У. Муру: G. W. Moore, Limestone Caves, in: R. W. Fairbridge (ed.), The Encyclopedia of Geomorphology, Halsted Press, 1968.)

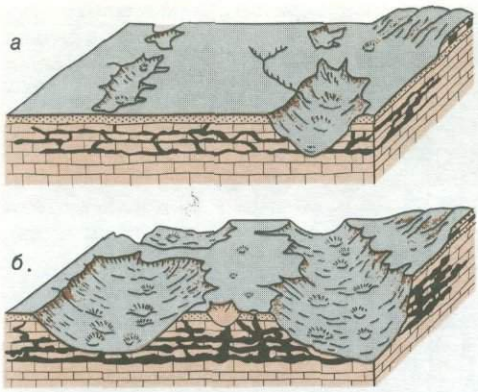


РИС. 12.13
Стадии развития входов в пещеры в центральной части шт. Кентукки. (По П. У. Бруккеру: R. W. Brucker, National Speleological Society Bulletin, vol. 28, pp. 171–178, 1966.)

в меньшей степени за счет просачивания из рек. Источником растворенного вещества являются известняки, через которые течет подземный поток. Через описываемую систему пещер вода будет течь до тех пор, пока долина реки Каррент не углубится ниже современного уровня главного подземного канала.

Одной из самых крупных пещер, известных на Земле, является система пещер Карлсбадского национального парка пещер в шт. Нью-Мексико. Она расположена в известняках и гипсах гор Гвадалупе. Из-за гигантского размера пещер и великолепного зрелища, которое являют собой выделившиеся из подземных вод породы и минералы, здесь в 1930 г. был организован государственный заповедник. Одна из галерей, Большой зал, достигает примерно 1200 м в длину, 190 м в ширину и около 90 м в высоту.

Из других американских пещер хорошо известна Мамонтова пещера в шт. Кентукки (рис. 12.8). Некоторые ее участки изучены подробно, другие еще никогда не исследовались. Этот обширный лабиринт состоит из нескольких сотен километров соединяющихся друг с другом галерей с подземными озерами, реками и водопадами. Высота галерей колеблется от менее чем 1 м до 30 м и больше. В некоторых местах галереи расположены одна над другой. Расширение пещеры – Мамонт-Дом («Мамонтовый купол») имеет длину около 130 м, ширину 50 м и высоту от 25 до 80 м.

В некоторых районах мало что указывает на существование сети подземных коридоров. Такого рода сеть подземных проходов обнаружена около города Ханнибал в шт. Миссури (возможно, именно там заблудился Том Сойер). Длина их достигает почти 6 км, а площадь, которую они занимают, составляет не более 50 акров. Здесь есть только два свободных входа, остальные 24 входа на склонах холма завалены щебнем. На рис. 12.13 показан возможный механизм возникновения и естественного завала входов в пещеры.

В результате неполного обрушения кровли пещер могут возникать естественные мосты. Хорошим примером является мост в шт. Виргиния. Естественный тоннель в округе Скотт, шт. Виргиния, представляет собой остаток пещеры длиной 300 м, по которому в настоящее время течет река Сток-Крик и проходит Южная железная дорога.

Карст. Причудливые формы земной поверхности в местах развития карстовых воронок называются карстовым рельефом. Этот необычный тип рельефа получил свое название по плато Карст, расположенному к северо-востоку от северного побережья Адриатического моря, где хорошо развит рельеф этого типа. Сходный рельеф встречается в областях развития известняков в шт. Флорида (рис. 12.14), в центральной части шт. Теннесси, в шт. Кентукки и в некоторых местах на юге шт. Индиана (рис. 12.11).

При развитии карста склоны многочисленных воронок становятся крутыми и скалистыми. На поверхности может, кроме того, образоваться сеть многочисленных коротких овражков и ложбин, ко-



РИС. 12.14

Карстовые воронки во Флориде. (Топографическая карта Геологической службы США.)

торые резко обрываются там, где поверхностные воды уходят в подземные каналы; поэтому поверхность здесь очень неровная. Постепенное растворение известняков в карстовых областях проявляется в виде карстовых воронок и впадин, из которых при их увеличении образуются *карстовые долины* (рис. 12.11). Длительное разрушение территории, сложенной известняками, может привести к тому, что на ней останутся изолированные холмы или группы холмов, называемые *скирдовидными холмами*. Местность с холмами такого происхождения в Пуэрто-Рико, где они на 100 м возвышаются над окружающей равниной, носит специальное название «Кокпит кантри» (Cockpit Country – место петушиных боев).

ОТЛОЖЕНИЕ ОСАДКОВ ПОДЗЕМНЫМИ ВОДАМИ

Бóльшая часть родниковых вод содержит в растворенном состоянии какое-то количество ионов. Это главным образом ионы бикарбонатов и сульфатов кальция, магния и натрия и в небольшом количестве хлоридов, силикатов и фосфатов этих и других элементов. Их первоначальному растворению способствуют угольная, гуминовая и другие кислоты, содержащиеся в подземных водах. Затем растворенные ионы переносятся подземными водами и поступают в реки или участвуют в отложении осадков. Осаждение происходит в основном в местах выходов источников и в пещерах.

Отложения источников. Воды некоторых источников переносят в растворенном состоянии огромное количество ионов. Вода источников Силвер-Спрингс в центральных областях Флориды выно-

сит около 660 т растворенных твердых веществ ежесуточно. Когда эти водные растворы выходят на поверхность, они могут испытать 1) испарение, 2) изменение температуры, 3) потерю углекислого газа в результате перемешивания или благодаря уменьшению давления и 4) воздействие бактерий или водорослей. Все эти изменения способствуют осаждению некоторых из растворенных веществ.

Основной материал, который откладывается и горячими, и холодными источниками,–это карбонат кальция. Кальцит, отложенный источниками вокруг их устьев, называется *травертином*. Поскольку вода из источников изливается в течение длительного времени, большинство травертинов откладывается в форме террас (рис. 12.15). Река Фолс-Крик в шт. Оклахома получает воду с таким высоким содержанием карбоната кальция, что поперек речной долины образовались естественные дамбы из травертина. Полосчатую кристаллическую разновидность травертина из района Калифорнийского залива в Мексике называют «мексиканским ониксом». Когда обломки пород цементируются травертином, образуется брекчия необычного облика. И мексиканский оникс, и эта брекчия высоко ценятся как декоративные камни.

В источниках Лёйк в Швейцарии ежегодно осаждаются тысячи тонн гипса. В других источниках откладываются такие вещества, как гидроокись железа, окись магния, хлорид натрия, карбонат натрия, сера и сульфиды металлов.

Отложения пещер. Хотя некоторые отложения в пещерах, возможно, формировались тогда, когда пещера была заполнена водой, большинство их явно образовалось выше уровня воды уже после того, как произошло осушение пещеры. Для отложений пещер, обычно состоящих из кальцита, используется общее название *натеки*. Натеки принимают форму *сталактитов*, растущих от кровли или выступов стенок пещеры, и *сталагмитов*, которые образуются на известняковом полу пещеры и растут вверх в виде куполов и конусов (рис. 12.16).

Сталактиты возникают на влажной кровле пещеры, где капли воды соби-



РИС. 12.15

Отложения травертина, которые называют Опаловыми террасами (на переднем плане), возле горячих источников Маммот, Йеллоустонский национальный парк, шт. Вайоминг. Горячая минерализованная вода источников, содержащая в растворенном состоянии бикарбонат кальция, достигает поверхности земли и медленно переливается через края этих неглубоких ванн. Светлоокрашенный натек посередине снимка – более ранние осадки того же происхождения. (Фотография Барлингтонской северной железной дороги.)

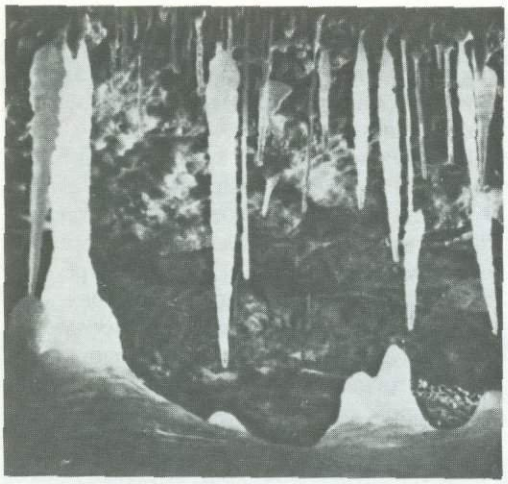


РИС. 12.16
Натечные образования под трещиной в кровле пещеры Мейфилд в шт. Техас. Здесь имеются следующие формы: 1) тонкие полые свисающие трубки, напоминающие соломинки для коктейля; 2) более массивные, похожие на сосульки сталактиты; 3) сталагмитовые натеки на полу; 4) сплошные столбы или колонны там, где сталактиты и сталагмиты соединяются. На этих образованиях, высота которых не превышает 1 м, можно в миниатюре наблюдать различные стадии развития, характерные и для аналогичных более крупных образований, имеющих в десятки раз большие размеры. (Фотография Джеймса Ф. Куинлена мл.)

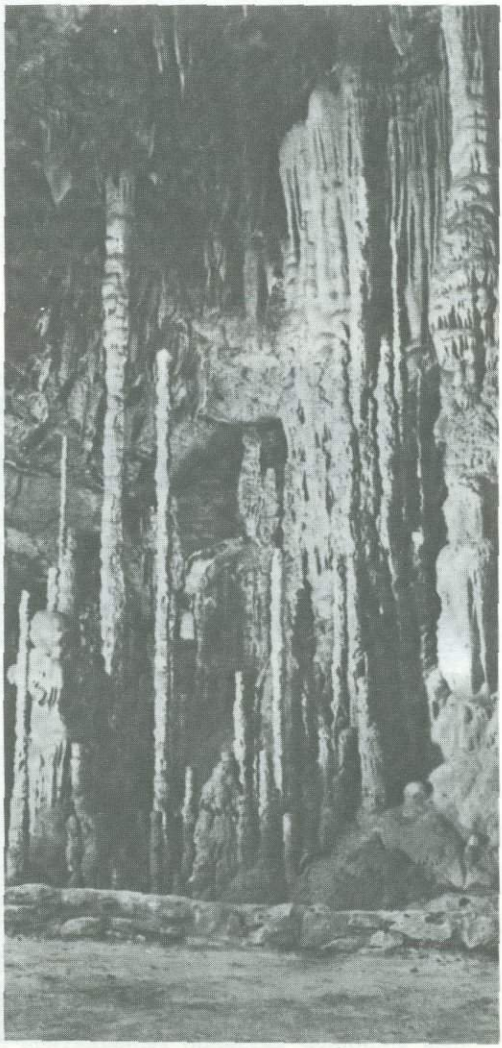


РИС. 12.17
Сталактиты и сталагмиты; некоторые из них соединяются и образуют колонны. Пещера Нэчрел-Бридж («Природных мостов») возле Сан-Антонио, шт. Техас (Фотография компании «Нэчрел бридж кэвернс».)



РИС. 12.18
Окаменелые кости ноги ископаемого слона позднеплейстоценового возраста, Фоссил-Лейк, Озерный округ, шт. Орегон.

раются и начинают испаряться, теряя углекислый газ. Возможность растворения в них карбоната кальция при этом уменьшается, и избыток его осаждается в виде колец по краям капель. Капля за каплей наращивают кольцо, образуя длинную, полую внутри подвеску, похожую на черенок трубки. Если похожий на сосульку сталактит расколоть поперек, то будет видно радиальное строение с кристаллами в виде воронок вокруг отверстия, проходящего через концентрические зоны роста. Растущий сталактит, все время влажный благодаря стекающей по нему насыщенной кальцием воде, удлиняется на нижнем конце и утолщается снаружи.

Сталактиты, достигшие пола пещеры, приобретают вид твердых трубок, которые, утолщаясь, могут превратиться в массивные *столбы* или *колонны*. Многие колонны образуются в результате соединения сталактитов со сталагмитами, которые растут с пола пещеры вверх, сливаясь со своими двойниками – сталактитами, свисающими с потолка (рис. 12.17).

Сталактиты могут приобретать разную форму в зависимости от того, как с них стекает вода, и от количества этой воды. В некоторых пещерах можно увидеть изумительные по красоте сталактиты, обрамленные кристаллами кальцита и ниспадающие с потолка в виде занавеса; эти причудливые сооружения, поднимающиеся от пола вверх к потолку, напоминают великолепные колонны.



РИС. 12.19
Окаменелые стволы деревьев, вначале погребенные, а затем обнажившиеся, Йеллоустонский национальный парк.

Кроме осаждения материала в источниках и пещерах с деятельностью подземных вод связано образование *жил* (заполнение трещин кристаллическим веществом), *цемента* в осадках, *конкреций*, *жеод*, *замещение* кристаллов и пород другими веществами, *окаменение* костей, раковин и деревьев (рис. 12.18, 12.19).

ТЕРМАЛЬНЫЕ ПОДЗЕМНЫЕ ВОДЫ

Горячие источники. У горячих источников, согласно определению, средняя температура воды должна быть заметно выше среднегодовой температуры воздуха для данной местности. Горячие источники представляют особый интерес, так как в них ярко проявляется движение подземных вод. Большинство горячих источников приурочено к областям сравнительно молодой вулканической активности. Это заставляет предполагать существование генетической связи между некоторыми горячими источниками и горячими магматическими породами, остывающими на глубине. Вероятно, циркуляция подземных вод возможна там, где проходят крупные, достигающие большой глубины разломы, вдоль которых

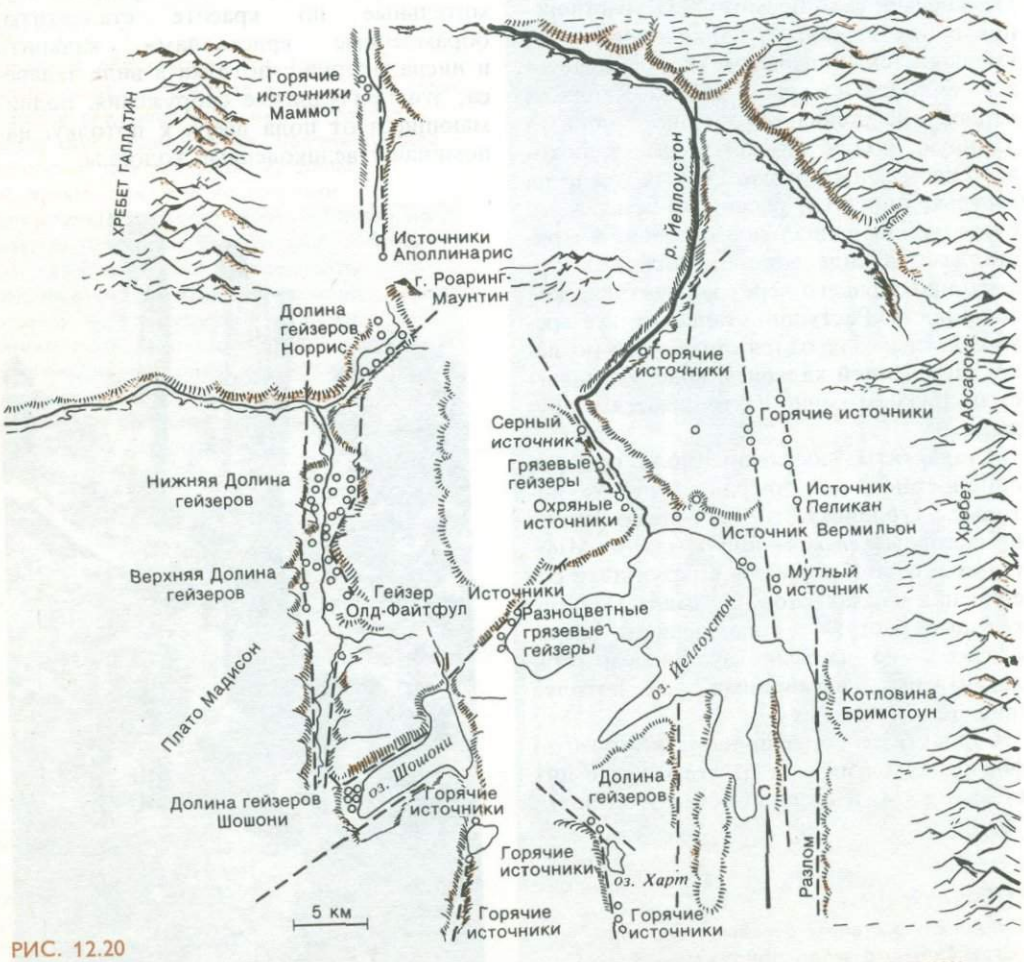


РИС. 12.20

Йеллоустонская впадина, в которой гейзеры и горячие источники приурочены к зонам разломов. (По Лобеку: *Lobeck, Atlas of American Geology.*)

группируется большое количество горячих источников (рис. 12.20, 12.21).

Однако некоторые горячие источники и значительное количество теплых источников обнаружены в областях, удаленных от центров магматизма, например источники Хот-Спрингс в шт. Арканзас. Вода в этих источниках – дождевая (метеорная), она нагревается на больших глубинах, попадая туда в процессе циркуляции. На глубине 1 км температура подземной воды примерно на 40°С выше средней температуры на поверхности. Если бы такая вода поднималась к поверхности, не подвергаясь по пути сильному разбавлению и охлаждению, она была бы заметно теплее поверхностных вод.

В США термальными считают только те источники, температура воды которых по крайней мере на 9°С выше среднегодовой температуры воздуха. На территории США имеется более 1250 областей, где обнаружены термальные источники. Хорошо известны курорты Хот-Спрингс в шт. Виргиния и Хот-Спрингс в шт. Арканзас. В Термополисе, шт. Вайоминг,



РИС. 12.21

Нижняя Долина гейзеров в Йеллоустонском национальном парке. (Фотография компании «Спенс эйр фотос».)

находится самый крупный в Соединенных Штатах Америки горячий источник. Он дает в секунду в среднем 350 $м^3$ воды при температуре 57°С.

Кроме того, во многих горячих источниках присутствуют газы, возможно магматического происхождения, а некоторые жерла, выделяющие в сухие сезоны газы, во влажные сезоны становятся горячими источниками. Источники, в которых происходит обильное выделение газов, вызывающее бурление воды, называют кипящими. *Источники, вода которых содержит* большое количество тонкого обломочного материала, особенно окислов железа, окрашивающих насыщенную ими воду в желтый, голубой или красный цвет, называются *разноцветными грязевыми гейзерами.* В теплой воде некоторых источников разрастаются водоросли – примитивные формы растительной жизни, которые также окрашивают воду. Светлоокрашенные водоросли (например, розовые или светло-серые) живут в довольно горячей воде, а темные разновидности водорослей – в тепловатой.

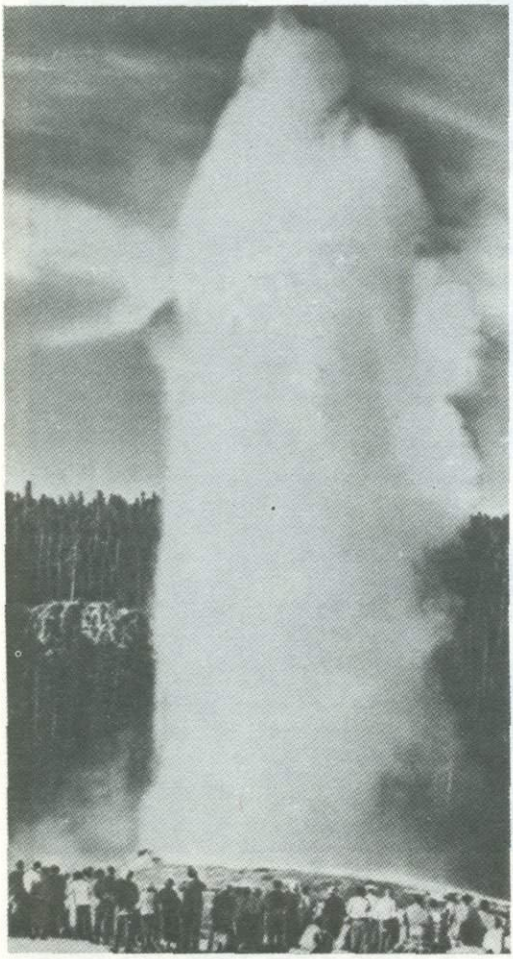


РИС. 12.22
Гейзер Олд-Файтфул во время извержения, Йеллоустонский национальный парк. (Фотография Барлингтонской северной железной дороги.)

Гейзеры. Гейзеры представляют собой горячие источники, из которых время от времени вода выбрасывается сильной струей. Название «гейзер» произошло от исландского слова geysir, что значит «*извергающийся горячий источник*». *Гейзеры* встречаются реже, чем обычные горячие *источники*, но их много в Йеллоустонском национальном парке США, в Исландии, Новой Зеландии, Чили. Все они приурочены к областям современной вулканической деятельности.

Горячая вода гейзеров представляет собой в основном поверхностную воду, просочившуюся в землю и нагретую за счет магмы и горячих магматических пород. Дебит некоторых гейзеров непосредственно связан с тем, каким был год – *влажным или засушливым. Большинство* гейзеров извергается нерегулярно. Извержение *одних гейзеров длится всего* несколько минут, из других вода изливается в течение часа и больше. Выбрасываемые струи могут достигать высоты от нескольких метров до 80 м. Один из известнейших в мире гейзеров – Олд-Файтфул в Йеллоустонском национальном парке (рис. 12.22). В течение 1970 г. он извергался регулярно, в среднем через каждые 65 мин. Однако и в этот период промежутки времени между излияниями колебались от 34 до 91 мин.

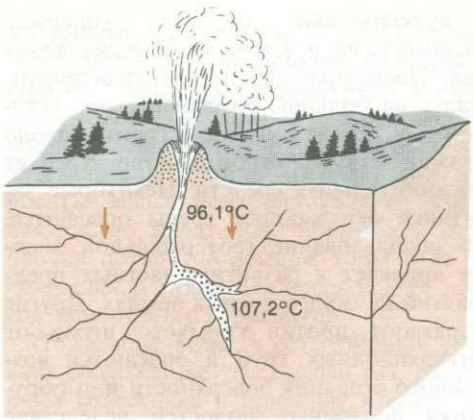


РИС. 12.23
Блок-диаграмма, иллюстрирующая теорию извержения гейзеров, разработанную Бунзеном. Из-за ограниченной циркуляции вода в трещинах и каналах на глубине нагревается и вблизи главного источника тепла достигает точки кипения раньше, чем в верхней части канала. Для простоты показано всего несколько трещин.

Извержению гейзера обычно предшествует грохот и сильное кипение воды. Вода вытекает из подводящего канала и затем сильной струей выбрасывается вверх на много метров. Общепризнанной считается теория гейзеров Бунзена, который изучал гейзеры Исландии. Эта теория исходит из факта увеличения температуры кипения воды с повышением давления. На глубине 50 м она больше 100°С, а на глубине 100 м равна 180°С. Скважина, пробуренная в долине гейзеров Норрис в Йеллоустонском парке, показала, что на глубине 330 м температура воды равна 240°С и продолжает увеличиваться с глубиной. Если вода течет вниз по трещине или подземному каналу (рис. 12.23) и нагревается на глубине, поглощая горячие газы или соприкасаясь с разогретыми породами, она остается в жидком состоянии до тех пор, пока ее температура не превысит точку кипения при существующем давлении. При нагревании до температуры, обеспечивающей образование пара, последний может расшириться так быстро, что не успеет выйти вверх, и тогда он будет поднимать столб воды. Как только некоторое количество воды выплеснется наружу, гидростатическое давление столба уменьшится. Поэтому вода, температура которой теперь значительно выше новой точки кипения, будет превращаться в пар и вырываться из жерла как в жидком состоянии, так и в виде пара.

Кроме того, причиной извержения некоторых гейзеров может быть накопление пара и других газов в верхней части изогнутых каналов (сифонов). Любое сужение канала, препятствующее конвекции нагретой воды, также способствует закипанию воды в этом месте.

Кремнистые отложения горячих источников, особенно гейзеров, называют *гейзеритом* или *кремнистым туфом*. Там, где эти отложения обильны, вокруг гейзера может образоваться бугор из гейзерита. В горячей воде содержится много растворенного кремнезема, и именно кремнезем выделяется в основном из горячих источников и гейзеров Йеллоустонского национального парка; исключение составляют горячие источники Маммот, из которых идет отложение известкового травертина.

Геотермальная энергия. Помимо того что гейзеры и горячие источники представляют собой довольно эффектные геологические явления, они открывают возможность использования потенциально важного источника энергии. Геотермальная энергия – это энергия, получаемая с помощью буровых скважин от высвобождающегося пара и горячей воды в областях естественного прогрева. В действительности, правда, это не новый источник энергии. В Италии, возле Лардерелло, электрическую энергию за счет пара и горячей воды получают с 1905 г. В некоторых районах Исландии горячую воду и пар используют для отопления с 1925 г., а в области развития гейзеров на севере Калифорнии электроэнергию получают с 1960 г. Энергетические установки, использующие геотермальную энергию, имеются также в Мексике, Японии и СССР.

Интерес к геотермальной энергии возобновился в связи с тем, что запасы горючих ископаемых, особенно нефти и газа, истощаются, а 10 млн. кВт электроэнергии, полученной за счет геотермальной, были бы эквивалентны энергии, которая выделяется при сжигании 1 млрд. т угля (см. гл. 21). Горячая вода и пар – источники практически чистой, не загрязняющей окружающую среду энергии, хотя при их использовании возникает проблема, связанная с их высокой минерализацией. Сегодняшние экономические оценки показывают, что геотермальная энергия может оказаться дешевле современных источников энергии. Общие потенциальные запасы энергии на глубинах до 10 км составляют $6 \cdot 10^{24}$ кал, что соответствует $8{,}165 \cdot 10^{14}$ т угля.

Все больший интерес, уступающий только вниманию, уделяемому солнечному теплу, вызывает использование природных горячих вод и для других целей, помимо производства электроэнергии. Программы бурения скважин разрабатываются во многих странах.

Использование или предполагаемое использование геотермальной энергии не обходится без затруднений. Пар и горячая вода геотермальных источников в вулканических областях содержат вредные газы и едкие химические вещества. Поскольку пар нельзя транспортировать на большие расстояния, энергетические установки нужно строить около скважин; такое строительство требует вспомогательных средств. Некоторые защитники окружающей среды опасаются, что использование геотермальной энергии приведет к развитию частных предприятий на общественных землях. Другие возражают против громкого шума от вентиляционных труб и опасаются возможного оседания поверхности или обрушения подземных полостей вследствие удаления жидкости или газа.

По-видимому, некоторые из этих вредных влияний на окружающую среду можно уменьшить, используя замкнутые системы, в которых вытекающая из источника вода закачивается назад в подземный резервуар. Можно ожидать, что по мере расширения дорогостоящего разведочного бурения и совершенствования технологии доля геотермальной энергии в обеспечении энергетических потребностей будет постепенно возрастать если и не повсеместно, то по крайней мере на западе США.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ

Подземные воды в зависимости от их происхождения можно разделить на три типа: метеорные, погребенные (реликтовые) и магматические (ювенильные), причем подавляющая масса подземной воды относится к метеорным водам (прежним атмосферным осадкам). Распространение и движение подземных вод являются функцией пористости и проницаемости материала ниже поверхности земли.

Подземные воды образуют подзону увлажнения почвы, изменчивую ненасыщенную промежуточную подзону с подвешенной водой, капиллярную оболочку и зону насыщения. При особых условиях развиваются подвешенные зеркала грунтовых вод.

Инфильтрация метеорной воды в отличие от поверхностного стока контролируется количеством и типом атмосферных осадков и скоростью их выпадения, наклоном земной поверхности, проницаемостью залегающего на поверхности материала и коренных пород, а также типом и обилием растительности. Просачивание метеорной воды зависит от гидравлического (напорного) градиента и от проницаемости и текстуры пород. Обычно оно происходит медленно, за исключением просачивания по зияющим трещинам и пустотам растворения.

Большое количество подземных вод изливается на поверхность в виде источников, в особенности связанных с толщами галечников, лавовыми потоками, зонами разломов и каналами растворения в известняках.

Около 1/5 общего количества подземной воды, используемой для орошения,

в промышленности и для домашних нужд, получают из колодцев и скважин. При благоприятных структурных и топографических условиях в некоторые колодцы и скважины вода поступает под артезианским напором и может фонтанировать. Запасы подземных вод возобновляются, но желательно принимать меры против потерь подземной воды и ее загрязнения, а также для восполнения запасов водоносных горизонтов.

Подземные воды, в естественных условиях содержащие углекислый газ, растворяют известняки и приводят к образованию карстовых воронок, пещер, долин растворения и карстового рельефа поверхности. Карлсбадская пещера в шт. Нью-Мексико и Мамонтова пещера в шт. Кентукки представляют собой гигантские системы подземных полостей.

В известняковых пещерах осаждение из подземных вод вызывает формирование сталактитов, сталагмитов, колонн и других натечных образований. Кроме того, подземная вода способствует образованию бугров и террас из травертина (в местах выхода как горячих, так и холодных источников) и из кремнистого гейзерита (у отверстий, через которые выходят пар и горячие водяные струи гейзеров). Из числа некоторых второстепенных выделений материала на глубине можно отметить заполнение жил, образование цемента в породах, замещение минералов и пород, процессы окаменения.

Геотермальная энергия пара и горячей воды, которая в настоящее время используется еще в скромных масштабах, по-видимому, найдет более широкое применение в дальнейшем.

ВОПРОСЫ

1. Каким образом вода проникает в землю?
2. Чем пористость отличается от проницаемости?
3. Сравните два обломочных осадка, один из которых состоит из хорошо отсортированных (одинакового размера) окатанных зерен песка, а другой – из угловатых обломков разного размера. У какого осадка пористость больше и почему? У какого осадка больше проницаемость и почему?
4. Нарисуйте профиль с изображением зон аэрации и насыщения около подвешенного водоносного горизонта.
5. Как может влиять на подземные воды климат?
6. Можно ли возобновлять запасы подземных вод?
7. Справедливо ли утверждение, что деятельность человека, например использование воды в промышленности, в быту, неэкономное расходование и т. д., не превышает способности подземных вод восстанавливать свои запасы и очищаться от загрязнения?
8. Каковы проявления эрозионной и аккумулятивной деятельности подземных вод?

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Horberg L., 1949, Geomorphic history of the Carlsbad Caverns area, New Mexico, Jour. Geology, vol. 57, pp. 464–476.

Meinzer O. E., 1923, Outline of ground-water hydrology, with definitions, U.S. Geol. Surv. Water-Supply Paper 494.

Meinzer O. E., 1932, Outline of methods for estimating ground-water supplies, U.S. Geol. Surv. Water-Supply Paper 638, pp. 99–114.

Meinzer O. E. (ed.), 1942, Ground water: part 9, Hydrology, in: Physics of the Earth, McGraw-Hill Book Company, New York, pp. 385–443..

Stefferud A. (ed.), 1955, Water, Yearbook of Agriculture.

Thornbury W. D., 1969, Principles of Geomorphology, 2d ed., John Wiley and Sons, Inc., New York.

Todd D. C., 1967, Groundwater Hydrology, John Wiley and Sons, Inc., New York.



13 РАБОТА РЕК

Работа текущей воды имеет большое значение для человечества. Речные отложения удобряют почву и нивелируют земную поверхность, что создает условия для строительства населенных пунктов. Реки являются торговыми путями и источником воды для повседневных нужд. Они поддерживают рост сельскохозяйственных культур, дают энергию машинам, обеспечивают доступ к горным хребтам и высокогорным курортам.

Реки размывают сушу и переносят осадки из одного места в другое. Многие особенности ландшафта представляют собой результат размыва или отложения осадков реками или результат обоих этих процессов.

ДОЖДЕВАЯ ЭРОЗИЯ

Влияние дождевых капель. Эрозия начинается, как только дождевые капли ударяются о землю. Может быть, вы обращали внимание на обнаженную поверхность земли после сильного дождя? Хорошо видно, что каждый маленький камешек на этой поверхности лежит на бугорке земли, так как он защищал находящийся под ним крошечный участок почвы от размыва. Незащищенная почва



РИС. 13.1

После сильного дождя: каждый камешек защищал находящуюся под ним почву и теперь лежит на столбике земли. (Фотография Р. К. Фанстока.)

вокруг таких камушков вынесена водой (рис. 13.1). Падающие дождевые капли обладают неожиданно большой кинетической энергией, которая расходуется при ударе на разрыхление и вынос мелких частиц незащищенной почвы.

Если принять, что каждая дождевая капля имеет в диаметре 0,25 см, то ее конечная скорость будет равна 7 м/с. Общей кинетической энергии одного ливня, во время которого выпадает 10 см осадков, достаточно для того, чтобы поднять слой почвы мощностью 10 см на высоту более 2 м (Linsley et all., 1949). В действительности почва не поднимается на 2 м, но как только она разрыхлится, сопротивление ее частиц дальнейшей эрозии прекращается.

Склоновый сток, плоскостная эрозия и формирование оврагов. Когда атмосферных осадков выпадает больше,чем может впитаться в почву на склонах, избыток воды стекает по поверхности. На пологих склонах поверхностный сток развивается в виде склонового стока, при котором тонкая пленка воды движется вниз по склону, вызывая плоскостную эрозию (плоскостной смыв). Тщательное изучение смыва почвенного слоя с обрабатываемых полей указывает на то, что плоскостная эрозия в сочетании с ударами дождевых капель за год перемещает вниз по склонам десятки тонн почвы с одного акра площади. Обычно склоновый сток способен эродировать только тонкий алевритовый и глинистый материал, оставляя на месте в виде остаточных продуктов (элювия) песок и гальку.

Вода,движущаяся по неровной поверхности земли в виде склонового стока, может скапливаться в неровностях поверхности, образуя небольшие *ручейки.* Собравшаяся в ручьи вода обладает более сильным течением, т. е. имеет больший объем и большую скорость, и эффективнее действует не как склоновый сток, а как агент эрозии. Ручьи изменяют конфигурацию первичных склонов, размывают мелкие овражки, превращая их в маленькие долины с крутыми склонами



РИС. 13.2
Овраги на ферме в верховьях долины Теннесси. (Фотография из архива муниципальных властей долины Теннесси.)

(рис. 13.2). Продолжающееся увеличение объема воды, переносимой ручьями, приводит к наступательной эрозии и врезанию русел потоков. В конце концов образуются ветвящиеся дренажные системы, в каждую из которых стекает вода из собственного небольшого *водосборного бассейна*. Водосборный бассейн – это площадь поверхности земли, с которой вода и осадки выносятся в поток. Граница водосборного бассейна называется *водоразделом*, так как он отделяет сток одной речной системы от стока другой.

Наиболее сильная эрозия происходит на склонах, лишенных защитного растительного покрова. Растительность предохраняет поверхность земли от эрозии благодаря тому, что дождевые капли разбиваются и движение их приостанавливается прежде, чем они ударяются о землю, и, таким образом, поверхностный сток ограничивается. Корни и растительный материал на земле предохраняют почву от размыва теми дождевыми каплями, которые достигают поверхности склонов.

В природных условиях больше всего осадочного материала выносится там, где в год выпадает 25–35 см атмосферных осадков; при этом большую роль играет скорость испарения. Такого количества воды достаточно для того, чтобы возник значительный поверхностный сток, и слишком мало для того, чтобы способствовать произрастанию защитного растительного покрова. С уменьшением или увеличением количества влаги вынос осадочного материала становится заметно меньше. При более высоком среднегодовом количестве атмосферных осадков растительность обычно хорошо защищает грунт.

Таким образом, первоначальное понижение поверхности суши происходит под действием выветривания, гравитационного переноса, ударов дождевых капель и плоскостного смыва. После развития речных долин процессы выравнивания продолжают поставлять осадочный материал в реки. Каждая река непрерывно углубляет и расширяет свою долину и увеличивает водосборный бассейн посредством наступательной эрозии. Развитие долины вызывает формирование новых склонов, что усиливает процессы выравнивания. Эрозионные процессы, действуя на склоны водосборного бассейна, оказывают чрезвычайно большое влияние на понижение поверхности земли, так как русла рек занимают лишь около 5% поверхности суши. Почва и частицы пород, которые попадают в реки в результате этих процессов, затем выносятся в море.

Понижение поверхности суши в результате эрозии хорошо видно в бассейне реки Миссисипи и ее притоков на площади приблизительно $3{,}2 \cdot 10^6$ км^2. Бассейн

Миссисипи понижается со средней скоростью около 1 м за 30 000 лет. Однако следует помнить, что значительная часть водосборного бассейна Миссисипи перекрыта легко размывающимися неконсолидированными ледниковыми наносами и эоловыми алевритовыми отложениями. Скорость понижения водосборных бассейнов в коренных породах гораздо меньше.

МЕХАНИЗМ РАБОТЫ РЕК

Ламинарное течение. При очень низких скоростях течения в выровненном русле вода в реке движется спокойно, как если бы она состояла из пачки пластин и верхние пластины проскальзывали бы по нижним. *Этот тип движения называется* ламинарным течением; как агент эрозии он почти не дает эффекта.

Турбулентное течение. В большинстве естественных водотоков молекулы воды движутся беспорядочно или по перекрещивающимся траекториям; при этом вода имеет тенденцию полностью перемешиваться. Такой тип движения называется турбулентным течением. Средняя скорость течения реки (от 1 до 3 м/с) наблюдается над ее ложем. Около речного ложа скорость течения намного меньше из-за трения. Придонное турбулентное течение взмучивает осадки и помогает удержать их в потоке во взвешенном состоянии.

Турбулентное течение проявляется в виде водоворотов и других искажений поверхности воды. Турбулентность особенно хорошо заметна на порогах, там, где можно наблюдать вечно меняющуюся картину водоворотов, ровную поверхность воды и завихрения на ней и чрезвычайно бурную вспененную «белую» воду.

Скорость. Скорость течения реки определяется уклоном, или градиентом, ее ложа, формой и шероховатостью русла, водоносностью и грузом осадков. Вследствие уклона речного ложа потенциальная энергия реки превращается в кинетическую. *Уклон* определяется как величина перепада, деленная на расстояние по горизонтали, на котором этот перепад имеет место. На рис. 13.3 показано, как ускорение силы тяжести увеличивает скорость течения при крутом уклоне русла.

Неровности стенок и дна русла вызывают трение и турбулентное течение во-

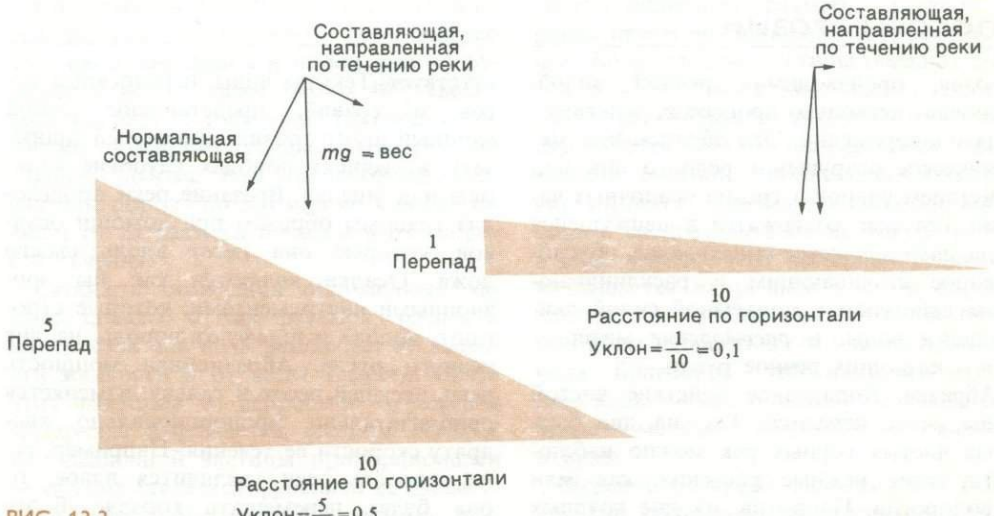


РИС. 13.3
Схема, на которой показано, почему ускорение силы тяжести увеличивает скорость течения на крутых склонах.

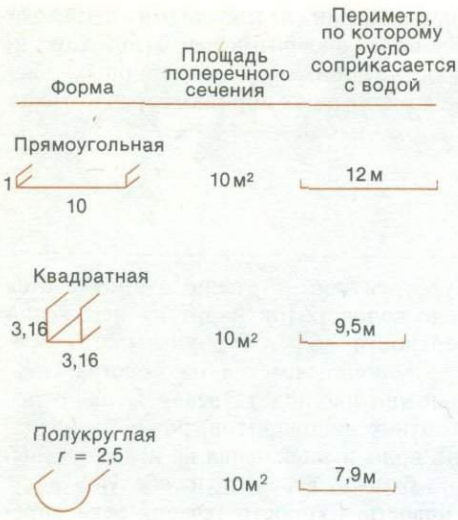


РИС. 13.4
Речные русла, имеющие разную форму, но одинаковую площадь поперечного сечения. *Самый короткий периметр, по которому* русло соприкасается с водой, и, следовательно, наименьшее сопротивление за счет трения характерны для полукруглого русла.

ды и уменьшают скорость. Величина трения пропорциональна количеству и размерам неровностей стенок и дна. Трение является наименьшим в полукруглых руслах, потому что у них меньше площадь смачиваемой поверхности, которая препятствует течению, чем у русел с другими формами поперечного сечения (рис. 13.4). Большинство естественных русел шире и мельче идеального полукруглого канала. На скорость течения влияет также тип осадка, слагающего русло. Дно, сложенное гравием, оказывает большее сопротивление, чем песчаное.

С увеличением объема воды или *расхода воды* в реке увеличивается глубина потока, а это в свою очередь увеличивает скорость течения. Изменением скорости поддерживается равновесие между расходом воды в реке и площадью ее поперечного течения. Количество осадков, переносимых рекой, тоже влияет на скорость течения, так как на перемещение осадков расходуется часть кинетической энергии потока.

СПОСОБЫ ЭРОЗИИ

Эрозия, производимая речной водой, включает несколько процессов, действующих одновременно. Это *абразия*, или механическое разрушение речного дна под действием ударов и трения осадочных частиц, которые содержатся в движущейся воде, *гидравлическое выпахивание*, обусловленное стачивающим и расклинивающим действием и подъемной силой движущейся воды, и *растворение* материалов, слагающих речное русло.

Абразия. Абразивное действие чистой воды очень невелико. Так, на дне быстрых чистых горных рек можно наблюдать такие нежные растения, как мхи и водоросли. Напротив, на дне крупных горных потоков, несущих песок и более грубые осадки, всякая растительность отсутствует. Текучие воды, переносящие песок и гравий, представляют собой мощный агент эрозии, способный прорезать в твердых породах глубокие каньоны или ущелья. Врезание реки происходит главным образом при помощи осадков, которые она несет вдоль своего ложа. Осадки являются как бы эрозионными инструментами, которые строгают, долбят и шлифуют породы на дне речного русла. Абразионная мощность реки, несущей песок и гальку, изменяется приблизительно пропорционально квадрату скорости ее течения. Например, если скорость реки увеличится вдвое, то она будет перемещать гораздо более крупные частицы, чем раньше, и каждый обломок будет обладать большей кинети-

ческой энергией и разрушать породу, выходящую в русле реки, примерно в четыре раза быстрее.

Гидравлическое действие. Эрозия речной водой без песка и гравия происходит путем ударного воздействия самого течения на рыхлый материал ложа и берегов водотока, который разрыхляет, поднимает и перекатывает по дну частицы грунта. Эти частицы могут быть мелкими (ил, песок), но могут достигать размера валунов. Обрушение подрезанных водой берегов усиливает действие эрозии. Вода может выбить и вовлечь в движение кусочки твердой породы, поскольку давление воды, попавшей в трещины, может расклинивать и разламывать коренные породы русла. При этом приложенные силы достаточно велики для того, чтобы с места сдвинулись крупные глыбы.

Растворение. В природных условиях химически чистой воды не существует. Речная вода постоянно содержит растворенные минеральные вещества. Некоторые примеси значительно увеличивают растворяющую способность воды. Например, речная вода, которая течет через болота и топи, захватывает угольную и органические кислоты из гниющих растений. Скорость растворения кремнистых пород в речной воде почти незаметна, а известняки в такой насыщенной кислотами воде растворяются быстро. Подсчитано, что на континентах ежегодно растворяется около 5 млрд. т твердого вещества. Значительный процент этого количества приходится на вещества, растворенные в грунтовых водах, так что большая часть растворенных веществ попадает в реки с грунтовыми водами, а не непосредственно из коренных пород.

ПЕРЕНОС

Реки транспортируют содержащиеся в них осадки, заставляя грубые частицы *скользить* и *перекатываться* по дну, перенося тонкий песчаный, алевритовый и глинистый материал *во взвешенном состоянии*, а растворимые соединения – в *растворе*.

Способность реки переносить материал усиливается тем, что большинство обломков минералов и пород при погружении в воду теряют около 40% своего веса. На рис. 13.5 показано распределение частиц, имеющих разные размеры, по глубине потока. Как транспортируются частицы пород – по дну или во взвеси, – зависит от их размера и массы и от скорости течения.

Скорость осаждения обломочных частиц зависит от их размера, разности плотностей частиц и жидкости, от вязкости жидкости и от силы тяжести. Связь этих факторов со скоростью отложения материала выражается *законом Стокса*. Вес осадочной частицы пропорционален ее объему (является функцией ее диаметра в кубе). Сопротивление частицы осаждению – это функция площади поверхности частицы или квадрата ее диаметра. Таким образом, с увеличением размера частиц скорость их осаждения намного возрастает.

Обломочные частицы крупнее песка быстро оседают и редко переносятся во взвешенном состоянии. Они движутся по дну, почти все время касаясь его и других частиц подобного размера; скорость их равна примерно половине скорости течения. Более мелкие частицы оседают медленно и, следовательно, имеют тенденцию переноситься во взвешенном состоянии. Почти любое направленное вверх течение способно поднимать тонкозернистый песок, алеврит и глинистый материал и распределять их по всему потоку в виде взвеси. Этот материал редко откладывается на речном дне, он перемещается во взвешенном состоянии почти с той же скоростью, что и несущая его вода. Благодаря турбулентному движению воды по всему потоку рассеяны еще более мелкие коллоидные частицы и ионы.

Перенос во время паводков как более крупных обломков, так и большего объема осадков свидетельствует о том, что увеличение водности и скорости тече-

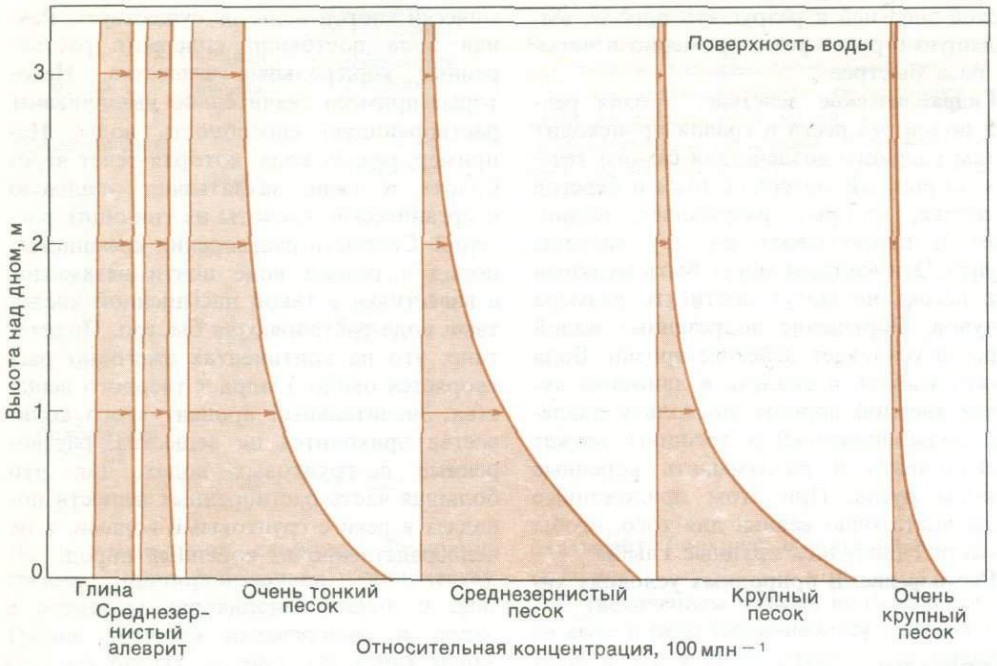


РИС. 13.5

Размер взвешенных частиц на разных глубинах в реке Миссури около города Канзас-Сити, шт. Миссури. Обратите внимание на то, что более грубые осадки сосредоточены у дна, а более тонкозернистый материал распределен равномерно по всему потоку.
(По Л. Г. Штраубу: *L. G. Straub* in: *O. E. Meinzer* (ed.), Hydrology, McGraw-Hill Book Company, *1942*; reprinted Dover Publications, Inc., *1949*.)

ния реки значительно увеличивает ее способность переносить осадки. Эта дополнительная способность к транспортировке является результатом увеличения турбулентности движения воды, а также увеличения ее объема. Для грубозернистого материала размеры самых крупных частиц, переносимых по дну реки, изменяются прямо пропорционально скорости течения в степени 2,6.

На рис. 13.6 обобщены результаты нескольких опытов с лотками, которые демонстрируют особенности эрозии и транспортировки осадков текучими водами. На диаграмме скоростные характеристики реки разделены на три поля: скорость течения, скорость переноса и скорость отложения материала. На графике, построенном с учетом размера частиц, видно, что для вовлечения частиц данного размера в движение требуется бóльшая скорость течения, чем для того, чтобы переносить такие же частицы, если они уже движутся. Для большей части осадков существует критическая скорость течения; если река движется медленнее, перенос не будет осуществляться, а вместо этого произойдет отложение осадков. Например, для того чтобы вовлечь в движение над речным дном гальку, требуется скорость течения около 15 см/с, а чтобы удержать ее в движении, достаточна скорость около 4 см/с. Так происходит потому, что для волочения частиц по дну нужны меньшие скорости, чем для того, чтобы частицы отскакивали от дна и катились. Так как сила тяжести способствует перемещению материала с берегов в русло реки, то пригодного для переноса материала берегового происхождения в реке может находиться значительно больше, чем обломков, которые река может вымыть из своего ложа.

Не обязательно легче всего размываются самые тонкозернистые породы. Алеврит и глина, возможно, лучше про-

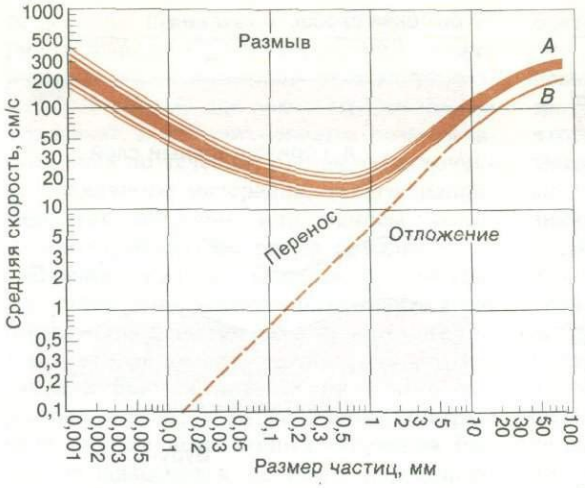


РИС. 13.6
Приближенные кривые для эрозии и аккумуляции однородного материала (масштаб логарифмический). (По материалам Филипа Юльстрёма, 1939.)

тивостоят эрозии, чем тонкозернистый песок, из-за того, что при захоронении и высыхании они уплотняются и сцепление между частицами в них сильно возрастает. Кроме того, там, где вода соприкасается с дном, скорость ее течения может быть чрезвычайно низкой. Однако песчинки на дне достаточно велики для того, чтобы выступать над граничным слоем воды с низкой скоростью, создавать значительную шероховатость дна и обеспечивать тем самым турбулентность течения, которое их и подхватывает.

На рис. 13.7 показан ряд форм, которые образует осадочный материал на дне рек. Каждая форма речного ложа возникает под влиянием особого режима течения, как это было установлено проведенными в лаборатории опытами с лотком. Форма ложа и накопившиеся осадки, если они сохраняются, фиксируют условия, существовавшие на дне реки. Обычно в разных частях одного и того же русла форма ложа меняется. Изменение скорости течения фиксируется в осадках возникновением дюн (подводных гряд песка), за которыми следует песчаная рябь, небольшие антидюны и снова песчаная рябь (рис. 13.8).

Изменения во время переноса. Во время переноса по дну и во взвешенном состоянии происходит постоянный обмен между транспортируемым материалом и материалом, лежащим на дне. Частицы то подхватываются потоком, то оседают на дно. Чем они мельче, тем дольше несет их поток с момента захвата до момента окончательного отложения! По кривым Юльстрёма видно, что там, где скорость течения для какого-то участка русла выше средней, может произойти размыв более грубого материала.

В аридных областях концентрация растворенного вещества в реке может повыситься настолько, что в меженное время оно будет *осаждаться* на гальке, покрывая ее тонким слоем. В областях с гумидным климатом река, которую питают холодные ключи с высоким содержанием в воде растворенного карбоната кальция, может отложить вдоль своего течения кальцит. Эти отложения формируются в результате того, что из воды при нагревании, перемешивании и за счет жизнедеятельности растений и животных выделяется углекислый газ. Однако обычно концентрация растворенных веществ в речной воде слишком мала для того, чтобы реки на своем пути к морю откладывали химические осадки.

От верховьев реки к устью размеры частиц на дне, берегах и в потоке уменьшаются. Это вызвано *избирательной сортировкой* и *абразивным истиранием* или сочетанием обоих процессов.

Избирательная сортировка происходит потому, что более тонкий материал легче подхватывается течением и может быть перенесен на большее расстояние, чем грубообломочный. На коротком отрезке

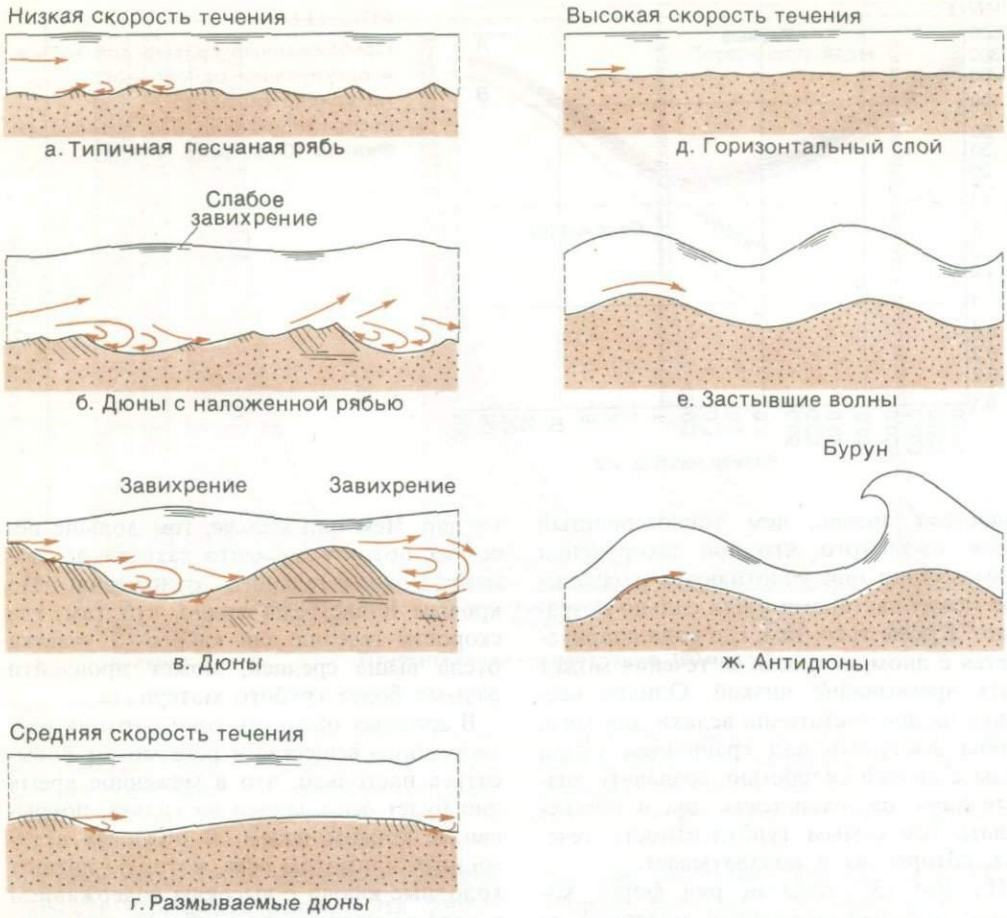


РИС. 13.7

Различные образования на дне песчаных русел. (По Симонсу и Ричардсону, 1961.)

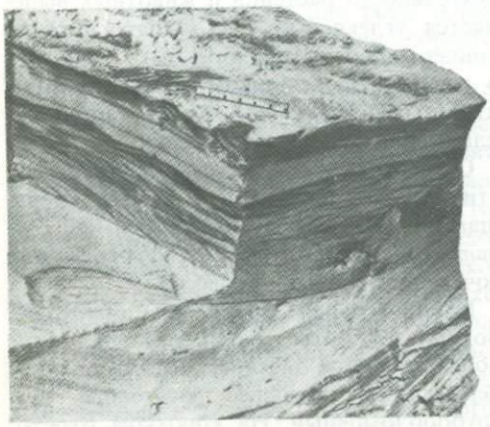


РИС. 13.8

Зафиксированная в осадках последовательность донных образований на дне реки Рио-Гранде. (По Хармсу и Фанстоку: *Harms and Fahnestock*, SEPM Special Pub. 12, 1965.)

русла, где происходит отложение материала, избирательная сортировка может вызвать очень заметные изменения размеров частиц на дне реки. Этот механизм объясняет, почему изменяется размер частиц вниз по течению от одного источника осадочного материала, такого, например, как оползень или наносы, отложенные потоком во время паводка.

Важное значение имеет и то обстоятельство, что обломки разрушаются до более мелких частиц. Это происходит потому, что обломки волочатся по дну, катятся и бьются друг о друга и о коренные породы в русле потока. Острые края и углы неокатанных обломков быстро сглаживаются, но после первичного окатывания истирание происходит гораздо медленнее. Опыты по абразии невыветрелых угловатых частиц породы заставляют предположить, что для того, чтобы получить наблюдаемое в природе уменьшение размеров частиц, необходимо, чтобы эти частицы проделали путь, значительно превышающий длину большинства речных систем. Но опыты показали также, что если между периодами транспортировки материал испытал выветривание, то истирание при последующем переносе будет гораздо эффективнее. Такое выветривание происходит, когда осадки на некоторое время откладываются на речных отмелях, поймах и террасах или в заводях.

РЕКИ КАК ДИНАМИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ

Равновесие. Река, гидравлические характеристики которой постоянно изменяются и компенсируются таким образом, что система находится в состоянии равновесия, представляет собой *выровненную реку*. Первым идею о потоке, достигшем профиля равновесия, развил геоморфолог Дж. Гувер Маккин. Его концепция такова (Mackin, 1948):

«Река считается выровненной, если на протяжении ряда лет ее уклон сохраняется таким, что при существующем дебите и преобладающей характеристике русла обеспечивает именно ту скорость, которая требуется для транспортировки материала, поступающего из водосборного бассейна. Выровненная река – это река, достигшая профиля равновесия. Ее диагностическим признаком является то, что любое изменение любого из контролирующих факторов вызовет смещение равновесия в том направлении, которое будет стремиться уменьшить влияние этого изменения».

Факторы, контролирующие равновесие. Главные факторы, контролирующие равновесие,– это *расход воды, твердый сток* и *размер осадочных частиц, уклон* и *форма русла*.

а. *Расход воды* представляет собой количество воды в данной точке или сток из водосборного бассейна, расположенного выше по течению, и обычно измеряется в кубометрах в секунду. Зависит он главным образом от климата. В количественной форме расход воды выражается соотношением

$$Q\,(\text{расход воды}) = V_{ср}\,(\text{средняя скорость течения}) \times A\,(\text{площадь поперечного сечения}).$$

б. *Твердый сток и размер осадочных частиц*. Количество вынесенного материала (в тоннах в сутки) и размер осадочных частиц определяются климатом, выветриванием и всеми процессами, при помощи которых осадки попадают в реку. Величина твердого стока зависит также от размера зерен и от состава и текстуры первичной породы.

в. *Уклон* русла сам по себе регулируется таким образом, чтобы обеспечивалась скорость течения, необходимая для переноса именно того количества и той размерности материала, который поступает в реку. Если уклон русла слишком мал для переноса осадков, то происходит их отложение (аккумуляция) до тех пор, пока уклон не станет достаточным для транспортировки (рис. 13.9, *а*). Если же уклон русла настолько крутой, что обеспечивает бóльшую скорость, чем необходима для переноса, то его крутизна уменьшается за счет эрозии. Новый уклон обеспечивает

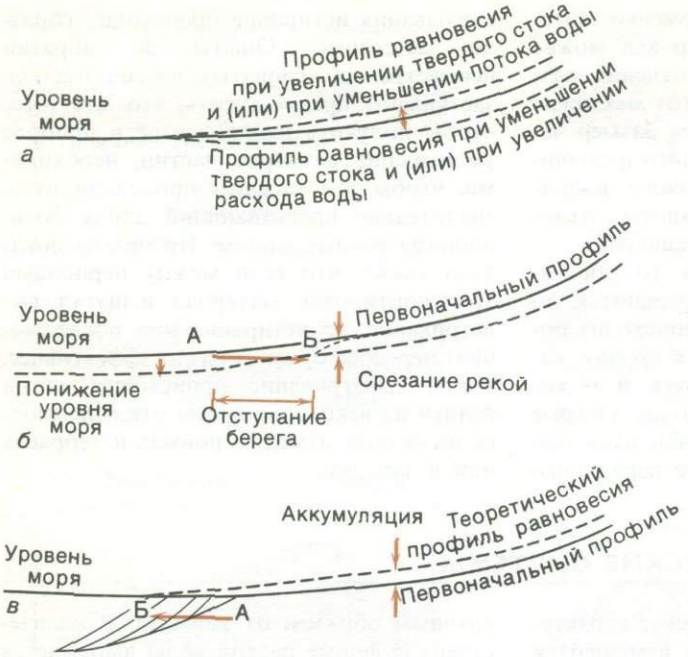


РИС. 13.9
Реакция реки на изменение одного какого-нибудь фактора (все остальные факторы не меняются). *а* – реакция на изменение твердого стока и расхода воды. Увеличением твердого стока может компенсироваться, по крайней мере частично, эффект увеличения расхода воды; уменьшением расхода воды может компенсироваться эффект уменьшения твердого стока; увеличение или уменьшение диаметра твердых частиц может заменять увеличение или уменьшение количества транспортируемого материала; *б* – реакция реки на отступание берега или понижение уровня моря. Такие изменения происходили в результате непрерывного отступания берега озера Эри и понижения уровня воды в нем, когда большое количество воды удерживалось на суше в виде ледников; *в* – реакция на развитие дельты. Реки впадают в спокойные водоемы или затопляют обширные впадины.

именно ту скорость, которая требуется для переноса (рис. 13.9, *б*).

г. *Форма русла.* Для описания формы русла используется отношение его глубины к ширине. Форма русла определяется взаимодействием расхода воды, количества осадков, уклона русла и локальных факторов, таких, как размываемость берегов и степень прямолинейности русла.

Форма русла важна для определения скорости течения и, следовательно, переноса осадков. В общем случае, чем уже русло, тем больше осадков переносится потоком. Когда русло сужается из-за аккумуляции осадков вдоль берегов, это может привести к размыву ложа реки, если же аккумуляция материала в русле усиливает размыв берегов, то русло расширяется.

Базис эрозии. Когда речь идет о том, как река вырабатывает профиль равновесия, а также о формировании долины, важным является понятие о базисе эрозии. Базис эрозии – это самый низкий уровень, до которого река может размывать свое ложе. Базис эрозии достигнут, когда уклон русла приближается к нулю, а течение приостанавливается или замедляется. После этого река неспособна производить эрозию. Существуют два типа базиса эрозий – *местный*, или *временный*, и *общий*, или *постоянный*. Местным базисом эрозии может служить выступ или барьер

из прочной породы, озеро или место слияния главной реки с притоком. Общий базис эрозии у устья реки располагается немного ниже уровня моря. Хотя постоянным он может и не быть, общий базис эрозии изменяется гораздо медленнее, чем временные местные базисы эрозии.

Ниже базиса эрозии река прорезает русло до глубины, соответствующей ее размеру. Например, уровень русла Миссисипи у Нового Орлеана примерно на 25 м ниже среднего уровня моря. Когда река впадает в озеро или море, движение воды и осадочного материала полностью не прекращается. Они продолжают двигаться в виде потока до тех пор, пока существует наклон водной поверхности, обеспечивающий течение под действием силы тяжести.

Нарушение равновесия. Вдоль северного берега озера Эри береговая линия под действием волновой эрозии отступает в сторону суши, укорачивая таким образом небольшие речки, впадающие в это озеро (рис. 13.9, *б*). В ответ на увеличение уклона в нижнем течении реки увеличивают перенос осадочного материала за счет активного врезания. В результате вдоль берега озера вода подтачивает устои мостов, смещает водопроводные трубы и разрушает дороги.

В плейстоцене уровень моря несколько раз понижался примерно на 100 м за тысячу лет. Это происходило потому, что большое количество воды удерживалось в виде крупных материковых ледников и не поступало в море. В периоды оледенения реки, впадавшие в море, в нижнем своем течении обычно приспосабливались к понижению базиса эрозии, глубже врезая русла. Происходило то же самое, что и на северном берегу озера Эри. Одновременно реки в верхнем течении, а возможно, и на всем протяжении приспосабливались к изменению расхода воды и количества переносимого материала, что было следствием климатических изменений, сопровождавших оледенение.

Описанные здесь нарушения равновесия рек сравнительно просты, так как меняется только один или два фактора. Даже относительно небольшое изменение климата может повлиять на расход воды (полноводность реки), количество переносимого материала и способность берегов размываться, а это ведет к резкому изменению формы и характера рек.

Изменение расхода воды может иметь место, когда река перехватывает бассейн стока другой реки. Перехват реки приводит к увеличению стока в одной реке и к уменьшению в другой. Кроме того, перестройку водосборных бассейнов могут вызвать формирование разрывов, оледенение, вулканизм и изменение количества атмосферных осадков и испарения.

Ледниковые процессы, образование оползней или деятельность человека, нарушая растительный покров, могут значительно увеличить количество осадочного материала, переносимого рекой. Уменьшение твердого стока может произойти в результате прекращения любого из этих процессов или в результате развития растительного покрова.

Подобные изменения в расходе воды и величине твердого стока происходят во время паводков. Когда уровень воды поднимается, река часто размывает свое ложе, а когда вода спадает, река откладывает осадки. На рис. 13.10 показана такая схема чередования эрозии и аккумуляции, или *размыва* и *заполнения*, русла. Замечательным примером могут служить явления, которые происходили на реке Миссури, прежде чем ее разливы были ограничены с помощью плотин и водохранилищ, построенных в верхнем течении реки. Раньше большие паводки размывали ложе реки между городами Омаха и Небраска на глубине от 12 до 25 м и неоднократно сносили опоры мостов. Река размывает свое ложе только тогда, когда в ней больше воды, чем требуется для переноса осадков, а заполняет русло только тогда, когда осадочного материала в реке больше, чем она может транспортировать. Часто думают, что во время паводка река размывает русло на всем его протяжении. Если бы это было так, то водохранилища заполнялись бы осадками гораздо быстрее, чем это происходит на самом деле (рис. 13.11). На многих участках русла речное ложе при паводках совсем или почти не углубляет-

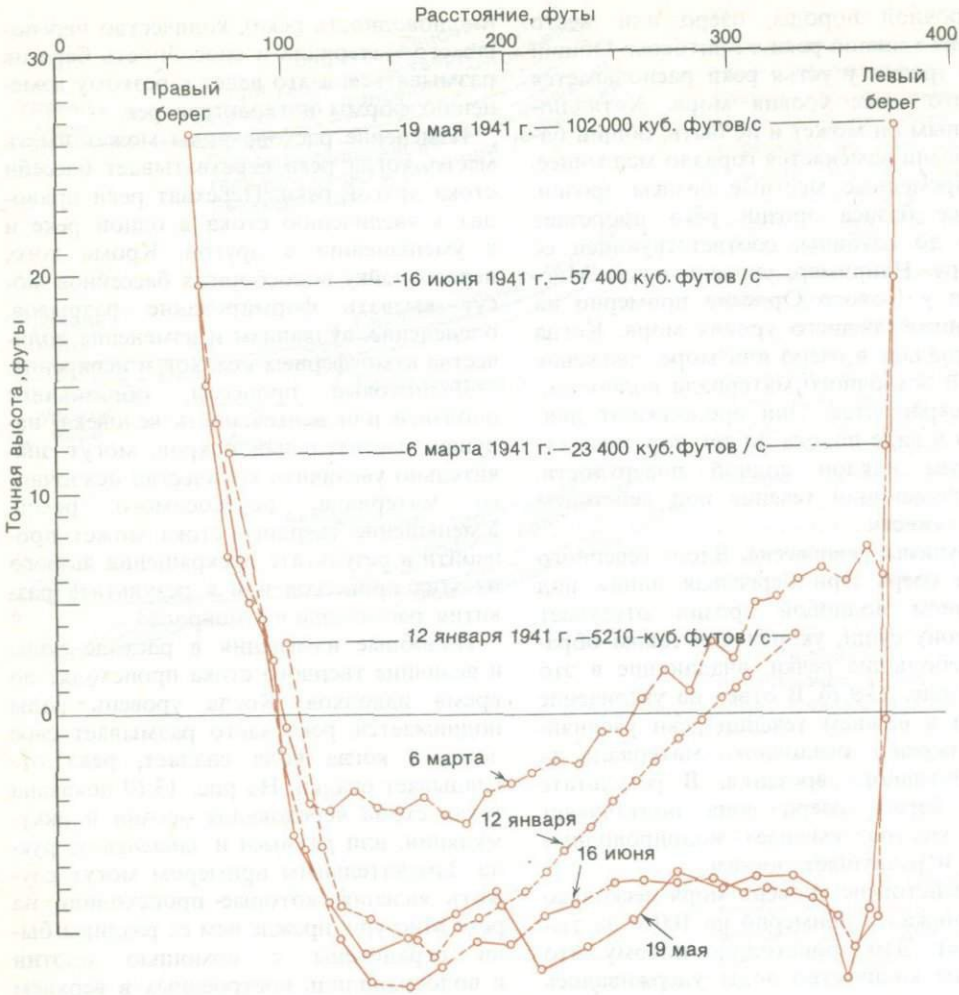


РИС. 13.10

Поперечное сечение русла реки Колорадо во время весеннего половодья 1941 г. у города Гранд-Каньон, шт. Аризона. (По Леопольду, Мэддоку: *Leopold, Maddock*, U.S. Geological Survey Prof. Paper 262, 1953.)



РИС. 13.11

Возможные реакции реки на изменения, вызванные строительством плотины и водохранилища. Реакция реки в верхнем течении зависит от количества переносимых осадков. В нижнем течении реки может происходить эрозия вследствие уменьшения твердого стока; реакция реки может быть весьма сложной из-за уменьшения максимальных паводков, которое компенсирует уменьшение нагрузки потока. Отложенные притоками во время паводков конусы выноса могут перекрыть главную реку, расход воды в которой стал меньше, и настолько повысить уровень воды, что она затопит силовые станции и выпускные отверстия плотины.

ся; напротив, в некоторых местах может происходить даже аккумуляция.

Противоположные тенденции могут взаимно компенсироваться, так что в результате равновесие изменится лишь незначительно или будет нарушаться весьма медленно. Примером может служить реакция Нила на строительство высотной Асуанской плотины. До того как Нил был перекрыт, он нес огромное количество осадочного материала, особенно во время разливов. Теперь огромный твердый сток и максимальные паводки Нила прекратились. В воде, которую спускают из озера Насера – водохранилища за плотиной – для орошения полей, содержится очень мало обломочного материала, и может показаться, что размыв речных осадков ниже плотины неизбежен. Однако для орошения спускают мало воды по сравнению с прежними ежегодными разливами Нила, и до сих пор размыва, которого опасались, не происходило. Привнос осадочного материала притоками, впадающими в Нил ниже плотины, соответствует или даже превосходит транспортирующую способность воды, которую спускают из водохранилища для полива.

Изменения продольного профиля рек. Большинство рек имеет длинные продольные профили, крутые в верховьях и постепенно выполаживающиеся в нижнем течении. Однако вдоль такого профиля общая тенденция может нарушаться. Для сохранения равновесия река приспосабливает уклон русла к каждому изменению контролирующих факторов. Например, дополнительное количество воды, поступающее из притока, позволяет реке переносить осадки при более пологом уклоне русла и, наоборот, увеличение количества или размера осадочных частиц за счет выноса материала притоком может потребовать увеличения крутизны.

На прочных коренных породах сходный профиль может образоваться в результате равновесия другого типа. Скорость врезания реки зависит от характера ее ложа. На твердых породах возникает уклон, который продолжает увеличиваться. Способность реки к врезанию возрастает до тех пор, пока действующие силы не уравновесятся.

Там, где уклон русла приспосабливается к сопротивлению ложа, работа реки направлена не на перенос осадков, а на размыв коренных пород. В таком случае река обычно может переносить больше материала, чем она получает, и ее профиль, несмотря на внешнее сходство, не соответствует профилю, который требуется для транспортировки материала.

ХАРАКТЕРНЫЕ ОСОБЕННОСТИ РУСЕЛ

Изменчивые параметры текущей по руслу реки – это *ширина, глубина, скорость, расход воды, уклон* и *неровности русла*. Ширина, глубина и скорость реки являются функцией расхода воды. Их значение увеличивается, если возрастает расход воды (рис. 13.10).

Как изменяется река вдоль своего течения от истоков до устья? Расход воды обычно увеличивается, так как в реку впадает все больше притоков. Сравните небольшую в верховьях горную речку с глубокой полноводной рекой на много километров ниже по течению, там, где она достигает моря.

Специалисты изучают влияние увеличения полноводности реки на русло с целью сравнения параметров русел, в которых увеличение расхода воды происходит с одинаковой частотой. Например, если в верховьях реки расход воды, равный 15 $м^3/с$, отмечается столько же раз в году, что и расход в 150 $м^3/с$ в главной реке, то параметры русел при этих разных расходах могут быть сравнимы.

Если сравнить ширину, глубину и скорость течения в верховьях и в главном русле при среднем годовом расходе воды, то можно заметить, что вниз по течению скорость увеличивается, уклон русла и размер осадочных частиц уменьшаются, а ширина и глубина тоже увеличиваются. Вспомните зависимость между

расходом воды, скоростью и площадью поперечного сечения реки, которая рассматривалась выше.

Мы уже обсуждали две причины уменьшения размера зерен транспортируемого материала вниз по течению реки. На рис. 13.6 видно, что для размыва и переноса материала речного ложа с такими размерами частиц, какие наблюдаются в верховьях реки, требуется скорость течения не меньше 2 м/с. В нижнем течении реки для размыва и переноса гравия требуется скорость 1–2 м/с, а для размыва и переноса песка – 0,3–0,8 м/с. Это значит, что при среднем годовом расходе воды река в нижнем течении способна размывать русло, в верховьях же средний годовой расход не влияет или почти не влияет на ее русло.

ФОРМИРОВАНИЕ ДОЛИН

Любая река, очевидно, состоит из главного ствола и питающих его притоков, и каждый из них течет по долине, пропорциональной его размеру.

Обычно реки по мере своего развития *удлиняют, углубляют* и *расширяют* долины. Неровности на поверхности, которая недавно обнажилась и стала доступной для речной эрозии, например, на приподнятом континентальном шельфе, направляют сток в понижения рельефа, где могут образоваться цепочки соединенных реками озер и заболоченных низин. Там, где реки имеют крутой уклон, энергия их *достаточна для эрозии, и поэтому они* врезаются вниз и вверх по течению, формируя изолированные участки долин. Когда озера заполняются осадками или когда река в процессе регрессивной эрозии прорезает озерные котловины, образуется непрерывная протяженная долина.

По мере того как долина углубляется, ее дно приближается к зеркалу грунтовых вод. Когда долина достигает этого уровня, река получает питание за счет грунтовых вод даже в засушливые сезоны. Такая река называется *постоянной рекой*. Реки, которые не достигли зеркала грунтовых вод и текут только после того, как *выпадут атмосферные осадки, называют-*

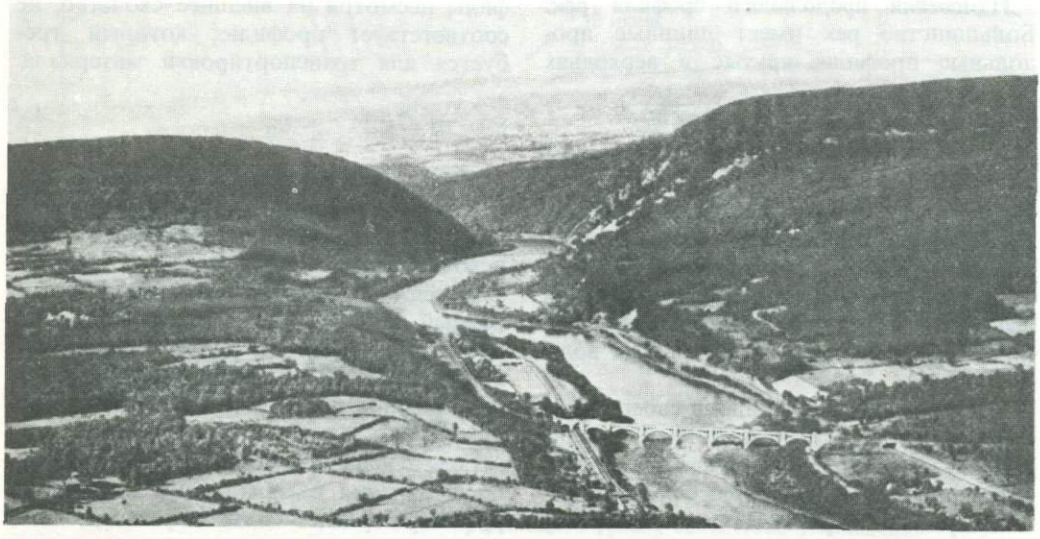


РИС. 13.12

Делавэрское ущелье, которое река Делавэр прорезала в горах Киттатинни, для которых характерны сглаженные вершины, на границе шт. Пенсильвания и Делавэр. Ущелья такого типа формируются там, где река пересекает устойчивый хребет, сложенный наклонно залегающими породами. (Фотография компании «Аэро сервис корпорейшн».)

ся пересыхающими реками. Пределом, до которого углубляется долина, является базис эрозии.

Вместе с углублением долины происходит ее расширение. Большинство долин гораздо шире прорезающих их рек. Расширение долины обусловлено гравитационным переносом осадков, плоскостной эрозией и боковой эрозией берегов и речного ложа. Боковая эрозия особенно заметна на внешней, выпуклой стороне речной излучины. Когда излучина расположена против борта долины, эрозия стремится расширить долину и увеличить крутизну ее борта. При увеличении крутизны возрастает эффективность процессов выветривания, гравитационного переноса и плоскостной эрозии. Ширина долины зависит и от характера пород, по которым течет река: в зависимости от типа пород долина может то расширяться, то становиться уже. В том случае, если река пересекает наклонные пласты крепких, устойчивых пород, залегающих между слоями более мягких пород, расширение долины в мягких породах выше и ниже по течению происходит быстрее, чем в прочных породах; в последних остается узкий проход, который называется *теснúной* или *ущельем* (рис. 13.12).

ТИПЫ РЕК

На путь, по которому река следует к морю, влияют 1) первичный наклон и неровности поверхности суши, 2) то, с какой легкостью размываются породы, которые река встречает на своем пути, а также 3) сложная история эрозии и аккумуляции, которая обусловлена климатическими изменениями, воздыманием и опусканием, формированием складок и разрывов и вулканической деятельностью.

Река, направление которой определяется первичным наклоном и неровностями поверхности земли, называется *консеквентной*. Такие реки характерны для прибрежных равнин, например для прибрежных равнин Атлантики и Мексиканского залива. Поверхность земли здесь довольно однородная и ровная, с пологим уклоном в сторону моря. Некоторые консеквентные потоки стекают с вулканических конусов по неровным лавовым полям или текут по волнистым равнинам, сложенным ледниковыми наносами (рис. 13.13, *а*).

Направление течения некоторых рек зависит от различий в структуре и прочности коренных пород. Менее прочные пласты легче размываются, так что в конце концов положение и направление реки могут заметно отклониться от первоначального консеквентного курса. Реки, течение которых перестраивается таким образом, называются *субсеквентными* (рис. 13.13, *б*).

Хотя кажется, что для рек горы должны быть непреодолимым препятствием, в настоящее время многие реки прорезают главные горные хребты земного шара. Реки могут прорезать прочные породы, выходящие на поверхность в виде смятых в складки или наклонных слоев, тремя способами. Первый способ – образование *антецедентной реки*, т. е. реки, долина которой сформировалась до воздымания структуры и которая размывает поднятие с той же скоростью, с какой оно растет на ее пути (рис. 13.14). Примером может служить река Колумбия в ущелье, пересекающем Каскадные горы. Такое же происхождение предполагалось, но не было доказано для Большого каньона реки Колорадо.

Другой способ – образование *эпигенетической* (*наложенной*) *реки* (рис. 13.15). Это река, которая закладывается на эрозионной поверхности или на чехле осадков, некогда перекрывавших тектонические структуры, и затем врезается вниз, в наклонно залегающие породы и пропиливает их. Благодаря размыву притоками прочные породы выделяются в рельефе в виде хребтов, через которые продолжает течь главная река. Считают, что участки рек Гудзон, Делавэр, Саскуэханна

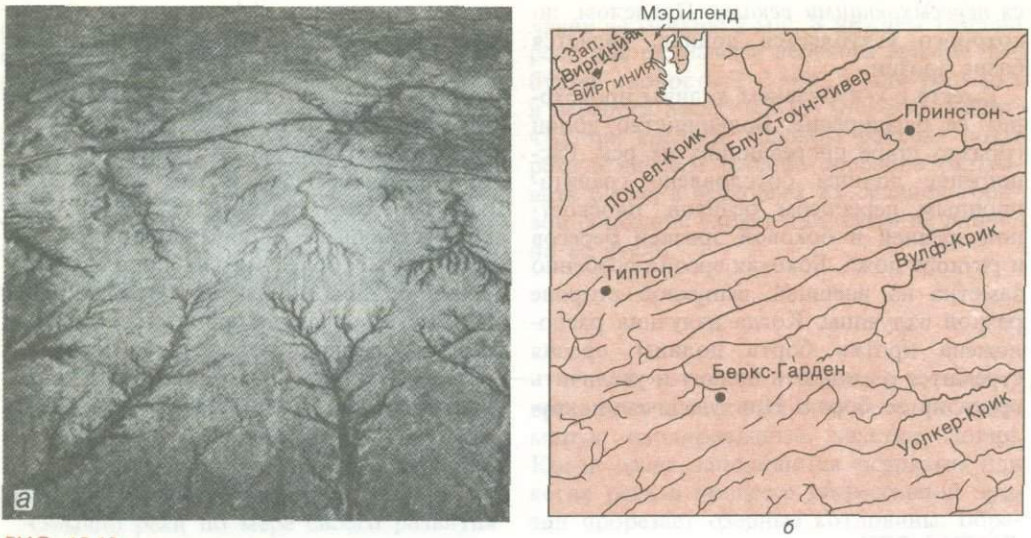


РИС. 13.13

а – консеквентные реки, образующие древовидный рисунок гидросети в Центральной Африке. Такая картина характерна для областей, сложенных горизонтальными слоями осадочных пород или однородными массивными кристаллическими породами, где направление рек и эрозия не контролируются никакими факторами; *б* – субсеквентные реки, образующие рисунок контролируемой гидросети, в данном случае угловатой, характерны для зрелой стадии развития области, где слои смяты в складки или наклонены и обладают разной прочностью. Такое расположение рек напоминает решетку.

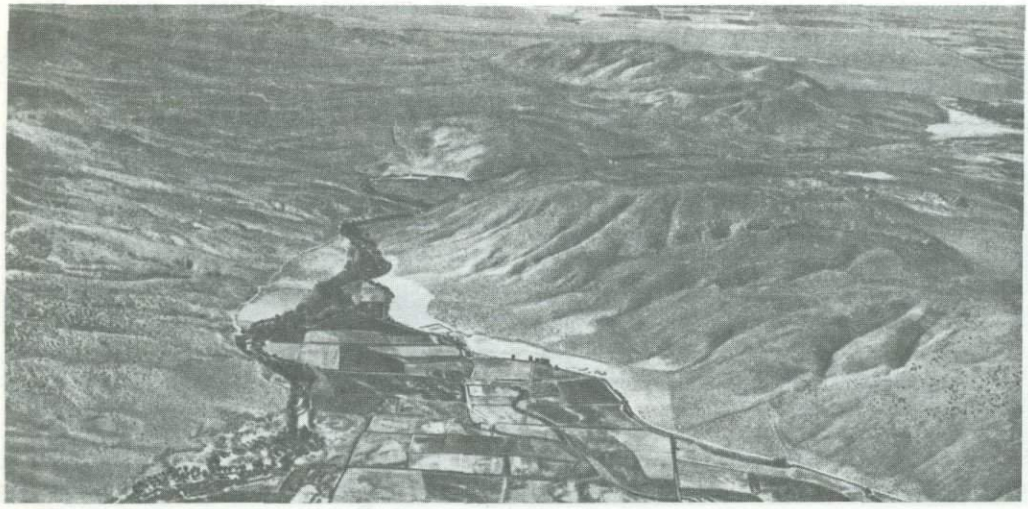


РИС. 13.14

Река Карсон в шт. Невада – антецедентная река, текущая по открытой плоской долине (вид с севера), а затем прорезающая ущелье в хребте Прайсон-Хилл (на снимке справа). (Фотография компании «Спенс эйр фотос».)



РИС. 13.15

Гора Сплит-Маунтин (вид сверху). На снимке видна почти симметричная антиклинальная складка, прорезанная рекой Грин-Ривер, которая врезалась в складку из существовавшего прежде осадочного чехла. (Фотография Хола Румеля.)

(рис. 13.16) и Потомак имеют в Аппалачах наложенный характер: они врéзались в них из некогда перекрывавшего их осадочного чехла, который впоследствии был размыт. Многие реки в Скалистых горах, в том числе Биг-Хорн, Мадисон, Платт, Арканзас, Грин-Ривер и Снейк, наложены на горные хребты и образуют пересекающие их грандиозные каньоны.

Третий, реже всего встречающийся способ пропиливания прочных пород – это *перехват* другой реки («пиратство»). Так как реки расширяют и видоизменяют свои водосборные бассейны, может произойти перехват одной реки другой в том случае, когда река врезается в обратном направлении – вверх по течению (за счет роста ее притоков к верховьям) и в конце концов захватывает часть верховьев другой реки, находящейся за водоразделом. Тогда говорят, что река, водосборный бассейн которой перехвачен другой рекой, «обезглавлена» рекой-перехватчиком (рис. 13.17). Следовательно, река-перехватчик «крадет» долину, пересекающую хребет, у другой, возможно наложенной, реки. Следующие условия могут привести к тому, что у данной реки эрозия будет



РИС. 13.16

Наложенная река Саскуэханна, которая течет по срезанным эрозией складкам вблизи города Гаррисберг, шт. Пенсильвания. (По Д. У. Джонсону.)

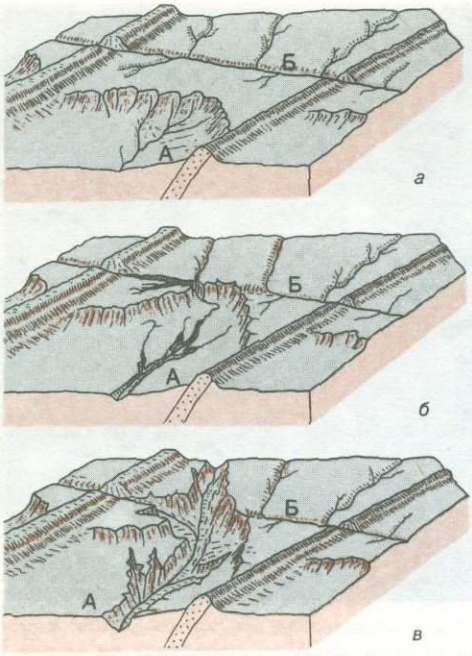


РИС. 13.17
Схема перехвата реки. *а* – конкурирующие притоки реки *А* быстро продвигаются к долине реки *Б* с помощью регрессивной (попятной) эрозии; *б* – река *Б* обезглавлена, или перехвачена, и вода из ее верховьев поступает в реку-перехватчик *А*; *в* – долина реки *А* стала шире и глубже. (По У.М. Дейвису.)

идти быстрее, чем у соседней реки: бóльшая полноводность, менее прочные породы, в которых река вырабатывает свое русло, и более крутой уклон, обусловленный меньшим расстоянием до моря.

Если река течет в теснине или ущелье и верховья ее перехвачены другой рекой, то ущелье становится *сухим*, или *покинутым*. В Аппалачах сухие ущелья встречаются часто. Они служили проходами через горы для первых поселенцев, пробиравшихся в шт. Кентукки и Теннесси, и стали стратегическими пунктами во время войны между Севером и Югом.

РЕЧНАЯ СЕТЬ

Древовидная речная сеть. В результате *врезания консеквентной реки ее вновь* образованные склоны прорезаются *притоками, не зависящими от первичного* рельефа. Если направление притоков ничем не контролируется, как в областях развития горизонтально лежащих осадочных или не нарушенных разрывами и трещинами кристаллических пород, то рост реки вверх от базиса эрозии и увеличение количества притоков приводят к образованию древовидной речной сети (рис. 13.13, *а*). Такой рисунок речной сети напоминает ветви дерева или жилки на листе.

Угловатая речная сеть. Часто на *направление растущей долины влияет* простирание разрывов и трещин в коренных породах дренируемой площади. *Крупные реки и их небольшие притоки*, направляемые такими ослабленными зонами, *формируют угловатую речную сеть* (рис. 13.13, *б*). Такой рисунок гидросети особенно хорошо виден на плато Колорадо в шт. Коннектикут и Онтарио, где на больших площадях обнажаются сильно трещиноватые породы.

Рифтовые долины и грабены. В районах, где происходили крупные вертикальные и горизонтальные перемещения по разрывам, многие долины на большом протяжении следуют по зонам разрывов (рис. 13.18). Трещиноватые породы в зонах разрывов сравнительно легко размываются, а *обусловленный разрывом* рельеф может изменить направление течения

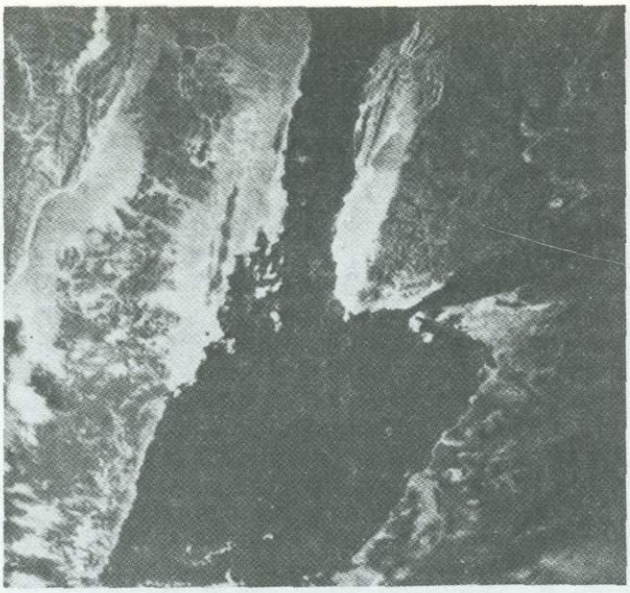


РИС. 13.18
Красное море (пересекает центр снимка) и залив Акаба (справа в центре снимка) – понижения в рельефе, которые определяются разрывами. Расположенный между ними Синайский полуостров имеет *почти меридиональное* простирание. Блок в нижней правой части снимка перемещался в направлении северо-северо-восток вдоль рифта Акаба – Мертвое море, расширяя таким образом южную часть Красного моря в раннюю стадию разрастания океанического дна. (Фотография НАСА.)

рек. В отдельных местах длинные узкие блоки земной коры опустились и образовали долиноподобные впадины, или грабены, которые могут быть заняты реками. *Примерами могут служить долина* реки Иордан и впадина Мертвого моря. Такую же сбросово-глыбовую природу имеют долина Оуэнс на востоке шт. Калифорния и несколько долин на юго-*западе США*.

Формирование меандр. Русла рек редко бывают прямыми; как правило, они образуют серии извилистых изгибов, или меандр. Такие изогнутые участки русла имеют тенденцию увеличиваться за счет размыва внешнего берега и отложения материала на внутреннем. Даже на *прямых участках рек то с одной*, то с другой стороны русла намываются отмели, что заставляет реку меандрировать (рис. 13.19). Форма русла в поперечном сечении через излучину асимметрична, *и наибольшая глубина наблюдается* у внешнего берега. Размеры меандр пропорциональны величине реки. Меандры располагаются в пределах меандрового пояса, который может быть в 8–18 раз шире самой реки (рис. 13.20). Меандры развиваются на площадях, сложенных осадками любой размерности, но у рек, берега которых сложены породами с высоким содержанием алеврита и глины, наблюдаются самые крутые меандры.

На внутренней стороне излучины обычно формируются отложения, которые *называются прирусловой отмелью* (рис. 13.21А, 13.21Б). Главный поток быстро размывает внешний берег, и более грубый материал откладывается в медленнее текущей воде на внутренней стороне *излучины*.

Однажды начав формироваться, меандры увеличиваются и приобретают бóльшую кривизну до тех пор, пока не образуется серия петель, разделенных узкими перешейками (шейками меандр). В конце концов река может прорезать узкую шейку между двумя петлями и покинуть *часть своего прежнего русла*. Когда это происходит, река становится короче, и снова начинается рост излучин. Осадки, накапливающиеся рядом с главным руслом у концов покинутой меандры, *закупоривают оба ее конца, и образуется старица* (рис. 13.19, 13.20, 13.22).

Отсечение меандр и спрямление русел происходит на активных реках каждые несколько лет. Такие изменения русла современной Миссисипи (рис. 13.22) в некоторых местах предотвращались строительством защитных насыпей, стоимость которых доходила до 1 млн. долл. за ки-



РИС. 13.19

Меандры и старицы на реке Маджетик-Ривер на севере провинции Саскачеван в Канаде. На пойме заметны изгибы прежних русел (Канадская государственная библиотека аэрофотоснимков.)



РИС. 13.20

Стадии срезания старых и развития новых меандр. (По А. К. Лобеку, 1939.)

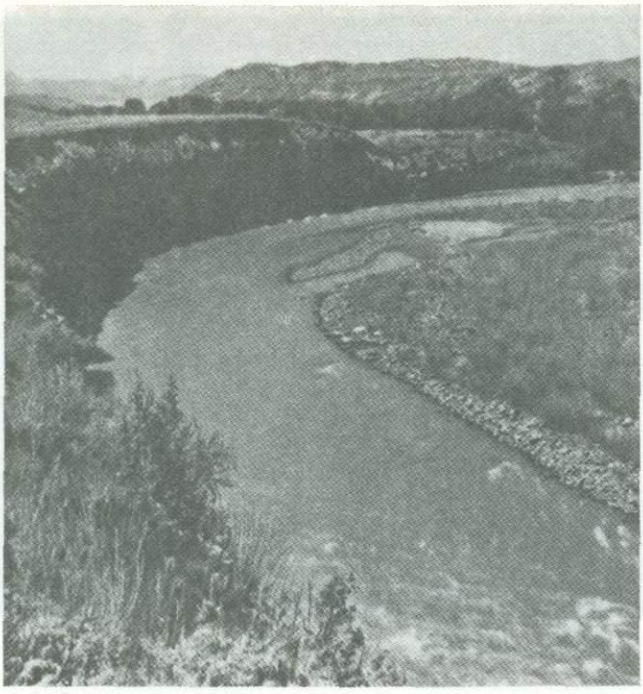


РИС. 13.21А
Прирусловая отмель и тонкий поверхностный слой гальки на реке Грейбулл в шт. Вайоминг. (Фотография Р. К. Фанстока.)



РИС. 13.21Б
Серия прирусловых отмелей, развитых вдоль реки Огайо на границе шт. Индиана и Кентукки. Течение реки на снимке — справа налево. (Фотография Геологической службы США.)

лометр. В других местах меандры отсекали, прокладывая искусственные выемки.

Марк Твен в 1883 г. так описывал срезание меандр, которое изменяло длину Миссисипи:

«... длина Миссисипи между Каиром и Новым Орлеаном сто семьдесят семь лет тому назад была тысяча двести пятьдесят миль. После прорыва 1722 года длина стала тысяча сто восемьдесят миль. Когда образовался рукав у Американской излучины, длина стала тысяча сорок миль. С тех пор река укоротилась еще на шестьдесят семь миль. Следовательно, сейчас ее длина всего девятьсот семьдесят три мили. За сто семьдесят

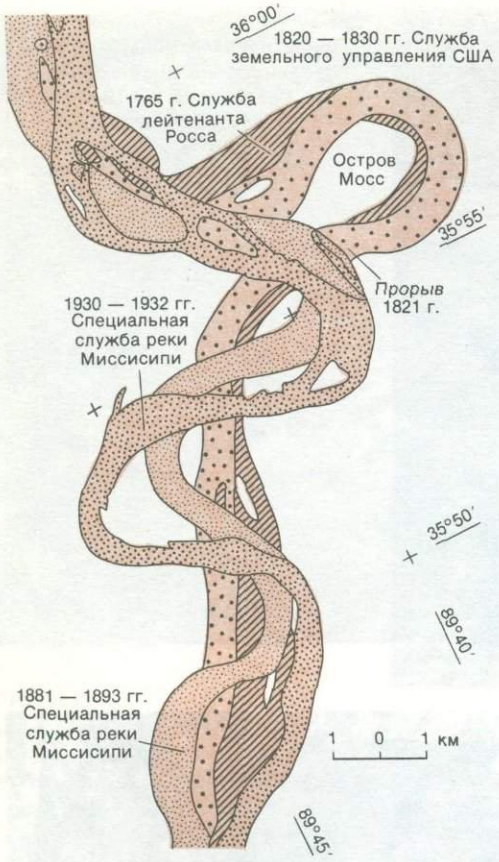


РИС. 13.22

Постепенные изменения русла реки Миссисипи выше города Мемфиса, которые произошли более чем за 150 лет. На схеме видны меандры и меандровый пояс на пойме главной реки. (По материалам Инженерного корпуса сухопутных сил США.)

шесть лет Нижняя Миссисипи укоротилась на двести сорок две мили, то есть в среднем примерно на милю и одну треть в год. Отсюда всякий спокойно рассуждающий человек, если только он не слепой и не совсем идиот, сможет усмотреть, что в древнюю силурийскую эпоху, с которой в ноябре будущего года минет ровно миллион лет, Нижняя Миссисипи имела свыше миллиона трехсот тысяч миль в длину и тянулась через Мексиканский залив наподобие удочки. Исходя из тех же данных, каждый легко поймет, что через семьсот сорок два года Нижняя Миссисипи будет иметь только одну и три четверти мили в длину, а улицы Каира и Нового Орлеана – сольются, и будут эти два города жить да поживать, управляемые одним мэром и выбирая общий городской совет. Все-таки в науке есть что-то захватывающее. Дело пустяковое – количество фактов, а берешь колоссальный дивиденд в виде умозаключений. Да еще и с процентами»[1].

Такая живость воображения, как у Марка Твена, часто охлаждается научной информацией. С 1765 г. естественное срезание меандр произошло 19 раз, и Миссисипи укоротилась в общем на 415 км. Однако длина реки между Каиром и Батон-Ружем составляла приблизительно 1400 км в 1765 г., 1500 км в 1825 г., 1350 км в 1882 г. и 1410 км в 1930 г. Очевидно, укорачивание не единственный активный процесс, река также удлинялась, разрабатывая все существующие излучины.

Разветвленные русла. Реки с быстрым течением способны не только переносить большое количество песка и более грубого материала, но также интенсивно размывать свои берега. Если берега обруши-

[1] Перевод Р. Райт-Ковалевой. – *Прим. ред.*

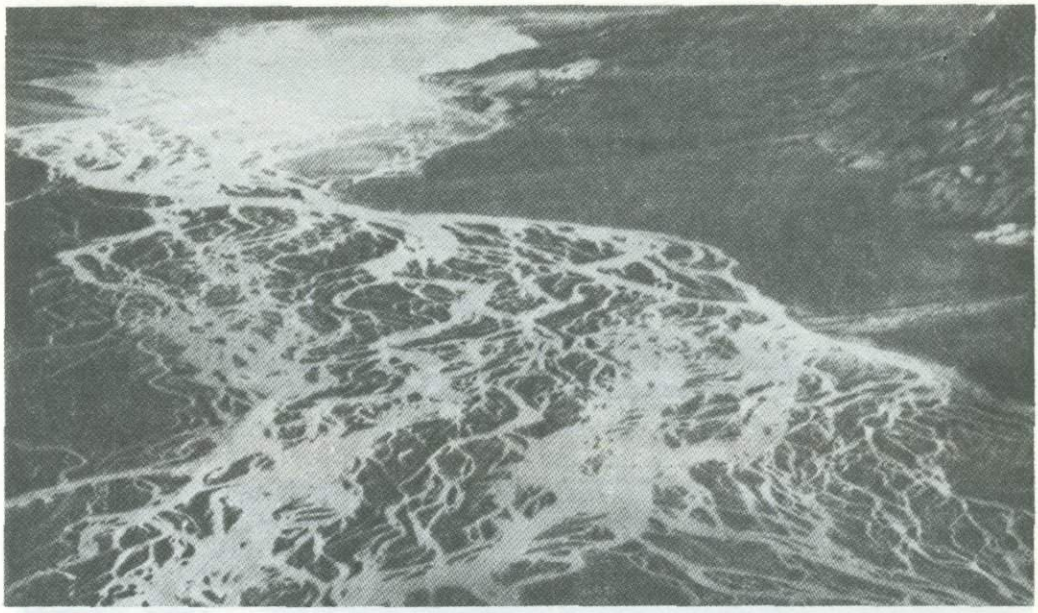


РИС. 13.23
Схема ветвления реки Слимс-Ривер на территории Юкон в Канаде. (Фотография У. Э. Вуда.)

ваются или ложе реки целиком заносится осадками, то формируется широкое плоское русло, в котором многочисленные песчаные отмели то и дело изменяют направление потока. Таким образом, при низкой воде река течет не по единственному руслу, а по множеству то разделяющихся, то сливающихся друг с другом проток (рис. 13.23). Эти русла вместе с отмелями, которые их разделяют, непрерывно меняют свое положение, образуя сеть из множества переплетенных русел. Такая картина чаще всего наблюдается в реках, откладывающих материал, но встречается и в реках, находящихся в стадии врезания или в относительном равновесии. Реки с разветвленными руслами имеют широкое и мелкое поперечное сечение.

Такие реки обычны там, где речная вода быстро испаряется, просачивается в грунт или отводится для орошения. Эти условия не влияют на полноводность реки только во время половодья. Одной из подобных рек является река Платт в шт. Небраска, которая течет по широкой, достигающей 1 км аллювиальной долине. Бóльшую часть года незначительное количество воды струится по серии переплетающихся русел, которые во время каждого паводка меняют свое положение.

Разветвляются русла и многих ледниковых рек. Во время максимального таяния льда картина течения быстро меняется. Перестройка может произойти за считанные минуты, так как флуктуации режима течения и небольшие изменения высоты речного ложа, обусловленные эрозией и аккумуляцией, позволяют воде возвращаться в кое-какие старые русла и покидать существующие (рис. 13.24). В течение июля 1959 г., когда были сделаны фотографии, приведенные на рис. 13.24, со дна долины река вынесла слой обломочного материала мощностью в среднем 15 см.

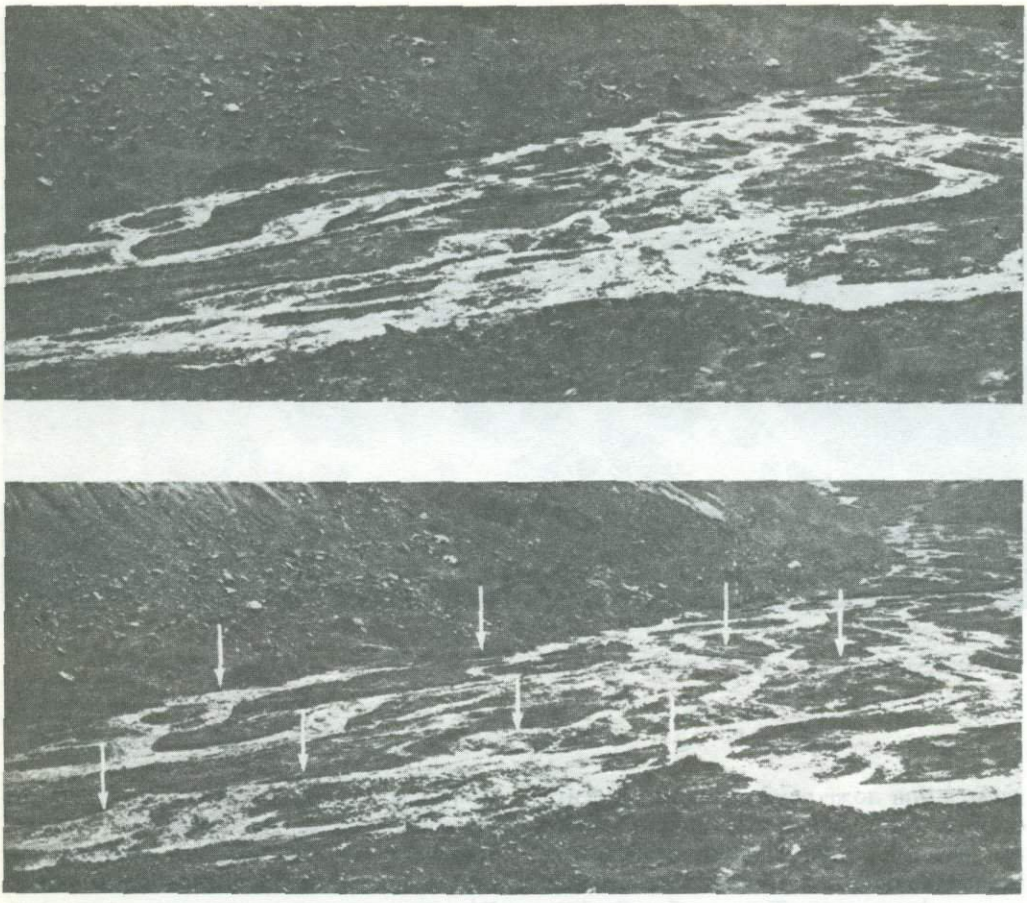


РИС. 13.24

Изменения ветвящегося русла реки Уайт-Ривер, национальный парк Маунт-Рейнир, шт. Вашингтон, 18 июля 1958 г. Верхний снимок сделан в час дня, нижний снимок – в два часа дня. Расход воды достигал примерно 10 $м^3/с$. Стрелками показаны новые русла, которые образовались после того, как был сделан первый снимок. (Фотография из журнала U.S. Geological Survey Prof. Paper 422A.)

ЭРОЗИОННЫЕ ФОРМЫ РЕЛЬЕФА

Столовые горы и останцы. В областях, где горизонтально залегающие пласты прочных осадочных пород, галечниковые террасы или лавовые потоки перекрывают мягкие глины или слабо уплотненные осадки, регрессивная (попятная) эрозия притоков вырезает в рельефе изолированные возвышенности с плоскими вершинами, которые называются столовыми горами или месами. Плоская вершина столовой горы образована прочным слоем, который защищает более мягкие слои, лежащие под ним. Останцы представляют собой небольшие изолированные холмы; некоторые из них остались от существовавших прежде столовых гор.

Бедленд – это топографический термин, который используется для обозначения обширной системы оврагов, чаще всего образующихся на относительно мягких слабо сцементированных горизонтальных

или полого наклоненных слоях алевритов или глин (рис. 13.25). Бедленды хорошо развиты на северо-западе Великих равнин в США и Канаде, особенно на территории Северной и Южной Дакоты. Для формирования бедлендов благоприятен полуаридный климат, при котором все годовое количество осадков выпадает в виде нескольких сильных ливней. В районах с сухим климатом развитию оврагов способствует отсутствие растительности на склонах, открытых вследствие этого действию русловой эрозии.

Куэсты и гряды. На полого наклоненных слоях горных пород образуются асимметричные хребты с крутыми эрозионными уступами, секущими слоистость вкрест простирания на одной стороне хребта, и длинным пологим склоном, параллельным напластованию, на другой стороне. Там, где угол падения пластов равен 30° и больше, формирующийся хребет, который называют грядой, имеет с обеих сторон одинаково крутые склоны (рис. 13.26).

Водопады и пороги. Водопады и пороги по форме никак не различаются; крутые пороги часто называют водопадами. Если на разных участках русла эрозия происходит с разной скоростью, то в более крепких породах всегда образуются пороги и водопады. Форма и развитие водопада зависят от того, как лежат прочные породы – горизонтально, наклонно или вертикально.

Прекрасным примером водопада, который низвергается с уступа, сложенного крепкими породами, является Ниагарский водопад (рис. 13.27А). Этот огромный водопад обрушивается с высоты 55 м с бронирующего пласта доломита мощностью 25 м, который перекрывает мягкие глинистые породы. Водопадом прорезано узкое ущелье глубиной 65 м ниже уровня воды в месте ее падения, так что общая глубина ущелья от верхнего края водопада до дна реки равна примерно 120 м (рис. 13.27Б). По мере того как масса низвергающейся воды и турбулентное течение у основания водопада разрыхляют слабые глинистые породы, последние вымываются из-под бронирующего пласта доломитов. Затем крупные глыбы породы периодически отламываются и падают в котел под водопадом. Метр за метром водопад отступал вверх по течению реки и сместился в общем примерно на 12 км от Ниагарского уступа, который находился в 13 км к югу от озера Онтарио. Согласно проводимым время от времени измерениям, средняя скорость отступания Ниагарского водопада с 1875 г. составляет приблизительно 1 м в год (рис. 13.27Б).



РИС. 13.25

Бедленд, образовавшийся в результате плоскостной эрозии и формирования оврагов возле города Скотсблафф в шт. Небраска. В областях с полуаридным климатом бедленды развиваются, когда овражная сеть врезается в слабо сцементированные осадки с разной прочностью. (Фотография Дартона, Геологическая служба США.)

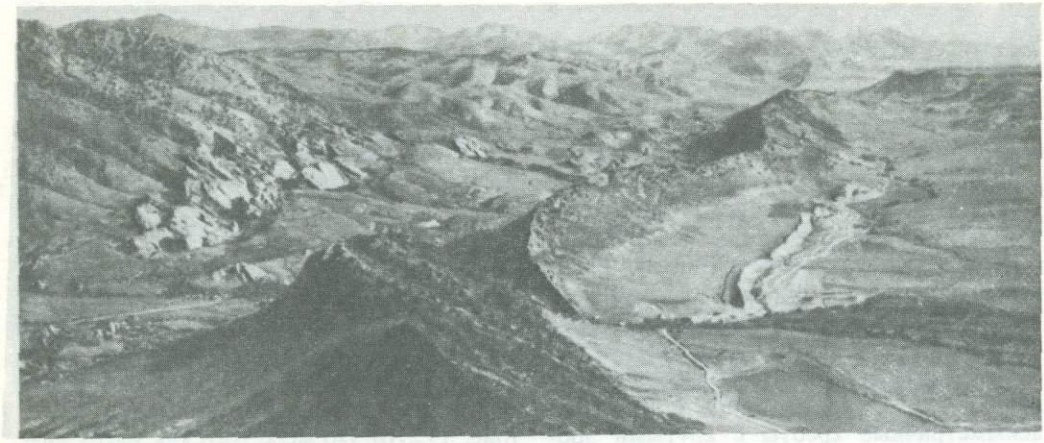


РИС. 13.26

Гряды, образовавшиеся в результате избирательной эрозии наклонных пластов с неодинаковой прочностью вдоль фронта Скалистых гор вблизи города Моррисон, шт. Колорадо. В отличие от куэст гряды развиваются там, где слои падают гораздо круче. Поэтому оба склона гряды имеют почти одинаковый наклон. (Фотография Ловеринга, Геологическая служба США.)

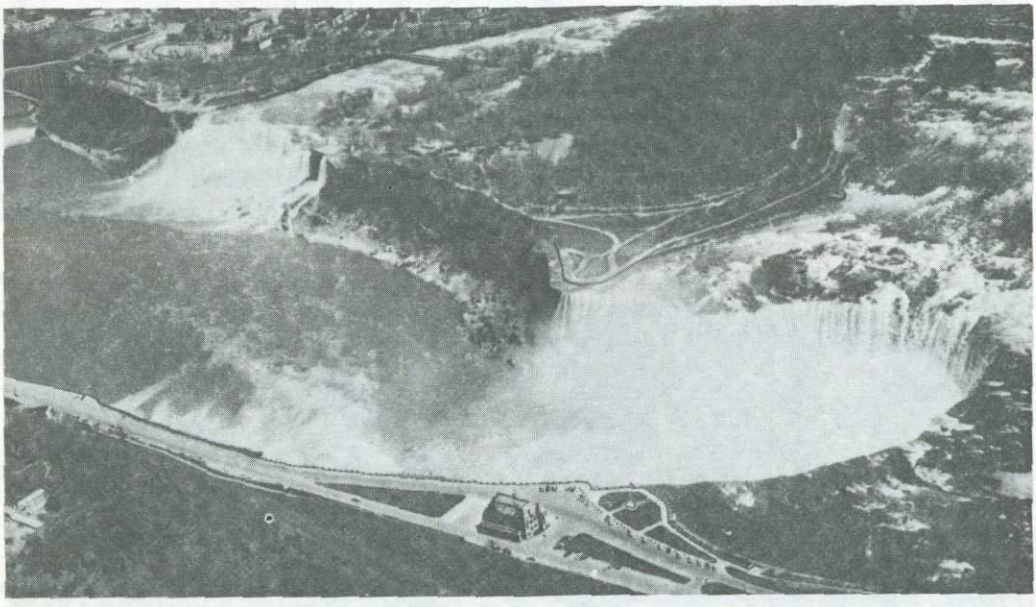


РИС. 13.27А

Ниагарский водопад, снимок с воздуха. Падение реки начинается с серии порогов у верхней оконечности острова Гоут-Айленд («Козий остров») (вверху в центре снимка), и в конце концов река низвергается с обрыва, сложенного доломитами. Больший объем воды проходит через канадскую часть водопада (справа на снимке). Крепкие доломиты защищают более слабые глинистые породы. Водопад отступает вследствие того, что глинистые породы вымываются из-под доломитов. Обратите внимание на обвалившиеся глыбы доломитов. (Фотография Корпорации фотографических служб.)

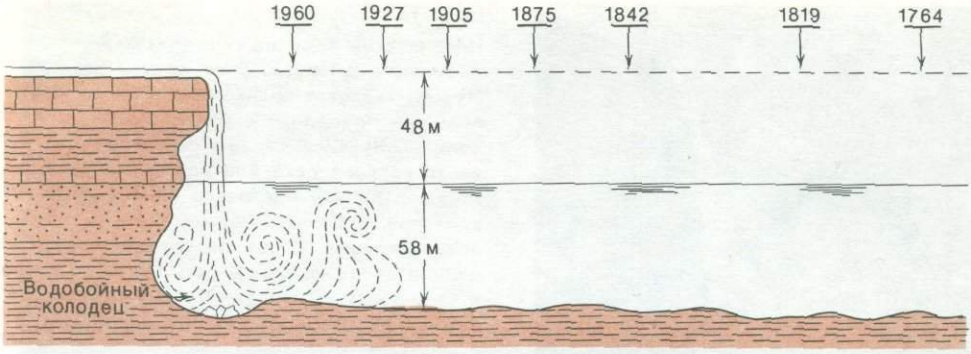


РИС. 13.27Б
Канадская часть Ниагарского водопада и отступание последнего почти за 280 лет. (По Гилберту.)

В случае Йеллоустонского водопада вертикальная дайка крепких пород сечет более податливые породы, в которых река Йеллоустон прорезала живописный каньон (рис. 13.28). Водопады такого типа не могут отступать, так как более мягкий материал, находящийся выше по течению, может размываться не быстрее, чем вода пропиливает находящиеся впереди него крепкие породы.

Водопады часто образуются в горных долинах ледникового происхождения. Там, где долины главных рек благодаря существовавшим прежде ледникам эродированы глубже, чем долины их притоков, вода из висячих боковых долин падает в главную долину с крутых обрывов. Йосемитский водопад в шт. Калифорния обрушивается с гранитной скалы в углубленную ледником долину реки Мерсед сначала с высоты 475 м (рис. 13.29). Затем вода низвергается каскадом по крутым уступам еще примерно на 260 м и, наконец, падает с вертикальной скалы высотой свыше 110 м на дно долины. Точно так же образовались многочисленные водопады на притоках в районе озера Фингер в шт. Нью-Йорк.

Несколько водопадов и порогов сосредоточены по краю географической области Пидмонт на востоке США. Крепкие породы Пидмонта на востоке окайм-

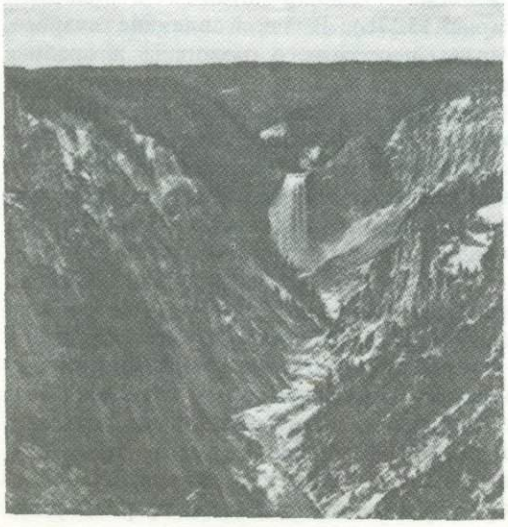


РИС. 13.28
Нижние водопады и Большой каньон на реке Йеллоустон, Йеллоустонский национальный парк. Уступ, с которого обрушивается водопад, образован вертикальной дайкой крепких невыветрелых пород, а ниже по течению река размывает сравнительно слабые породы, которые в прошлом под действием пара и горячей воды изменились и стали мягкими. Водопады такого типа не могут отступить на большое расстояние, так как ниша под водопадом не образуется и врезание должно происходить сверху вниз. (Фотография Барлингтонской северной железной дороги.)



РИС. 13.29
Йосемитский водопад, Йосемитский национальный парк. Этот приток реки Мерсед является подвешенным благодаря прочным породам и вытекает из висячей долины. Висячие долины формируются, когда главная река или ледник углубляют главную долину настолько ниже уровня притоков, что они оказываются подвешенными. В данном случае главная долина стала глубже в результате действия и реки Мерсед, и ледника. (Фотография Южно-Тихоокеанской железной дороги.)

ляются осадками прибрежных равнин, представленными довольно слабо сцементированными песками и глинами. На реках, текущих с Аппалачей к Атлантическому океану, вдоль линии контакта этих столь различных пород образуются пороги и водопады. Из-за того что здесь в сравнительно узкой полосе имеется много водопадов, ее называют линией или поясом водопадов.

Некоторые пороги обязаны своим происхождением исключительным условиям. Иногда они образуются там, где на дне долины возникают преграды в результате сгруживания материала оползней, ледников, боковых притоков и потоков лавы. В Большом каньоне на реке Колорадо пороги возникли возле устьев ее притоков, куда пересыхающие потоки с крутым уклоном русел принесли во время половодья огромные валуны.

Водобойные колодцы и котлы. Падающая масса воды и взвешенный в ней осадочный материал обычно вырывают у основания водопада впадину, которая называется водобойным колодцем (рис. 13.27Б). В такой впадине старого, ныне пересохшего водопада в районе Драй-Фолс в Большом сухом русле ниже города Гранд-Кули, шт. Вашингтон, образовалось озеро Фол-Лейк (рис. 13.30). Если водопад отступает, то водобойный колодец разрастается вверх по течению реки, удлиняя таким образом долину каньонообразной формы.

Там, где переносимый водой материал вращается в водоворотах, он стремится выточить в коренных породах дна долины возле порогов или у основания водопадов округлые или котлообразные углубления. Они называются котлами (рис. 13.31). Скорость, с которой эти котлы углубляются, увеличивается в период высокой воды, когда скорость тече-



РИС. 13.30

Часть бывшего водопада Драй-Фолс («Сухой водопад») около города Гранд-Кули, шт. Вашингтон, высотой почти 150 м и шириной около 5 км. Размеры показывают, что этот водопад был значительно выше и шире Ниагарского. Вверху слева – озеро Фол-Лейк, водобойный колодец глубиной 25 м и длиной 2 км. В верхней правой части снимка, под уступом, – озеро Грин-Лейк, другой водобойный колодец. Эти особенности рельефа сформировались, когда вздувшаяся река Колумбия в результате катастрофического прорыва подпруженного ледником озера Миссоула в шт. Монтана потекла по нынешнему Большому сухому руслу. (Фотография компании «Спенс эйр фотос».)

ния и турбулентность движения воды максимальны. Некоторые котлы имеют спиральную форму, их диаметр внизу больше, чем вверху. Они могут формироваться в твердых магматических породах, например в гранитах или базальтах, или в более мягких осадочных породах, например в известняках или глинистых сланцах. Ширина котлов меняется от нескольких сантиметров до нескольких метров, так же изменчива и их глубина. Один из самых больших котлов в национальном парке Интерстейт у водопада Тейлорс-Фолс в шт. Миннесота диаметром 6 м и глубиной 17 м образован в твердых базальтах; сначала в нем находилось несколько кубометров хорошо окатанной гальки.

Каменные мосты. Каменный мост, или арка, может образоваться несколькими способами. При глубоко врезанных речных меандрах река посредством боковой эрозии скальных стенок может подрезать перемычку между меандрами на уровне воды. Если этот процесс идет с обеих сторон и продолжается до тех пор, пока река не пропилит перемычку насквозь и не потечет через образовавшееся отверстие, то над рекой сохранится арка из пород в виде моста. Именно так возник знаменитый каменный мост Рейнбоу в округе Сан-Хуан, шт. Юта (рис. 13.32).

Если породы речного ложа выше водопада разбиты трещинами, то часть воды может просачиваться сначала по трещинам, а затем по поверхности напластования до тех пор, пока она не вольется в главное русло ниже водопада или позади образованной им водяной завесы, как происходит у водопада Трик-Фолс в национальном парке Глейшер-Бей в шт. Монтана. Трещины, по которым просачивается вода, могут расширяться, и в конце концов весь поток потечет через них; тогда прежний уступ водопада станет естественным каменным мостом.

Ряд других каменных мостов сформировался за счет неполного обрушения кровли лавовых трубок и пещер, в результате волновой эрозии и истирания песком с помощью ветра, под действием избирательного выветривания.



РИС. 13.31
Естественные котлы на дне реки Саскуэханны у водопада Коневаго-Фолс в шт. Пенсильвания, обнажившиеся в 1947 г., когда уровень воды в реке был необычайно низким. Эти необыкновенные ямы были выточены обломками, вращавшимися в водоворотах *под порогами при* высоком уровне воды. (Фотография из журнала Lancaster Intelligence Journal.)



РИС. 13.32
Естественный каменный мост Рейнбоу («Радуга») на юге шт. Юта. Этот мост высотой 93 м образовался вследствие того, что река проточила насквозь узкую перемычку одной из своих врезанных меандр, после чего остался прочный слой песчаника, соединяющий борта ущелья, имеющего ширину 82 м. (Фотография Службы национальных парков.)

РЕЧНЫЕ ОСАДКИ

Главными причинами того, что реки откладывают осадочный материал, являются уменьшение скорости течения и расхода воды и увеличение поперечного сечения потока. Отложение материала происходит во многих местах, но главным образом в устьях рек, у основания крутых склонов, в руслах или рядом с ними и на поймах. Рассмотрим основные формы рельефа, которые при этом образуются.

Дельты. Там, где река, несущая осадочный материал, впадает в водоем со спокойной водой, например в озеро или в океан, ее течение замедляется, и происходит отложение осадков. Если эти отложения не перемещаются прибрежными или приливно-отливными течениями, то они формируют дельту, которая носит такое название потому, что по форме напоминает греческую букву Δ. Когда речной поток достигает относительно спокойной воды, основная масса более грубых осадков откладывается, а тонкий алевритовый и глинистый материал выносится дальше. Речная вода имеет тенденцию держаться на поверхности более плотной соленой морской воды, пока не смешается с ней. Когда пресная и соленая воды смешиваются, соли морской воды заставляют мельчайшие глинистые частицы коагулировать, образуя хлопья, достаточно крупные для того, чтобы выпасть в осадок.

На рис. 13.33 показано последовательное формирование серии дельт и рукавов на реке Миссисипи. Когда река образует новые протоки и покидает старые, в районе дельты в виде озер остается много покрытых водой участков. Одно из самых известных озер такого типа – озеро Понтчаррейн.

В отложениях дельты присутствуют все обычные аллювиальные фации и, кроме того, осадки, сформировавшиеся под влиянием особых условий, существовавших в озере или океане, где происходило отложение. Уровень воды в океанах и озерах может изменяться вследствие приливов и отливов и сезонных колебаний стока. Значительные приливно-отливные колебания уровня воды могут сильно повлиять на форму дельты, разнося осадки на десятки километров от устья реки. Дельты рек, впадающих в залив Кука на Аляске, где достаточно велики приливно-отливные колебания, по своей форме и фациям коренным образом отличаются от дельт Нила и Миссисипи.

Размер, форма, расположение и ориентировка океана или озера оказывают решающее влияние на величину и характер волн, которые перерабатывают отложения речных дельт. Сильные волны, приливы и отливы или прибрежные течения могут перераспределять приносимый реками материал вдоль берега и таким образом препятствовать формированию обширной дельты, которая бы заметно выступала за береговую линию, что и происходит, например, с общей дельтой рек Колорадо и Бразос в шт. Техас. Чаще волны и течения перерабатывают только часть дельтового материала, перераспределяя его неподалеку и заполняя пространство между рукавами реки. В процессе переработки алевритовые и глинистые частицы отсортировываются и выносятся в более глубоководные области, а материал с частицами крупнее алевритовой размерности откладывается на окраине дельты. По расположению в древней дельте осадков с разным размером зерен можно судить о характере как реки, так и водоема, в который она впадала.

В дельтах четко прослеживаются три типа слоистости (рис. 13.34, 13.35). Осадки поймы на поверхности дельты называются *поверхностными дельтовыми слоями*; они залегают на умеренно наклонных *осадках склона*, которые в свою очередь перекрывают полого залегающие *придонные дельтовые слои*. Переносимый рекой материал откладывается сразу же за краем передней части (фронта) дельты до тех пор, пока склон не станет слишком крутым; тогда эти передовые отложения оползают, и образуется устойчивый угол естественного откоса (20–35°). В результате такого оползания или соскальзывания материала формируются наклонные слои осадков склона дельты.

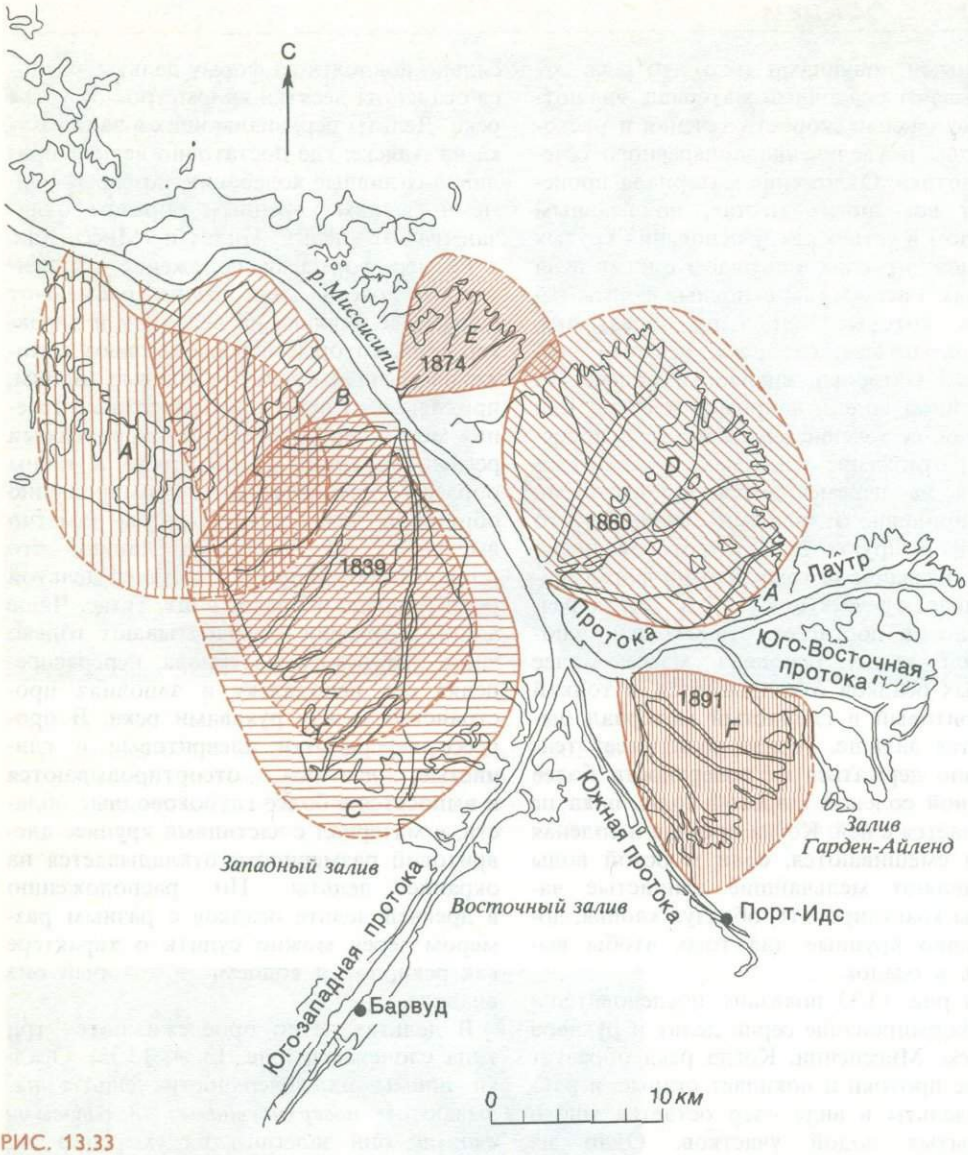


РИС. 13.33

Второстепенные дельты современной дельты реки Миссисипи, имеющей форму птичьей лапы. *A*–комплекс Драй-Сайприс-Байю; *B*–комплекс Гранд-Лайерд; *C*–комплекс Уэст-Бей; *D*–комплекс Кьюбитс-Гап; *E*–комплекс Бэптист-Коллет; *F*–комплекс Гарден-Айленд-Бей. (По Колеману и Гальяно, 1964.)

Кровля их находится примерно на высоте дна впадающей реки. Придонные дельтовые слои представлены тонкими песками, алевритовыми и глинистыми частицами, которые река приносит во взвешенном состоянии и которые оседают на дно за пределами фронта дельты. По мере того как фронт дельты продолжает надстраиваться и продвигаться вперед, осадки склона отлагаются на образовавшихся раньше придонных дельтовых слоях и со временем сами перекрываются поверхностными дельтовыми слоями пойменной равнины.



РИС. 13.34

Диаграмма, на которой показаны форма, рост и внутреннее строение дельты. Материал откладывается на фронтальном склоне дельты, образуя слои осадков склона за его пределами в виде придонных дельтовых слоев и в верхней части — в виде поверхностных дельтовых слоев. В областях, испытывающих погружение, поверхностные слои могут достигать значительной мощности. (По Штраллеру: *Strahler*, 1969, Physical Geography, 3d ed., copyright © 1951, 1960, 1969, John Wiley and Sons, Inc. Reprinted by permission.)

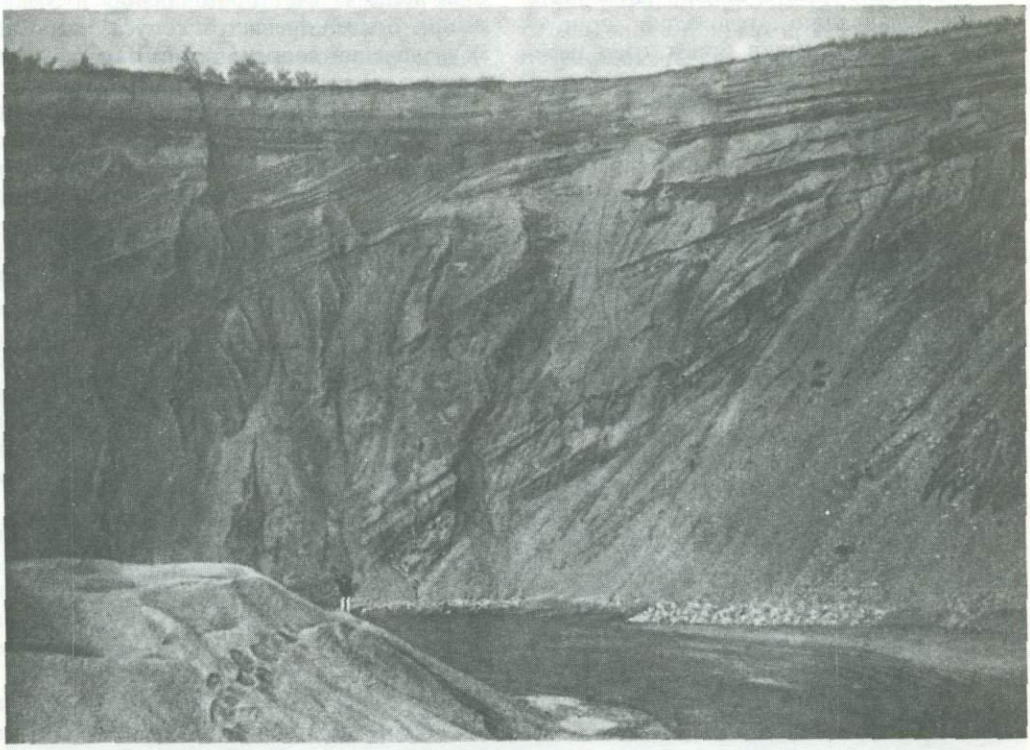


РИС. 13.35

Поверхностные и склоновые слои крупной дельты, отложившиеся в ледниковом озере Хитчкок в долине реки Коннектикут. Обратите внимание на человека, чтобы получить представление о масштабе. (Фотография Р. К. Фанстока.)

В устьях многих рек, там, где развиты крупные дельты, отмечается опускание земной коры. Накопление осадков обычно происходит с той же скоростью, что и опускание, но в некоторых древних дельтах обнаружено переслаивание морских известняков и глинистых сланцев с пресноводными осадками и почвами. Из структурных соотношений очевидно, что опускание иногда опережало накопление осадков, и тогда дельта была покрыта морем. Глубокое бурение в областях современных дельт позволило установить в них подобную же последовательность осадков. При бурении скважин до глубины 350 м у Нового Орлеана в осадках был обнаружен плавник. Опускание дельт обусловлено, во-первых, прогибанием океанического дна, на котором накапливаются отложения, и, во-вторых, уплотнением рыхлых, насыщенных водой осадков дельты.

Ископаемые дельты можно распознать по переслаиванию отложений прирусловых отмелей и валов, болот, озер, переработанных волнами песчаных отложений пляжей и склоновых и придонных дельтовых слоев.

Одно из возможных объяснений широко распространенных на Земле отложений угля в сочетании с морскими и пресноводными осадками – это существование древних дельт. Предполагается, что угли представляют собой ископаемые остатки растений, которые накапливались в заболоченных поймах. Отложение растительного материала прекращалось, когда прогибание захватывало заболоченные площади и они оказывались ниже уровня моря, и возобновлялось, когда благодаря речным наносам эти области снова становились сушей.

Аллювиальные конусы. Там, где река, несущая большое количество осадочного материала, вытекает из узкой горной долины на равнину или в долину с более широким дном, скорость ее течения резко падает и значительная часть осадков откладывается в виде веерообразного конуса (рис. 13.36). Скорость течения реки может уменьшиться в результате 1) уменьшения уклона русла, 2) уменьшения расхода воды за счет просачивания в отложения более древнего конуса выноса, 3) увеличения сопротивления потоку, так как река на конусе выноса распадается на множество расходящихся русел. Берега этих русел легко размываются, и поэтому ручьи расширяют свои русла, так что их поперечное сечение увеличивается. При

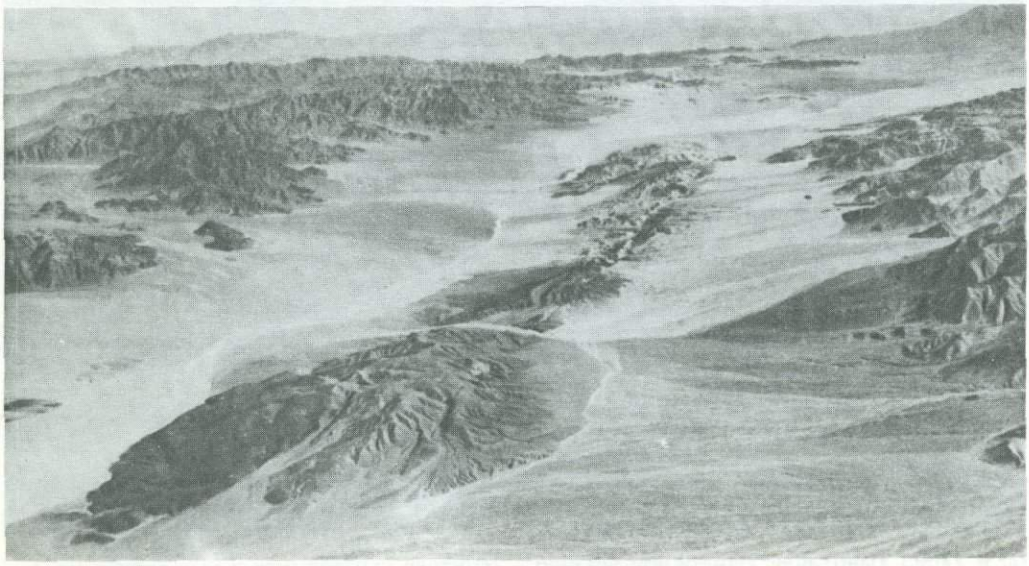


РИС. 13.36
Конусы выноса в Долине Смерти, шт. Калифорния. (Фотография компании «Спенс эйр фотос».)

формировании единичного конуса выноса может иметь значение любой из этих факторов или все они вместе. Отложения аллювиального конуса обычно имеют форму веера, и самая большая их мощность наблюдается у устья долины.

Аллювиальные конусы, как правило, целиком состоят из речных наносов, но в тех местах, где очень много глинистого и алевритового материала, значительная доля осадков таких конусов может быть получена за счет грязевых потоков, особенно в областях с полуаридным климатом. Например, в результате сильных и продолжительных гроз в 1963 г. грязевые потоки обеспечили половину того объема осадков аллювиальных конусов, который поступил в реку Шошони, шт. Вайоминг, из притоков.

В долинах, образовавшихся под действием непрерывных процессов нормальной эрозии, аллювиальных конусов не бывает. Скорее их можно обнаружить там, где в результате поднятия земной коры, образования разломов или оледенения нарушается существующее равновесие между количеством и размером зерен осадочного материала и расходом и скоростью течения воды либо же изменяется базис эрозии или уклон реки.

Предгорные аллювиальные равнины. Реки, вытекающие на одну и ту же равнину близко друг от друга, могут образовать конусы выноса, которые сольются и создадут непрерывный покров осадков у подножия горного хребта. Эту аккумуляцию называют по-разному: предгорной аллювиальной равниной, пролювиальным шлейфом, сложным аллювиальным конусом выноса или бахадой.

Отмели и русловой аллювий. Островки из наносов посередине русла, отмели между рукавами реки и обычные отложения на дне речных русел, иначе называемые прирусловыми отмелями, уже описывались на предыдущих страницах.

Поймы. Во время паводка река выходит из берегов своего обычного русла и может затопить всю долину от одного борта до другого, откладывая на затопленном дне долины тонкий алевритовый, глинистый и песчаный материал. Высота такой поймы может увеличиваться до тех пор, пока пойма не станет настолько выше обычного уровня реки, что вода будет заливать ее только во время очень больших половодий. Если долгое время происходит непрерывная боковая эрозия рекой, которая находится в состоянии равновесия, или аккумулирующая река заполняет наносами дно широкой долины, то образуется широкая пойма. Кроме того, поймы могут формироваться в результате меандрирования реки и отложения прирусловых отмелей на внутренних сторонах меандр.

Пойма Миссисипи между местом ее слияния с рекой Огайо у города Каира, шт. Иллинойс, и Мексиканским заливом имеет ширину от 80 до 100 км и длину приблизительно 1000 км. Как и большинство пойм, она с обеих сторон ограничена сравнительно крутыми бортами долины. В ряде случаев, там, где долину обрамляют непрочные, легко поддающиеся размыву породы, склоны становятся настолько пологими, что бывает трудно установить, где кончается пойма и где начинается борт долины.

Во время половодья скорость потока больше всего в глубокой воде главного русла. Вдоль края русла, там, где быстрый поток соприкасается с мелкой водой, медленно текущей по пойме, течение его значительно замедляется, что вызывает отложение более грубого материала, переносимого потоком. Таким образом, выше всего пойма надстраивается непосредственно у границ русла и постепенно понижается по направлению к бортам долины. Такая насыпь из намытого рекой материала называется *прирусловым валом или естественной дамбой*, так как она напоминает те насыпи, которые строят для ограничения разлива рек. На прирусловых валах откладываются более грубые осадки, чем на внешних частях поймы. Эти валы представляют собой низкие гряды, редко возвышающиеся над остальной поймой больше чем на 2 м. Однако некоторые прирусловые валы бывают настолько высокими, что и в половодье выступают над водой в виде длинных узких островов (рис. 13.37), которые вода обтекает с двух сторон – по главному руслу и по пойме, и только

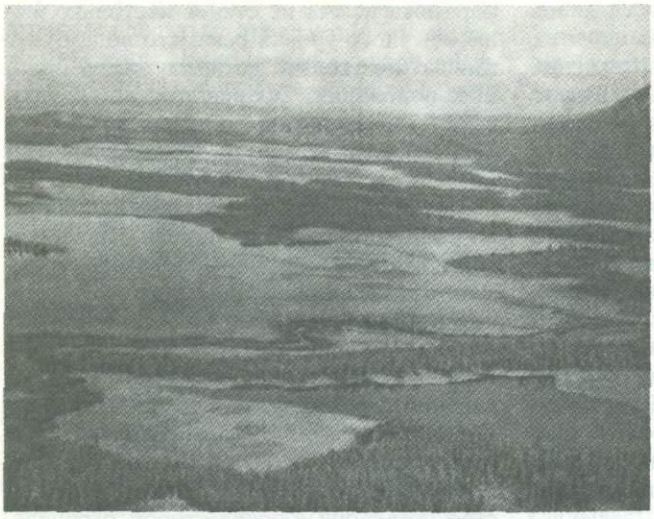


РИС. 13.37
Прирусловые валы (естественные дамбы), подчеркнутые растительностью, вдоль притока реки Ник-Ривер на Аляске. (Фотография Р. К. Фанстока.)

в особенно большие разливы они тоже заливаются водой. Во время умеренного половодья прирусловые валы защищают пойменные равнины, не давая воде выйти из берегов. При более высокой воде река может прорвать эти валы или повернуть течение вспять в притоки и таким образом *затопить соседние низменности.*

Самое разрушительное (в США.– *Ред.*) за последние десятилетия наводнение произошло в марте и апреле 1973 г. на Миссисипи. Подсчитали, что река затопила площадь в 3 млн. акров в шт. Миссисипи, 2,3 млн. акров в шт. Луизиана и 1,3 млн. акров в шт. Кентукки, Иллинойс и Миссури. Дамбы и плотины были прорваны во многих местах, целые общины вынуждены были эвакуироваться, вода затопила поля и погубила урожай. Убытки составили свыше 72 млн. долл.

На многих реках прирусловые валы так высоки, что притоки на значительном протяжении вынуждены течь параллельно главной реке, пока они смогут влиться в нее (рис. 13.38). Типичный пример этого – река Язу, которая течет параллельно Миссисипи на протяжении примерно 320 км.

Поймы и особенности их строения *формируются главным образом в результате* отложения осадков полыми водами. В противоположность этому там, где полноводная река в состоянии равновесия несет грубый гравийно-галечный материал через область, сложенную сравнительно легко размываемыми породами, может происходить боковая эрозия и *накопление на речных отмелях мощных* толщ гальки и гравия, перекрытых несколькими метрами пойменного аллювия. Общая мощность этих отложений приблизительно равна глубине реки в половодье (рис. 13.10). Поймы такого типа, по существу, представляют собой поверх-

РИС. 13.38
Прирусловые валы. Обратите внимание на то, что многие небольшие притоки на некотором расстоянии текут параллельно главной реке за ее прирусловыми валами до того, как сольются с ней. Такие притоки называются реками типа «язу», по названию реки Язу, притока Миссисипи, которая до впадения в Миссисипи на протяжении 320 км течет по восточному краю ее поймы. (По Лобеку, 1939.)

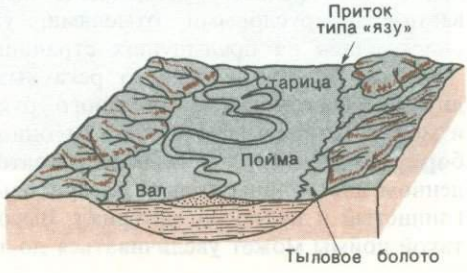




РИС. 13.39

Аллювиальные террасы в долине реки Эск, провинция Кентербери, Новая Зеландия. Прежние поймы остались в виде прерывистых ступеней наверху, когда происходило врезание субсеквентной реки. (Фотография В. К. Брауна, Новая Зеландия.)

ностный слой гальки и гравия, который залегает на коренных породах и мог образоваться при единичном отклонении реки вбок, хотя обычно река уклоняется то к одному, то к другому борту долины не один раз.

Террасы. *Аллювиальные террасы – это* остатки прежних пойм, покинутых реками, когда они углубляли свои долины и формировали новые поймы на более низких уровнях (рис. 13.39).

При определении различия между современной поймой и поймой, существовавшей прежде, или террасой, пользуются понятием «частота паводков». Полые воды затопляют пойму в среднем раз в каждые 2–5 лет, а террасу – реже или не *затопляют вовсе. Многие террасы располагаются* слишком высоко над рекой, чтобы вода заливала их хоть раз с тех *пор, как река на раннем этапе развития* долины оставила их, врезая свое русло. Например, у реки Грейбулл в шт. Вайоминг есть несколько террас высотой от 400 до 16 м и менее над ее теперешним уровнем. Обычная причина формирования речных террас – это нарушение равновесия, вызванное понижением базиса эрозии. Некоторые террасы возникли в результате изменения климата.

Террасы – нормальная особенность большинства речных долин. Многие реки прорезают аллювиальные наносы долины. *Когда долины врезаны в коренные* породы, террасы могут состоять лишь из тонкого чехла пойменных отложений и лежащих под ними коренных пород. Террасы, защищенные от размыва твердыми породами, выходящими в их основании, или выступами прочных пород со стороны течения, называются *цокольными террасами.* Если террасы развиты по обоим бортам долины и протягиваются вдоль реки на многие километры, их называют *парными или циклическими террасами* (рис. 13.40А). Они отмечают продолжительные отрезки *времени, в течение которых равновесие* реки не нарушалось.

Там, где река, вырабатывая новый профиль равновесия, быстро врезается в дно долины, на разных уровнях вдоль бортов долины могут остаться небольшие изолированные участки пойм (рис. 13.40Б),

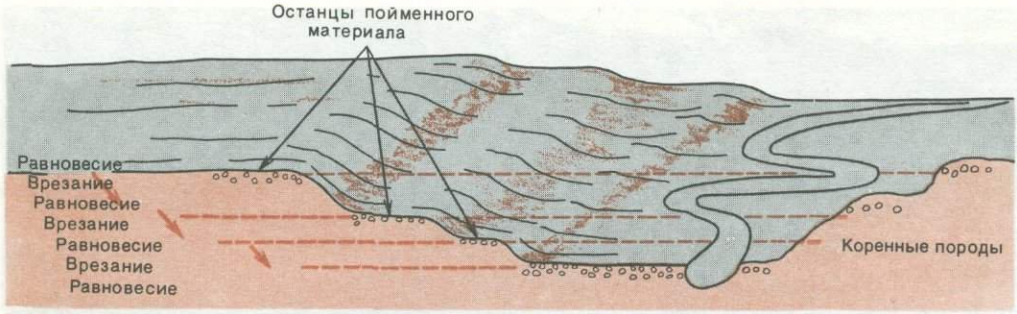


РИС. 13.40А

Парные, или циклические, террасы свидетельствуют о следовавших один за другим стабильных периодах, когда река во время врезания успевала выработать профиль равновесия. Такие террасы формируются по обоим берегам реки или на большом протяжении вдоль русла. Протяженность террас свидетельствует о боковой эрозии, которая происходила во время продолжительных пауз в развитии долины, когда уклон реки был стабильным.

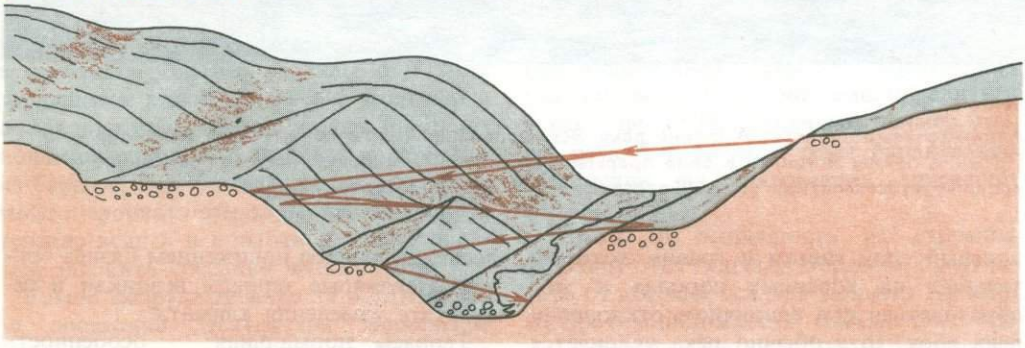


РИС. 13.40Б

Непарные, или нециклические, террасы формируются при непрерывном врезании реки. Остаются лишь небольшие участки древних пойм. В долине одной и той же реки могут быть развиты как парные, так и непарные террасы, причем непарные террасы образуются тогда, когда происходит врезание реки от одного положения равновесия к другому.

обычно не связанные между собой ни в продольном, ни в поперечном сечении долины. Эти остатки пойм представляют собой также настоящие террасы, но в отличие от циклических, или парных, террас они не соответствуют длительным стабильным периодам.

РЕКИ И ОБРАЗОВАНИЕ ОЗЕР

Реки формируют озерные впадины несколькими способами. Один из них – отложение осадков в месте слияния двух рек. Временами груз обломочного материала и транспортирующая способность главной реки и ее притока могут быть неодинаковыми. Если из притока поступает больше гравия или песка, чем способна перенести главная река, то поперек основной долины откладывается аллювиальный конус выноса, перегораживающий главный поток; в результате этого формируется озеро. Примером может служить озеро Лейк-Пепин на реке Мис-

сисипи выше устья реки Чиппева и многочисленные озера в долине реки Иллинойс.

И наоборот, благодаря значительному увеличению количества наносов главная река может так надстроить свое ложе, что оно окажется выше уровня воды в притоке; тогда аллювиальные отложения блокируют устье притока, и его долина превращается в озеро. Превосходными примерами могут служить озера в шт. Вашингтон и Айдахо к северу и востоку от города Спокан (рис. 13.41) и древние озера по притокам долин Аллегейни и Уобаш.

Вследствие отчленения меандр на речных поймах возникают старичные озера; в результате формирования естественных дамб края русла поднимаются выше соседних низменностей, и там тоже могут появиться озера. Множество озер образуется при росте дельт.

Осадочное заполнение озерных котловин. Там, где река впадает в озеро, она обычно намывает дельту. Впадины многих озер частично заполнены дельтовыми отложениями. Город Уоткинс-Глен в шт. Нью-Йорк построен на дельте в вершине озера Сенека. Эта дельта достигает почти 5 км в длину, более 1,6 км в ширину, а мощность ее равна по крайней мере 150–180 м. Город Итака в шт. Нью-Йорк занимает аналогичное положение на дельте реки, впадающей в озеро Кейюга, одного из системы озер-«пальцев» Фингер-Лейкс (рис. 13.42). Дельты, которые возвышаются над современным уровнем воды в системе озер Фингер-Лейкс, образовались, когда воды в озерах было больше, чем теперь, так как они были подпружены с севера ледниками, а с юга берегом, который тогда был выше. По направлению к северу эти дельты занимают все более высокое положение и, таким образом, свидетельствуют о восстановлении изостатического равновесия земной коры после таяния материкового льда и снятия нагрузки, обусловленной его весом.

При впадении реки в озеро могут образоваться мутьевые (турбидитные) потоки, поскольку плотность речной воды, несущей осадочный материал, выше, чем плотность воды в озере. Содержащая

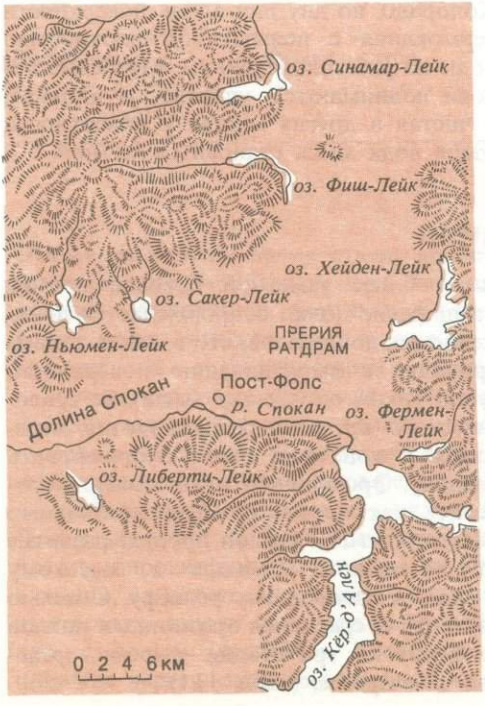


РИС. 13.41
Озеро Кёр-д'Ален и другие озера в северной части шт. Айдахо, сформировавшиеся, когда притоки были подпружены мощными ледниковыми наносами, отложившимися в главной долине. Подобное явление вызвало образование ледниковых озер, которые когда-то существовали в долине реки Аллегейни на западе шт. Нью-Йорк. (По А. К. Лобеку: A. K. Lobeck, A Popular Guide and Physiography of Allegheny State Park, New York State Museum, 1972.)

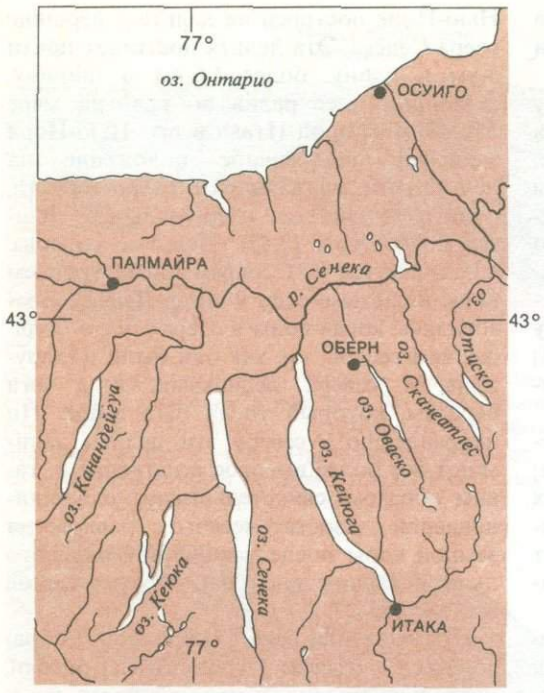


РИС. 13.42
Система озер Фингер-Лейкс (озера-«пальцы»), форма и ориентировка которых связаны с ледниковым выпахиванием существовавших прежде долин. Днища ледниковых трогов озер Сенека и Кейюга, выработанные ледниками в коренных породах, находятся ниже уровня моря.

взвешенное вещество вода погружается в озерную воду и затем течет по какой-либо подводной поверхности с еще большей плотностью; ею может быть и дно озера, и более плотный слой воды на глубине. Мутьевые потоки переносят алевритовый и глинистый материал далеко от берегов озера или водохранилища. Некоторые мутьевые потоки в озере Мид–водохранилище, образованном плотиной Гувер,–переносят алевритовый и глинистый материал, поступающий из реки Колорадо, по дну или вдоль поверхности термоклина с повышенной плотностью воды на расстояние 200 км. Мутьевые потоки поднимаются, ударяясь о плотину, и чистая в других местах у поверхности озера вода здесь становится мутной.

РЕГИОНАЛЬНЫЙ ЭРОЗИОННЫЙ ЦИКЛ

По мере того как в областях, недавно испытавших воздымание, например на прибрежных равнинах, с которых отступило море, формируется речная сеть, эрозионные процессы постепенно вызывают ряд изменений в рельефе. Эти изменения зависят от высоты поднятого участка над уровнем моря, от слагающих его пород и от их сопротивления эрозии. Водотоки усиливают контрастность рельефа, вырабатывая овраги и долины, когда потоки врезаются в направлении базиса эрозии, оставляя от первоначальной поверхности только водоразделы. Когда поток приближается к базисному уровню, становится более заметной боковая эрозия. Расширение долин сопровождается понижением водоразделов, что в конце концов приводит к выравниванию поверхности суши. Таким образом, в масштабе геологического времени речная эрозия стремится в конечном счете сформировать равнину. Эрозионный цикл можно определить как время, которое необходимо для того, чтобы регион прошел развитие от низменного рельефа к высокому и снова к низменному рельефу. С целью изучения и сравнения эрозионных циклов их делят на три стадии–*юности, зрелости* и *старости* (табл. 13.1).

Таблица 13.1

Изменения во время цикла развития реки

Характеристики реки	Стадия юности	Стадия зрелости	Стадия старости
Характер русла	Прямое	Обычны меандры	Многочисленные меандры
Градиент и скорость	Высокие	Умеренные	Низкие
Пороги и водопады	Много	Мало	Отсутствуют
Характер эрозии	Преобладает врезание	Заметная роль боковой эрозии	Боковая эрозия преобладает
Ширина долин	Узкие V-образные	Широкие, хорошо выделяются в рельефе	Очень широкие с низкими берегами
Глубина долин	Умеренно глубокие	Самые глубокие	Мелкие
Количество притоков	Мало	Максимальное количество	Мало, крупные
Характер водоразделов	Широкие, от низких до высоких	Высокие и узкие	Низкие и узкие
Рельеф	Максимальный для речной системы в целом	Максимальный в верховьях реки	Низкий
Количество озер	Много на возвышенностях	Мало, если вообще есть	Много на низменностях
Структурный контроль	Не контролируются структурами	Контролируются структурами	Слабо контролируются структурами
Транспортируемый материал	Грубый и тонкий	Заметная роль песка и алеврита	Преобладают алеврит и растворенные вещества
Речное осадконакопление	Минимальное	Отложение осадков на внутренних сторонах излучин	Отложение осадков в руслах и на прирусловых валах
Речная сеть	Развита слабо	Хорошо развита, в высшей степени действенна	Вялое дренирование

Стадия юности. Во время стадии юности реки текут по V-образным каньонам или долинам с крутыми бортами. Склоны долин круты, так как прошло еще мало времени, и гравитационный перенос и другие склоновые процессы не успели придать склонам более пологий уклон и расширить долины. Если эрозия в районе началась лишь недавно, то реки в нем немногочисленны и притоков у них мало. Поскольку у рек не было времени разработать широкие долины на всем их протяжении, от истоков до устьев, могут существовать пороги и водопады. В районах с юным рельефом преобладают широкие нерасчлененные водоразделы со слабо развитой речной сетью. На возвышенностях все еще сохраняются озера и болота.

Стадия зрелости. По мере развития эрозии происходит изменение ландшафта. Из резких прямолинейных форм юного рельефа образуются расширяющиеся кверху долины с мягко закругляющимися верхними частями склонов. Поскольку притоков становится гораздо больше и происходит регрессивная (попятная) эрозия, водоразделы сужаются и сложная сеть маленьких и больших долин расчленяет весь район. Вся поверхность целиком превращается в склоны. Это очень расчлененный рельеф (рис. 13.43). В на-



РИС. 13.43

Зрелый рельеф, округ Керн, шт. Калифорния. Речные долины многочисленны, вся поверхность суши превращена в склоны, водоразделы узкие. (Фотография компании «Спенс эйр фотос».)

стоящее время типичный зрелый рельеф существует в районе Аллеганского плато и плато Камберленд к западу от Аппалачей (рис. 13.44).

Стадия старости. Если эрозия продолжается, то расчлененный рельеф зрелой стадии постепенно редуцируется и формируются широкие долины с пологими склонами и низкие водоразделы. Реки переносят более тонкий материал, и это вместе с развитием дельт в направлении моря уменьшает градиент потоков, пока почти на всем протяжении речных русел аккумуляция не будет преобладать над эрозией. Реки образуют широкие меандры на отложениях своих собственных пойм. Таким образом, почти вся площадь суши превращается в равнину с пологими склонами, характерными для дряхлого рельефа; такая равнина называется *пенепленом*. На стадии старости преобладают простые равнинные формы рельефа (рис. 13.45). Отдельные холмы, сложенные особенно крепкими породами, могут возвышаться над общим уровнем пенеплена; их называют *монадноками* («крепышами»).

Необходимое время. На завершение каждой отдельной стадии требуется от *сотен и тысяч до миллионов лет*, причем продолжительность времени изменяется от места к месту: один район может достичь зрелости за более короткое время, чем другой, соседний с ним, особенно если первый сложен менее крепкими породами.

Осложнения нормального эрозионного цикла. Нормальный эрозионный цикл на любой стадии может быть осложнен другими процессами осадконакопления и денудации (особенно формированием ледников), вулканизмом, начавшимся вновь поднятием или изменением уровня моря. Ледники могут выпахивать озерные котловины в речных долинах или погребать целые массивы под нагромождением несортированного обломочного материала мощностью до 100 м, заставляя таким образом реки начинать свою работу сначала. Продвижение эрозии может задерживаться также из-за того, что поверхностные воды уходят в карстовые воронки и в подземные пещеры в известняках, и из-за вторжения песчаных дюн. Лавовые потоки могут заполнить речные русла или перекрыть целые районы и коренным образом изменить речную сеть. В таком районе на поверхности лавового



РИС. 13.44
Расчлененное Аллеганское плато около города Джейкобсберга, шт. Огайо.

поля начинается новый эрозионный цикл.

Движения земной коры или изменения уровня моря могут в отдельных местах и на время трансформировать эрозионный цикл или привести к тому, что реки начнут его заново. Если область испытывает воздымание, градиенты потоков увеличиваются и реки опять начинают прорезать каньоны в днищах своих прежних долин, в результате чего область приобретает черты, характерные для юной стадии развития рельефа. Такой район называется *омоложенным*, а реки – *омоложенными реками*. После подобного омоложения реки вырабатывают *долины в новой возвышенности*. Если старые реки до омоложения меандрировали, то их широкие русла углубляются и старые излучины превращаются во *врезанные меандры* (рис. 13.46).

Опускание суши (или повышение уровня моря) ускоряет одряхление реки, приближая район к уровню базиса эрозии и уменьшая таким образом количество материала, которое река должна переместить. Затем море вдоль береговой линии затопляет нижние части долин, превращая их в эстуарии и отделяя притоки от

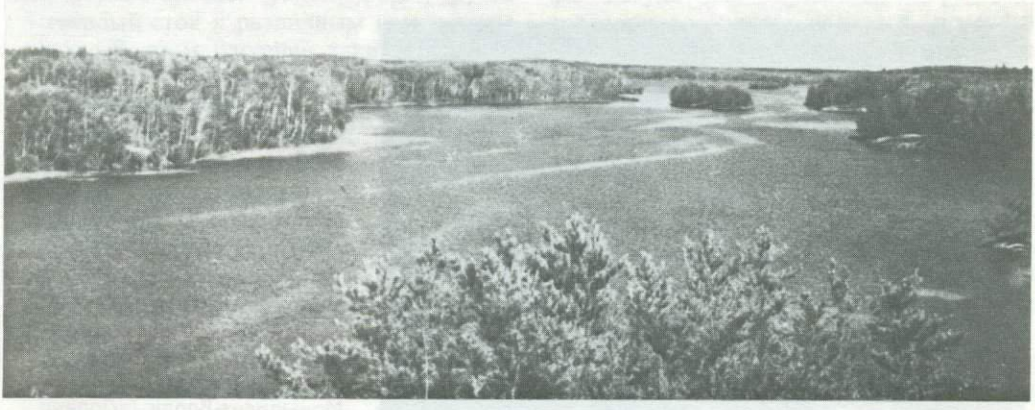


РИС. 13.45
Эрозионная поверхность стадии старости (пенеплен) с позднее образовавшимися ледниковыми озерами, которая видна до линии горизонта от Лаврентийской возвышенности около озера Лонг-Лейк в юго-восточной части провинции Манитоба. (Фотография Геологической службы Канады.)

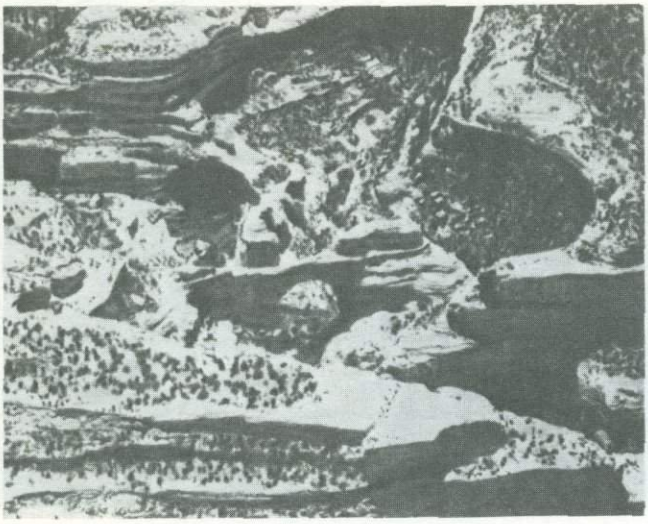


РИС. 13.46
Врезанные меандры («гусиные шеи») в каньоне Сан-Хуан, шт. Юта. Во время *предыдущего эрозионного* цикла, когда река текла по равнине, она выработала меандры. Когда река испытала омоложение в результате *воздымания* этой области, меандры стали врезанными. (Фотография Службы национальных парков.)

главной реки, как в районе Чесапикского залива. В этом случае говорят о *затопленных долинах*.

Поскольку эрозионный цикл сталкивается с множеством осложнений, многие геологи задают вопрос: а развивается ли когда-нибудь эрозионный цикл до конца и может ли сформироваться истинный пенеплен? Некоторые также сомневаются в том, существует ли строгая последовательность развития форм рельефа.

ФОРМЫ РЕЛЬЕФА, СВЯЗАННЫЕ С ВОДНЫМИ ПОТОКАМИ В АРИДНЫХ ОБЛАСТЯХ

В пустынях все-таки встречаются формы рельефа, образовавшиеся под воздействием потоков, хотя они и менее эффектны (рис. 13.47). В областях с полуаридным климатом, бесспорно, преобладают процессы выравнивания, даже если

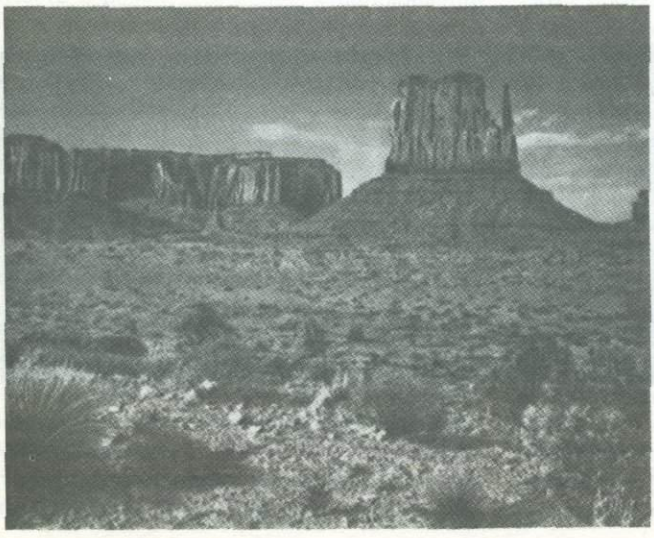


РИС. 13.47
Высеченные скалы и останцы, отчлененные эрозией, которые возвышаются над денудационной равниной (педиментом) в районе с аридным климатом, Моньюмент-Валли («Долина монументов»), шт. Юта и Аризона. (Фотография железнодорожной компании «Атчисон, Топика энд Санта-Фе».)

осадков выпадает мало или совсем не выпадает. В некоторых пустынях дождя не бывает по нескольку лет, а затем проходит очень сильный ливень, который вызывает плоскостную эрозию и порождает стремительные потоки воды в долинах.

Пустыни и полупустыни Провинции бассейнов и хребтов в США представляют собой внутренние, или бессточные, впадины, окруженные горными хребтами и не имеющие стока в море. Из-за недостатка воды в этих впадинах не развивается сквозная гидрографическая сеть. В отдельных местах такие пустынные котловины – особенно Долина Смерти в Калифорнии – лежат ниже уровня моря, и осадочный материал может удаляться из них только под действием ветра. Однако эти бессточные впадины могут заполниться осадками до такого уровня, что в них развивается сквозная гидрографическая сеть (рис. 13.36).

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ

Работа текучей воды начинается с ударов дождевых капель о землю, плоскостной эрозии и формирования оврагов. Особенно велико действие турбулентного течения реки. Скорость течения зависит от градиента реки, расхода воды в ней и твердого стока.

Реки размывают породы посредством абразии, гидравлического действия и растворения. Они переносят осадки, волоча материал по дну, во взвешенном состоянии в турбулентном потоке и в растворах. Благодаря селективной сортировке и истиранию обломков частицы уменьшаются в размерах по мере движения вниз по течению реки.

Реки, продвигаясь к базису эрозии, приспосабливают свой уклон, форму русел и твердый сток к различным изменениям в водосборном бассейне таким образом, чтобы сохранялось состояние равновесия. Со временем реки удлиняют, углубляют и расширяют свои долины.

Все реки можно разделить на консеквентные, субсеквентные, антецедентные, наложенные и обезглавленные (перехваченные). Система стока может быть древовидной, радиальной, меандрирующей, разветвляющейся, угловатой или решетчатой.

Речная эрозия разрушает различные породы в соответствии с их прочностью и тектонической структурой. К эрозионным формам рельефа относятся каньоны, эрозионные террасы, столовые горы (месы), останцы, бедленды, куэсты, гряды, пороги и водопады, водобойные колодцы и котлы, каменные мосты.

Реки откладывают осадки, если уменьшается скорость течения или расход воды и если увеличивается поперечное сечение русла. В результате образуются аллювиальные конусы выноса, предгорные аллювиальные равнины, прирусловые отмели, русловой и пойменный аллювий, прирусловые валы, террасы и дельты.

Во время общего выравнивания района развитие рельефа в эрозионном цикле проходит стадии юности, зрелости и старости, каждая из которых характеризуется определенными особенностями рельефа. Результатом предельного развития эрозионного цикла является пенеплен. Эрозионный цикл может прерываться оледенением, вулканизмом, региональным воздыманием суши и изменением уровня моря. Прежнюю речную сеть могут нарушать и изменять ледники и лавовые потоки. Воздымание суши приводит к омоложению рек; некоторые из них впоследствии прорезают врезанные меандры. Опускание побережья или повышение уровня моря вызывают формирование затопленных долин.

В аридных областях эпизодически выпадают обильные дожди, и это делает возможной работу водных потоков даже здесь.

ВОПРОСЫ

1. Сравните ламинарное и турбулентное течения. Какое из них важнее для работы рек?
2. Какие условия необходимы для активной речной эрозии?
3. Как реки переносят осадочный материал? (Рассмотрите размеры частиц и их состав.)
4. Что представляет собой выровненная река и от каких факторов зависит ее равновесие?
5. Чем отличается консеквентная река от субсеквентной?
6. За какое пиратство не наказывают? Что такое перехват реки?
7. При каких условиях реки откладывают осадки?
8. Какова последовательность развития региональной речной сети?
9. Расскажите о процессах, которые приводят к омоложению рек.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Bloom A.L., 1969, The Surface of the Earth, Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs, N.J.

Eagleson P.S., 1970, Dynamic Hydrology, McGraw-Hill Book Company, New York.

Ellison W.D., 1948, Erosion by raindrop, Sci. Amer., vol. 179, No. 5, pp. 40–45.

Gilbert G.K., 1914, Transportation of Debris by Running Water, U.S. Geol. Surv. Prof. Paper 86.

Hansen W.R., 1969, The Geologic Story of the Uinta Mountains, U.S. Geol. Surv. Bull. 1291.

Harms J.C., Fahnestock R.K., Stratification, Bed Forms, and Flow Phenomena (with an example from the Rio Grande), Amer. Assn. Petroleum Geologists, Spec. Pub. No. 12.

Hjulstrom F., 1935, Studies of the morphological activity of rivers as illustrated by the River Fryis, Univ. of Upsala Geological Institution Bulletin, vol. 25, pp. 221–527.

Lane E.W., 1955, The importance of fluvial morphology in hydraulic engineering, Amer. Soc. Civil Engineers Proc., vol. 81, No. 745.

Leopold L.B., Wolman M.G., Miller J.P., 1964, Fluvial Processes in Geomorphology, W.H. Freeman and Company, San Francisco.

Linsley R.K., Kohler M.A., Paulhus J.L.H., 1949, Applied Hydrology, McGraw-Hill Book Company, New York.

Mackin J.H., 1948, Concept of the graded river, Geol. Soc. Amer. Bull., vol. 59, pp. 463–512.

Matthes F.H., 1951, Paradoxes of the Mississippi, Sci. Amer., vol. 184, No. 14, pp. 18–23.

Morisawa M., 1968, Streams, Their Dynamics and Morphology, McGraw-Hill Book Company, New York.

Playfair J., 1802, Illustrations of the Huttonian Theory of the Earth (reprinted 1956), Univ. of Illinois Press, Urbana, Ill.

Sundborg A., 1956, The River Klaralven, Geography Analer, vol. 38, Nos. 2–3, pp. 127–316.

Thornbury W.D., 1969, Principles of Geomorphology, 2d ed., John Wiley and Sons, Inc., New York.

Twain Mark, 1883, Life on the Mississippi, James R. Osgood and Company, New York. [Имеется перевод: *Марк Твен*, Жизнь на Миссисипи, Собр. соч. в 12 томах.–М.: Гослитиздат, том 4, 1960.]



14 СНЕГ, ЛЕД И ЛЕДНИКИ

Образование ледников – это еще один процесс сглаживания (градации) рельефа. Он может прерывать другие процессы такого рода, например речную эрозию, и накладывать на них отпечаток своей эрозионной и аккумулятивной деятельности.

Всего 10 000 лет назад, в плейстоценовую эпоху, ледники покрывали огромные пространства материков. Хотя с тех пор ледники отступили, они в значительной степени повлияли на рельеф. В горных районах и в высоких широтах северного *и южного полушарий ледники и сейчас* продолжают изменять ландшафт.

Живописный ледниковый рельеф обычно заставляет нас забывать о том, что формирование льда в любом месте способствует процессам выравнивания, сглаживания рельефа. Важно прежде всего то, что вода, затвердевая и превращаясь в лед, не сжимается, как большинство веществ, а, наоборот, расширяется. Благодаря этому расширению лед играет большую роль в физическом выветривании и в изменении поверхности суши.

ЛЕД В ПРИРОДЕ

Лед образуется повсюду, где замерзает вода,–в озерах, морях, реках, в грунте или в атмосфере. Мы привыкли видеть его в форме снега, который состоит из ажурных гексагональных кристаллов, очень изящных и красивых (рис. 14.1), но лед встречается и в различных других формах, например в виде кристаллов инея и игольчатых, ветвистых и похожих на перья масс, что оседают на оконных стеклах. В водоемах лед образует либо неправильные сростки крупных столбчатых (игольчатых) кристаллов, либо твердые массы, состоящие из вытянутых гексагональных кристаллов, длинные оси которых перпендикулярны поверхности воды.

Озерный лед. Водоем со спокойной водой, например озеро или внутреннее море, обычно не замерзает до тех пор, пока вся толща воды не охладится до температуры, близкой к точке замерзания. Пресная вода имеет максимальную плотность при температуре 4°С, и когда вода у поверхности водоема остывает до этой температуры, она опускается, а на ее место снизу поступает более теплая вода. Эта циркуляция в вертикальном направлении продолжается, пока вся масса воды не приобретет максимальную плотность. Теперь, хотя температура на поверхности озера продолжает понижаться и приближается к точке замерзания (0°С), эта более холодная вода остается наверху, и в конце концов из нее образуется корка льда (рис. 14.2). Следовательно, озера со средними глубинами полностью покрываются льдом только после того, как температура воздуха долгое время будет ниже 0°С. Глубокие озера, например Великие озера, не замерзают целиком даже в самые холодные зимы, так как зима слишком коротка для того, чтобы вода в озере охладилась на всю глубину до достаточно низкой температуры.

Если мелководье протягивается на некоторое расстояние от берега, лед примерзает ко дну, соединяясь с замерзшей водой, которая находится в осадках на дне озера, и тогда лед, покрывающий озеро, припаивается к промерзшим берегам. При колебаниях температуры лед расширяется и сжимается. Когда происходит сжатие, лед растрескивается и трещины заполняются водой, которая тоже замерзает и расширяется. Если температура немного повышается, лед расширяется и в результате возникают горизонтальные силы, которые действуют в направлении береговой линии и заставляют осадки и обломки надвигаться на берег. После того как лед растает, этот обломочный материал выглядит как стенка из песка, гравия и более крупных обломков, повторяющая очертания береговой линии. Сотни ледниковых озер

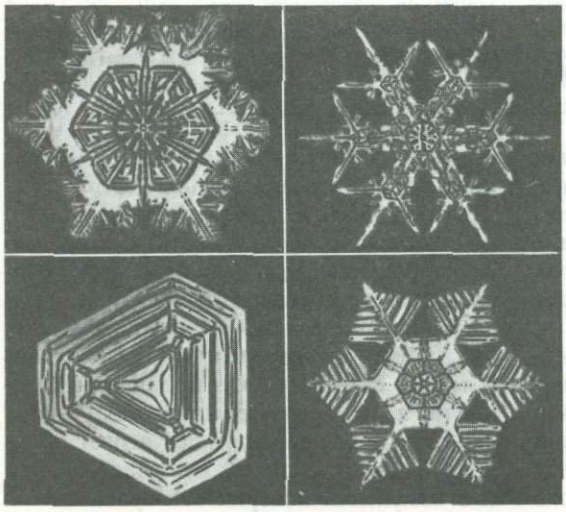


РИС. 14.1
Снежинки, в которых видны некоторые из множества ажурных гексагональных кристаллов, возникающих из водяного пара по мере того, как он затвердевает, замерзая в воздухе. (По У. Накайя.)

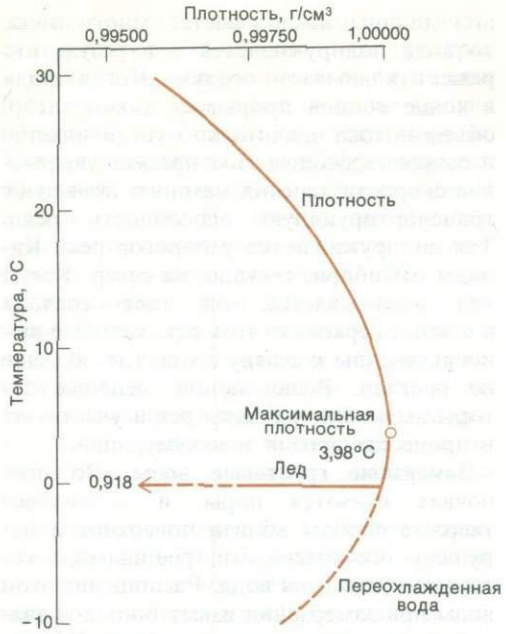


РИС. 14.2
График изменения плотности воды в зависимости от температуры. Химически чистая вода достигает максимальной плотности при температуре 3,98° С. Плотность поверхностной воды при охлаждении увеличивается, и поэтому она опускается, пока плотность всей массы воды не станет максимальной. С этого времени охлаждение заставляет поверхностную воду расширяться и, следовательно, удерживаться на поверхности, где при температуре около 0° С она может замерзнуть. Лед при кристаллизации расширяется на $1/n$ часть объема (эта точка находится за пределами графика). Подобно другим твердым телам, уже сформировавшийся лед расширяется и сжимается по мере того, как его температура (ниже точки замерзания) повышается или понижается.

в верхней части долины Миссисипи обрамлены *озерными валами*, которые сформировались именно таким образом (рис. 14.3). Они отличаются от пляжей и баров тем, что сложены несортированным материалом и что крутые их склоны обращены к озеру.

Морской лед. Морская вода не замерзает до тех пор, пока ее температура не понизится до -2–-4°С в зависимости от солености. В высоких широтах температура всей морской воды близка к точке замерзания, но слой льда мощностью 2–3 м, образующийся на поверхности моря, защищает находящуюся под ним воду от сильного холода полярных зим. Там, где в приполярных районах лед формируется вдоль берегов, его мощность часто превышает 15 м. Такие массы льда образуются не в результате непосредственного замерзания океанской воды, а благодаря тому, что в лед превращает-



РИС. 14.3
Озерный вал высотой 2–3 м на берегу озера Мендота, округ Мадисон, шт. Висконсин. Эта стенка, сложенная обломками валунов, была вытолкнута на берег льдом во время стадии расширения, причиной которой послужила короткая *февральская оттепель.* (Фотография Службы геологии и естественной истории шт. Висконсин.)

ся снег, возникающий из водяных брызг, которые летят от волн во время штормов и засыпают прибрежный лед. Такой лед играет важную роль в эрозии берегов. Зимой он защищает берег от разрушительного действия волн, а во время ледохода служит как бы плотом, на котором обломочный материал может выноситься в море.

Отламываясь, морской лед плавает в виде крупных пластин, которые называют *плавучими льдинами*. Эти льдины могут сбиваться вместе, образуя *ледяные торосы* (*паковый лед*), которые имеют очень неровную поверхность и возвышаются над водой из-за того, что льдины наползают друг на друга. Вдоль берегов полуострова Лабрадор и во многих заливах полярных морей лед формируется на морском дне, и тогда говорят о *грунтовом*, или *донном*, льде.

Речной лед. Когда вода в реке замерзает, она оказывает разрушающее действие на борта и дно русла подобно тому, как это происходит при замерзании грунтовых вод. Мелкие частицы, гравий и валуны вмерзают в лед и перемещаются вниз по течению, подплывая вместе с толстыми льдинами к берегам реки или останавливаясь из-за ледяных заторов, перегораживающих долину. Если в сужении долины накапливается много льда, то вода подпруживается и в результате река откладывает осадки. Когда вода в конце концов прорывает такой затор, объем потока значительно увеличивается и сопровождающее этот процесс увеличение скорости течения намного повышает транспортирующую способность реки. Так подпруживаются у порогов реки Канады и Сибири, текущие на север. Когда лед взламывается, он тает сначала в южных верховьях этих рек, которые выносят льдины к северу, туда, где лед еще не растаял. Возникающие ледяные заторы вызывают разливы рек и участвуют в процессах эрозии и аккумуляции.

Замерзшие грунтовые воды. Во всех почвах имеются поры, и почти все твердые породы вблизи поверхности нарушены бесчисленными трещинами, в которых содержится вода. Расширение этой воды при замерзании имеет большое значение для дезинтеграции пород. К процессам, вызывающим дезинтеграцию, относятся *морозное расклинивание* и *морозное вспучивание* (рис. 14.4), которые приводят к формированию разнообразных форм рельефа, таких, как осыпи, узорчатый грунт и некоторые типы каменных глетчеров.

В полярных и высокогорных областях под действием мороза разрушается огромное количество пород. Морозное расклинивание, как известно, поднимает крупные глыбы (до 8 м в диаметре) более

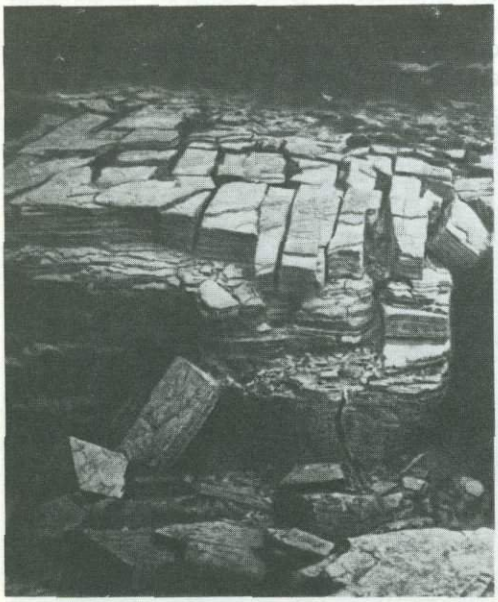


РИС. 14.4
Результаты морозного вспучивания, национальный парк Глейшер, шт. Монтана. Ограниченные трещинами глыбы откололись и свалились вниз вследствие того, что вода в трещинах замерзла.

чем на 4 м по вертикали. Там, где имеются суточные колебания температуры, в результате замерзания воды и таяния льда от скал, валунов или более мелких обломков откалываются куски породы. У подножия крутых скал образующийся обломочный материал накапливается в виде осыпей. На крутых склонах эти осыпи могут перемещаться вниз под действием морозного расклинивания, образуя каменные потоки, или каменные глетчеры. Такое перемещение масс под влиянием силы тяжести уже рассматривалось в этой книге, но мы хотим здесь обратить внимание на то, что действие мороза ускоряет движение материала вниз по склону, а зачастую может вызвать его начало.

Замерзшая в почве вода образует ледяной цемент, который связывает частицы между собой и препятствует просачиванию воды во время весеннего таяния снега. На склонах холмов и гор такая поверхность мерзлого грунта может стать плоскостью скольжения, по которой насыщенные водой массы обломочного материала могут перемещаться либо медленно, либо быстро. В тех земледельческих районах, где почва представлена валунной глиной, во время ежегодного промерзания валуны выталкиваются вверх, ближе к поверхности, под действием сил, возникающих вследствие расширения водонасыщенной глины при замерзании. Когда весной действие мороза прекращается, частицы почвы и мелкие обломки пород оседают, а более крупным валунам мешают оседать глинистые частицы и галька, которые падают в полости, прежде занятые валунами. Со временем большинство валунов может оказаться на поверхности или вблизи нее. В некоторых районах фермеры, убирая эти валуны со своих полей, используют их для строительства каменных изгородей.

Многолетняя мерзлота. В областях, расположенных поблизости от ледяных шапок или материковых ледников и в некоторых высокогорных областях, почвы и коренные породы наполнены никогда не тающим льдом. Это явление называют многолетней (вечной) мерзлотой.

Помимо того что лед цементирует частицы породы и таким образом целиком заполняет поровое пространство, увеличиваются размеры и количество его кристаллов и образуются жилы, клинья, массы льда неправильной формы и протяженные линзовидные прослои относительно чистого льда, которые могут достигать больших размеров. Особенно благоприятные условия для формирования крупных линз чистого льда существуют на слабо дренируемых площадях, которые подстилаются глинами, очень тонкими алевритами или торфом.

Лед в почве быстро реагирует на изменение температуры. При замерзании объем почвенного слоя увеличивается отчасти вследствие расширения внутрипоровой (интерстиционной) воды, а отчасти в результате формирования в нем масс чистого льда. Мощность слоя алевритов может увеличиться таким образом больше чем вдвое.

В районах развития многолетней мерзлоты образуются характерные структуры грунта, в том числе торфяные и каменные круги и многоугольники, каменные гирлянды и каменные полосы. Подобные структуры, возникшие под действием мороза, можно наблюдать на многих горных вершинах, хотя настоящей многолетней мерзлоты там нет.

Кольцевые структуры могут сформироваться под действием горизонтальных сил, возникающих при замерзании воды, как в случае торфяных кругов, или в результате сжатия, вызванного промерзанием грунта в холодное время года, как в случае каменных кругов. Торфяные круги лучше всего развиваются на лишенных растительности почвах, но могут возникнуть и на участках с растительным покровом; в этих местах вспучивание почвы и горизонтальное давление, связанные с замерзанием и оттаиванием, разрывают почвенный слой и раздвигают его, и там, где произошло отделение, остаются зияющие трещины. Каменные круги формируются из трещин усадки, которые образуются по мере того, как промерзшая земля охлаждается. Весенние талые воды стекают в эти трещины усадки и выносят с собой тонкозернистый мате-

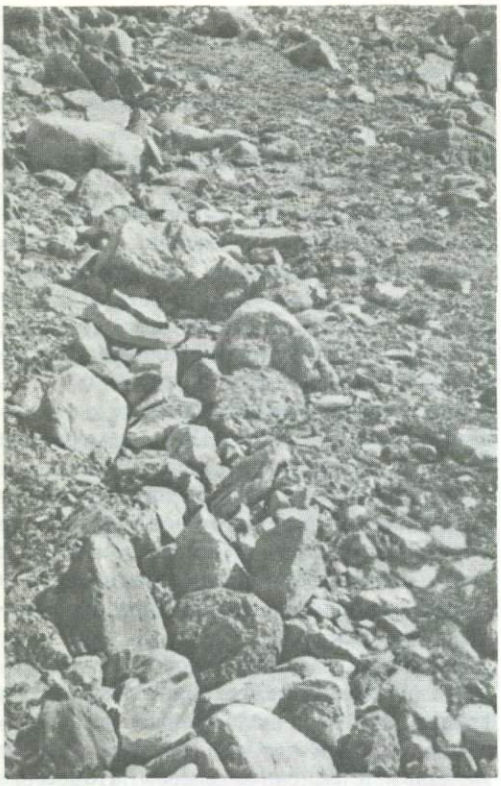


РИС. 14.5
Каменные полосы, горы Святого Ильи, Аляска. Расколотые под действием мороза обломки валунов образуют каменные полигоны. На горных склонах эти полигоны медленно сползают вниз, постепенно вытягиваясь, пока не образуются полосы длиной в несколько десятков метров, после чего эти структуры уже нельзя проследить. (По материалам Роберта П. Шарпа.)

риал, оставляя грубые обломки на поверхности или вблизи нее. В результате возникает полигональная схема расположения обломков, образующаяся под действием замерзания или многолетней мерзлоты.

На склонах, где есть раздробленные массы породы, движение структурного грунта приводит к тому, что изометричные каменные круги вытягиваются, превращаясь в эллипсы или петли, которые называют каменными гирляндами. Когда такие гирлянды или петли попадают на более крутые склоны, они продолжают удлиняться и таким образом принимают вид каменных полос. Они представляют собой параллельные каменные гребни, которые могут прослеживаться на сотни метров, пока не утратят связности и не разрушатся (рис. 14.5).

Сейчас остатки древних каменных кругов и полос можно обнаружить на поверхности земли далеко от современной границы многолетней мерзлоты, даже на юге провинции Новая Шотландия, в Новой Англии и шт. Пенсильвания. Другие характерные для вечной мерзлоты структуры встречаются у границ ледниковых отложений в шт. Висконсин и в других штатах, где были ледники. Все эти структуры сформировались, вероятно, когда субарктический климат распространялся на более южные районы, чем в настоящее время.

Глубина многолетней мерзлоты изменяется от места к месту даже в областях с очень холодным климатом. В северном полушарии вдоль южной границы многолетнемерзлых пород располагается обширная зона шириной до 800 км, где многолетняя мерзлота развита в отдельных участках и существует спорадически. На Аляске мощность многолетнемерзлых пород изменяется от нуля близ озер, больших родников и горячих источников до 300 м и более. Максимальная глубина постоянного промерзания пород превышает 600 м.

Снег. Когда водяной пар конденсируется непосредственно в твердое состояние, образуются кристаллы снега. Эти симметричные кристаллы возникают чаще всего, когда нет ветра и воздух очень холодный. Обычно снежные кристаллы *слипаются в хлопья, которые падают* на землю.

Зимой снег, как правило, покрывает значительную часть земной поверхности, а на высоких вершинах или высокогорных *плато встречается даже в экваториальной* зоне.

У свежевыпавшего сухого снега очень низкая плотность и, следовательно, высокая пористость. Эти свойства, вместе с очень неправильной формой снежных хлопьев, обеспечивают чрезвычайно большую площадь поверхности, что позволяет *снегу легко обмениваться влагой* с атмосферой посредством испарения и сублимации. Влагообмен бывает наибольшим там, где снежные кристаллы и хлопья соприкасаются, и поэтому форма *снежных хлопьев постепенно меняет*ся, и они превращаются в округлые, почти сферические зерна. Такой зернистый снег называют *фирном* (термин немецкого происхождения) или *невé* (термин, употребляемый во Франции) (рис. 14.6).

В районах, где среднегодовая температура близка к точке замерзания воды, *снег не тает в любое время года* и, следовательно, накапливается, образуя массу так называемых вечных снегов. Нижняя граница, до которой они опускаются, называется *снеговой линией*. Снеговая линия обычно в разных местах располагается на разной высоте; ее положение зависит от *рельефа местности, характера ветров*, вариаций средних температур и количества выпадающего снега.

Там, где в холодное время года снега выпадает больше, чем может растаять *весной и летом, формируются снежные поля* (рис. 14.7). Внутри такого поля снег с глубиной постепенно превращается в лед, и снежное поле становится *ледяным полем*. Превращение снега в фирн, а фирна в лед происходит очень медленно; этот процесс обусловлен рядом причин, которые приводят к тому, что более *крупные зерна растут за счет более мелких*. Хотя фирновый снег состоит из округлых зерен льда, между ними все еще имеются значительные пространства, вследствие чего общая плотность фирна *меньше плотности льда. По мере роста* крупных кристаллов фирновый лед уплотняется, и пористость с увеличением плотности уменьшается (рис. 14.8). В конце концов твердая масса зернистых кристаллов льда преобретает отчетливую сцепленную структуру. При постоянном давлении накапливающегося сверху снега и фирна эти кристаллы продолжают рас-

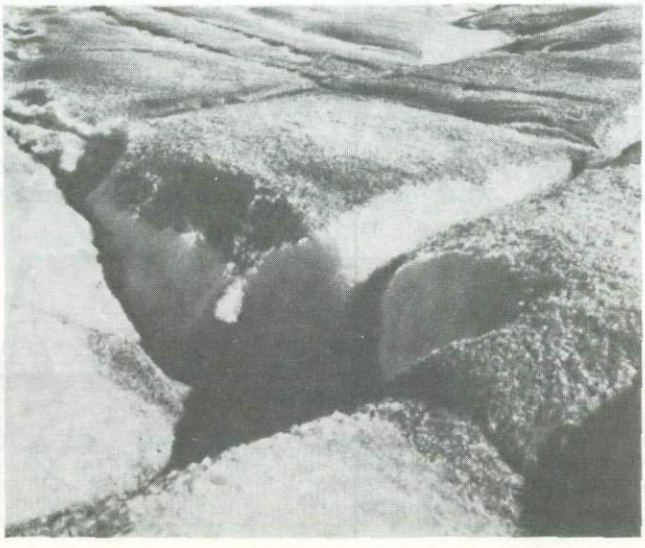


РИС. 14.6
Трещины и грубозернистый фирн на поверхности ледяного поля Колумбия, национальный *парк Джаспер, провинция* Альберта, Канада. (Фотография Канадского государственного бюро путешествий.)



РИС. 14.7
Неустойчивая снежная масса, *нависающая* над ледяными полями на Аляске. Таяние (и повторное замерзание), *соскальзывание* и *обрушение* таких снежных масс способствуют тому, что формируются крутые закругленные верхние концы цирков. Снежные поля возникают там, где снег зимой быстрее накапливается, чем летом тает. (Фотография Военно-воздушных сил США.)

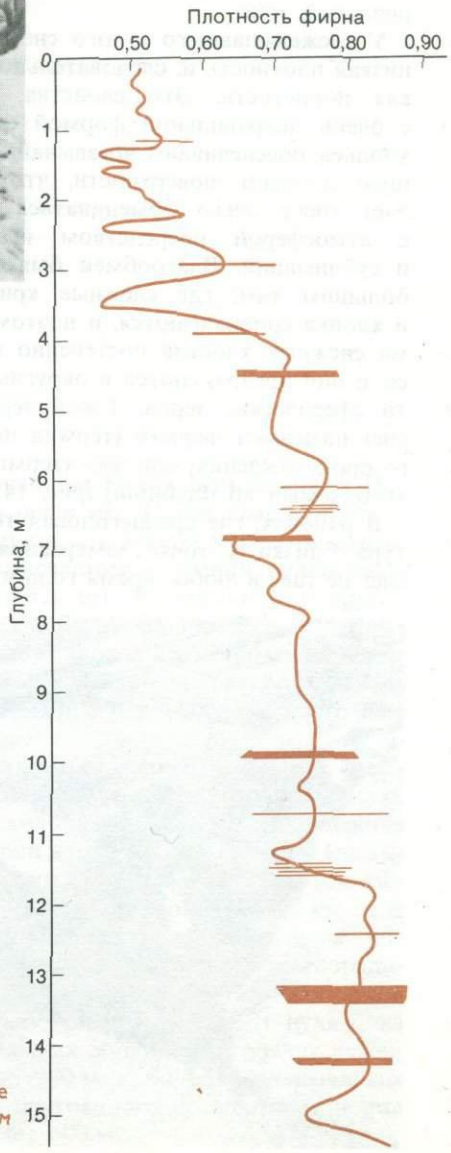


РИС. 14.8
Плотность снега и льда в верхней части ледника Сьюард на Аляске. Горизонтальные линии и полосы – *слои льда*. (*По материалам* Роберта П. Шарпа.)

ти и меняют ориентировку. По мере того как толщина ледяного поля увеличивается, подвижность молекул, как и при перекристаллизации минералов, переходит в подвижность собственно массы льда, и ледяное поле становится *ледником*.

ЛЕДНИКИ

В то время как между снежным и ледяным полем из-за постепенного характера изменений нет четкой границы, ледяное поле резко отличается от ледника. Механизм течения, макроморфология движущегося льда и связанные с ледниками особенности эрозии и отложения осадков позволяют нам отличать ледники от простых аккумуляций снега и льда. Из всего сказанного напрашивается вывод о том, что ледники развиваются из ледяных полей посредством непрерывного добавления снега. С другой стороны, если климат изменится так, что снег будет таять быстрее, чем накапливаться, то ледник снова превратится в статичное ледяное поле и в конце концов может совсем исчезнуть.

Движение ледников. Ледники движутся под влиянием силы тяжести вследствие того, что внутри них происходит перекристаллизация льда, путем скольжения по плоскостям внутри самого ледника и посредством скольжения по поверхности земли. Скорость течения льда является функцией нескольких факторов, в том числе градиента склона, по которому он движется, мощности льда и местных температурных условий. К этому можно добавить степень сглаженности поверхности, по которой движется ледник, количество воды во льду (и той, что выпадает на ледник в виде дождя, и той, что образуется при таянии льда) и, наконец, количество обломочного материала во льду. Ледник, засоренный валунами, песком и тонкообломочным рыхлым материалом, движется медленнее, чем чистый прозрачный лед.

Ледниковый поток можно разделить по вертикали на две части. Верхняя часть мощностью от 30 до 60 м является хрупкой и течет благодаря тому, что раскалывается по трещинам на глыбы разного размера, перемещающиеся по льду, залегающему глубже. В этой зоне встречаются глубокие трещины, *расселины*, которые открываются и закрываются по мере продвижения льда. На глубине, где ледник становится пластичным, эти трещины исчезают. В нижней части ледника преобладает пластическое течение. Давление здесь достаточно велико для того, чтобы залечить трещины, и течение происходит путем перекристаллизации и срыва и проскальзывания одних частей ледника относительно других.

Хотя ледники перемещаются медленнее рек, в них, как и в реках, отдельные участки могут двигаться с разной скоростью. Трение ледника о борта и дно долины замедляет движение, и, следовательно, самая большая скорость течения наблюдается в центре ледника (рис. 14.9).

Ледники возникают там, где зимой выпадает больше снега, чем тает летом. Такие области типичны для высоких широт и высокогорья, они называются *зонами аккумуляции* снега и льда. По мере своего течения ледник выходит из этой зоны,

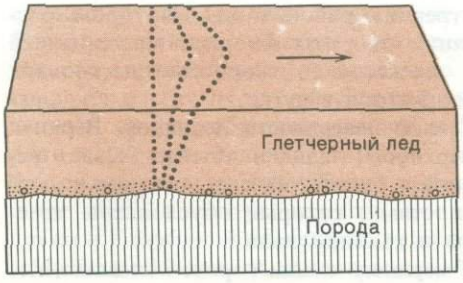


РИС. 14.9
Диаграмма, на которой показано, что лед в пределах ледника движется неодинаково. Прямой ряд вех, поставленных поперек ледника на его поверхности, со временем изгибается вниз по долине. Колышки, размещенные сбоку, показывают, что верхняя часть ледника движется быстрее нижней.



РИС. 14.10
Продольный профиль горного ледника, на котором показано течение льда из зоны аккумуляции, расположенной выше снеговой линии, в зону разгрузки, где вследствие таяния и абляции ледник становится тоньше. Подгорная трещина фирнового поля (бергшрунд) маркирует область, где ледник отрывается от сравнительно статичного снежного поля, лежащего выше по склону. Больше трещин образуется там, где изменение градиента склона в коренных породах вызывает растяжение льда, находящегося над ним. Трещины узкие и выклиниваются с глубиной, так как давление льда достаточно велико, чтобы залечить трещины в нижней зоне пластического течения.

двигаясь либо к более низким широтам, либо вниз. Здесь снега выпадает меньше, чем успевает растаять за лето. Это – *зона разгрузки*, где ледник тает и где происходит отложение основного количества обломочного материала. В зоне разгрузки ледник может существовать, пока скорость вытекания льда в эту зону превышает скорость его таяния (рис. 14.10).

Когда фронт льда продвигается вперед, говорят, что ледник *наступает*. Это происходит, если скорость питания ледника больше скорости таяния. Следовательно, ледник будет наступать до тех пор, пока не достигнет области, где температура воздуха достаточна для того, чтобы лед таял. И наоборот, в некоторых местах температура может увеличиться настолько, что скорость таяния будет больше скорости питания ледника, вытекающего в зону разгрузки, и тогда ледник будет *отступать*. Отступание ледника маркируется отодвиганием его фронтальной части.

Колебания положения нижней границы ледника могут быть очень велики; при этом проявляются и ежегодные, и долговременные изменения. В Швейцарии отмечалось устойчивое продвижение ледников в течение всего Средневековья; оно достигло максимума примерно в 1820 г. Затем последовало постепенное отступание льда, продолжавшееся вплоть до 1840 г., когда ледники снова начали наступать. С 1860 г. большинство ледников заметно отступает. Скорость продвижения ледников может достигать сотен метров в год, но в большинстве случаев они перемещаются гораздо медленнее. Отступание нижнего конца ледника может происходить с той же скоростью, хотя иногда скорость отступания может достигать и 1 км/год (рис. 14.11).

Несмотря на то что нижний конец ледника может продвигаться вперед или, наоборот, отступать, лед продолжает свое движение вниз по склону. Скорость движения внутри льда зависит от времени года и от того, в каком районе земного шара находятся ледники. Альпийские ледники перемещаются на 30–100 см в сутки; летом некоторые из них могут двигаться с чрезвычайно большой скоростью – до 10 м в сутки. Необычно высокие скорости отмечаются для языков льда, спускающихся в фиорды вдоль побережья Гренландии, где за сутки лед может продвинуться почти на 30 м. Однако здесь же во внутренних районах на некотором расстоянии от узких фиордов материковый лед движется со скоростью нескольких миллиметров в сутки.

Рельеф поверхности ледников. Верхняя поверхность ледника обычно бывает неровной и бугристой, с характерными особенностями, которые обусловлены течением и таянием льда.

У верхнего конца горного ледника, где

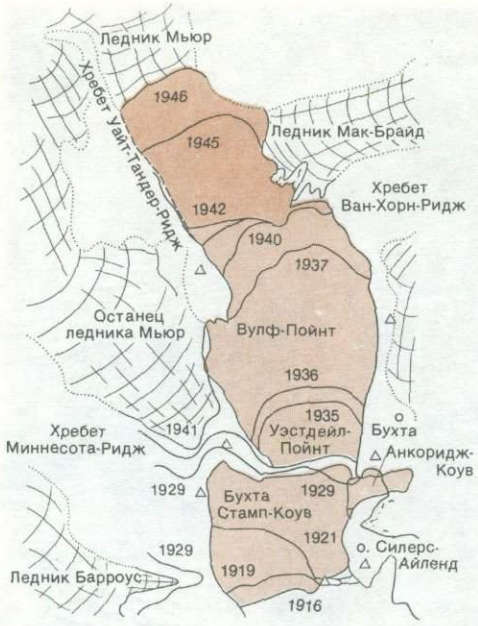


РИС. 14.11
Карта, на которой показано отступание ледника Мьюр на Аляске с 1916 по 1946 г. Положение границ дано по состоянию на 1941 г., за исключением случаев, указанных особо. (По материалам У. О. Филдса мл.)

лед отрывается от неподвижного фирнового поля, образуется большая трещина (или серия открытых трещин), носящая название *бергшрунд* (подгорная трещина) (рис. 14.10). Фирн и лед, образующие верхний край бергшрунда, находятся выше, чем оторвавшийся по нему участок льда. Движущийся ледник смещается и в вертикальном, и в горизонтальном направлении. Такое движение оказывается максимальным в летние месяцы и почти приостанавливается зимой.

Там, где ледник течет по неровной поверхности коренных пород, градиент склона может увеличиться, в результате чего на поверхности ледника возникают растягивающие напряжения, и под их действием образуются трещины (рис. 14.12). На поверхности они обычно ориентированы под прямым углом к длинной оси ледника. Хотя в момент формирования эти трещины почти вертикальны, неравномерное течение льда искривляет их так, что в центральной части ледника они приобретают наклон в сторону верховьев ледника и могут изгибаться ниже по течению. Такие трещины шире всего в центре ледника, а к его краям и с глубиной постепенно сужаются.

На большинстве ледников развиты как краевые, так и поперечные трещины. Краевые трещины (рис. 14.13, 14.14) направлены вверх по долине под углом приблизительно 45° к направлению течения ледника. Они возникают благодаря тому, что центральная часть ледника движется быстрее, чем края, и растягивает верхнюю хрупкую зону.

Поверхность ледника открыта солнечному теплу и теплым ветрам, и в результате их воздействия на ней – за счет таяния и испарения льда – образуются неровности. Этот процесс называется *абляцией*, а неровности на поверхности ледника, возникающие в результате абляции, носят название *сераков* (рис. 14.15). Грубообломочный материал на поверхности ледника защищает лед от солнечных лучей, так что местами полосы таких обломков лежат на ледяных стенках, которые могут возвышаться над поверхностью ледника метров на тридцать. Точно так же защищают лед и плоские глыбы породы, и, по мере того как поверхность льда вокруг них понижается вследствие абляции, эти глыбы остаются лежать на *колоннах* и *постаментах* (рис. 14.16). Небольшие кучи пыли или обломков пород лучше, чем лед, поглощают солнечное тепло и так сильно на-

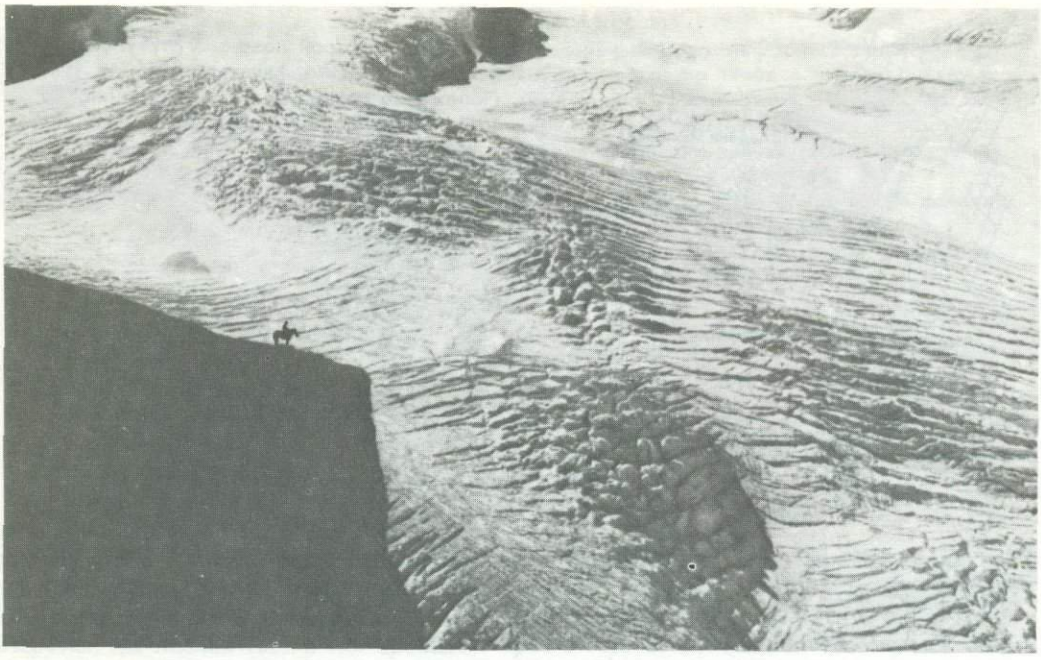


РИС. 14.12

Так выглядит летом ледник Атабаска в провинции Альберта. На этом обширном пространстве льда видны многочисленные трещины, образовавшиеся вследствие движения ледника вниз по неровному ложу. (Фотография Канадской Тихоокеанской железной дороги.)

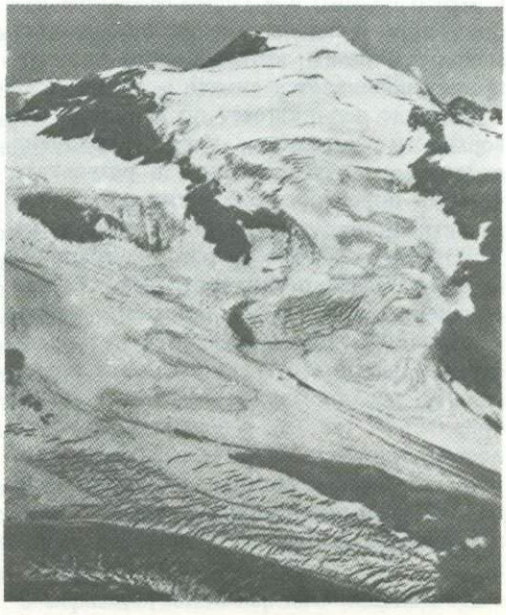


РИС. 14.13

Трещиноватая поверхность альпийского ледника *около города Инсбрука в Австрии*. На этой поверхности видны многочисленные поперечные и секущие их краевые трещины (на переднем плане).

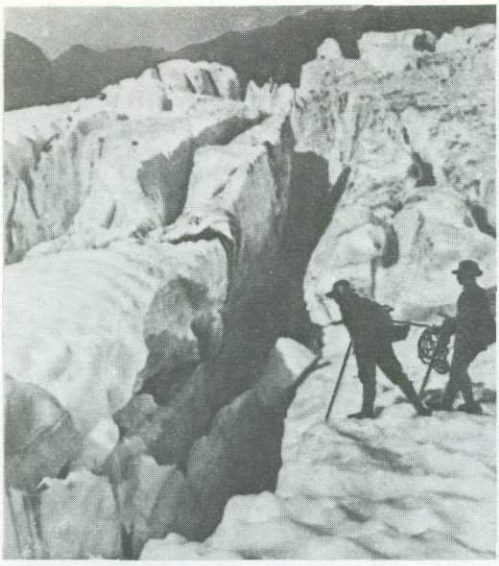


РИС. 14.14
Крупные трещины на поверхности альпийского ледника в Швейцарии.

РИС. 14.15
Конусы обломочного материала, образовавшиеся в результате избирательной абляции, или таяния, поверхности льда, за 12 дней в середине лета 1950 г. на леднике Эммонс, который расположен на северо-восточном склоне горы Рейнир в шт. Вашингтон. Величина абляции заметна по разнице уровней между точкой, на которую человек указывает пальцем, и поверхностью льда, на которой он стоит. Палки вставили вертикально в отверстия, пробуренные во льду почти на 2 м, и затем укрепили песком, насыпав его кучами вокруг палок; теперь этот песок защищает конусы льда. (Фотография Джорджа П. Ригби.)

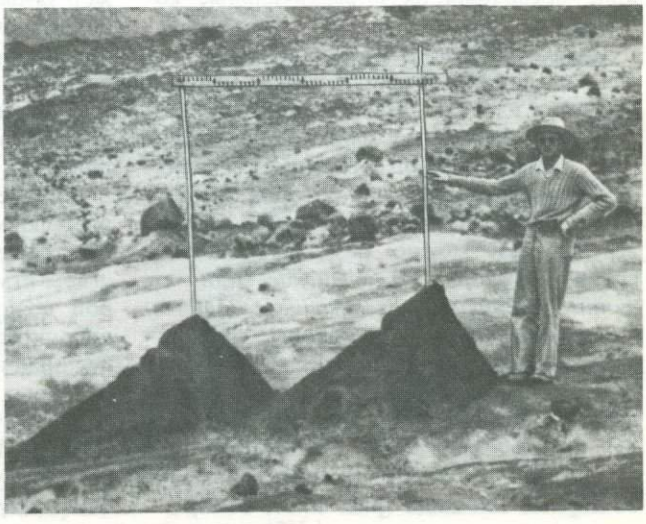




РИС. 14.16
Ледниковый стол – защищенная породой ледяная колонна на леднике Горнерграт в Швейцарии. Плита породы предохраняет столб льда от таяния. (Фотография Е. С. Моора.)

греваются, что лежащий под ними лед тает. Эти кучи оседают, и на поверхности льда образуются впадины, или *пылевые углубления (ледниковые стаканы)*.

Абляция может уменьшать мощность ледника на несколько сантиметров в день и таким образом в теплое время года за считанные недели давать заметный эффект (рис. 14.15). В теплые дни на поверхности ледника стоят лужи и текут бесчисленные ручейки, которые, сливаясь, образуют небольшие речки, сбегающие в трещины. Вода уносит с поверхности ледника алеврит, песок и более крупные обломки, которые разрушают стенки трещин, превращая их в вертикальные колодцы.

Типы ледников. По мере того как лед увеличивается в объеме и в виде ледника вытекает из зоны аккумуляции, он приобретает различные формы, возникающие в значительной степени под влиянием поверхности, по которой ледник течет. В зависимости от внешней формы все ледники можно разделить на три группы: 1) *горные, альпийские*, или *долинные, ледники*; 2) *сливающиеся ледники*, или *ледники предгорий*, которые представляют собой соединившиеся долинные ледники, вторгшиеся в область предгорий; 3) *покровные*, или *материковые, ледники* (называемые также *ледниковыми щитами* или *покровами*), которые занимают обширные площади (рис. 14.17, 14.18).

Горные, или долинные, ледники – это ледниковые потоки, которые спускаются с высоких вершин (рис. 14.19) и встречаются на склонах высоких гор почти на любой широте. Они питаются за счет снежных полей на склонах гор и в областях питания, расположенных выше снеговой линии, и представляют собой твердый ледяной сток через долины, которые прежде были выработаны реками. Часто бывает трудно провести четкую границу между собственно ледником и питающим его снежным или ледяным полем, поскольку такое поле постепенно переходит в ледник. Горный ледник может образоваться в результате слияния более мелких языков льда, каждый из которых получает питание из собственного снежного поля. Очевидно, что в снежном или ледяном поле тоже происходит какое-то движение, так как избыток снега или льда разгружается из него в ледник.

Вообще форма горных ледников повторяет форму долин, а их размеры определяются величиной снежного поля, количеством атмосферных осадков и температурой воздуха. Не во всех горах, возвышающихся над снеговой линией, есть ледники, поскольку рельеф многих изолированных пиков неблагоприятен для накопления снега.

Ледники предгорий получили название по своему положению у подножия гор. Они встречаются на пологих склонах



РИС. 14.17
Часть ледникового щита Пенни на острове Баффинова Земля в Канаде и два ледниковых притока, которые, сливаясь, образуют ледник Коронейшн (на переднем плане). Темные линии на ледниках – боковые и *срединные морены*. (Фотография Канадских королевских воздушных сил.)

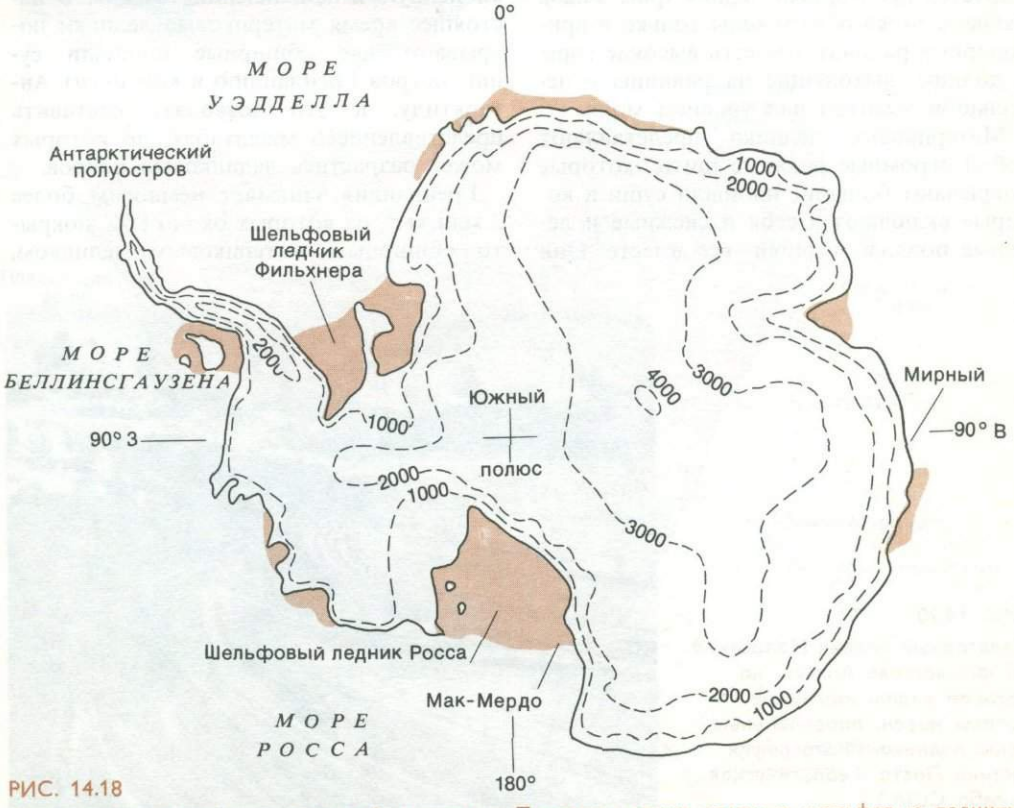


РИС. 14.18
Карта изогипс поверхности льда Антарктиды. Показаны также крупные шельфовые ледники. Горизонтали проведены через 1000 м. (По Суитинбенку, 1935.)



РИС. 14.19
Острые зазубренные пики над зоной развития ледников. Здесь летом снег сдувается ветром и соскальзывает вниз, во впадины, где происходит аккумуляция льда, а горные вершины обнажаются.

у основания гор, где спускающиеся по долинам ледники выходят из узких пространств, ограниченных бортами долин, и вследствие этого растекаются в стороны и вперед, образуя широкий плоский шлейф, или ледниковый язык. Там, где соединяется несколько таких языков, формируется предгорный ледник (рис. 14.20). Такие ледники обнаружены только в приполярных районах, где есть высокие горы и долины, выходящие на равнины с небольшой высотой над уровнем моря.

Материковые ледники представляют собой огромные ледяные щиты, которые покрывают большие площади суши и которые включают в себя и снежные и ледяные поля, и ледники – все вместе. Они распространяются во всех направлениях независимо от высоты рельефа. От долинных материковые ледники отличаются тем, что их не ограничивают борта долины.

Материковый ледник имеет относительно ровную поверхность, полого наклоненную в направлении течения. В настоящее время материковые ледники покрывают две обширные площади суши – остров Гренландию и континент Антарктиду, и это позволяет составить представление о масштабах, до которых может разрастись ледниковый покров.

Гренландия занимает немногим более 2 млн. км^2, из которых около 80% покрыто обширным материковым ледником.



РИС. 14.20
Предгорный ледник Маласпина на юго-востоке Аляски, на котором видны изогнутые полосы морен, параллельные краю ледника. (Фотография Остина Поста, Геологическая служба США.)

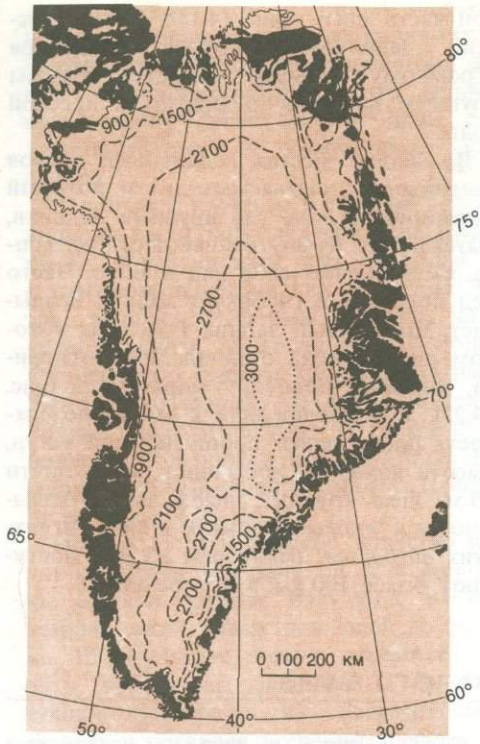


РИС. 14.21
Материковый ледяной щит на острове Гренландия, покрывающий всю территорию, за исключением узкой полоски суши (изолинии (в метрах) проведены приблизительно).

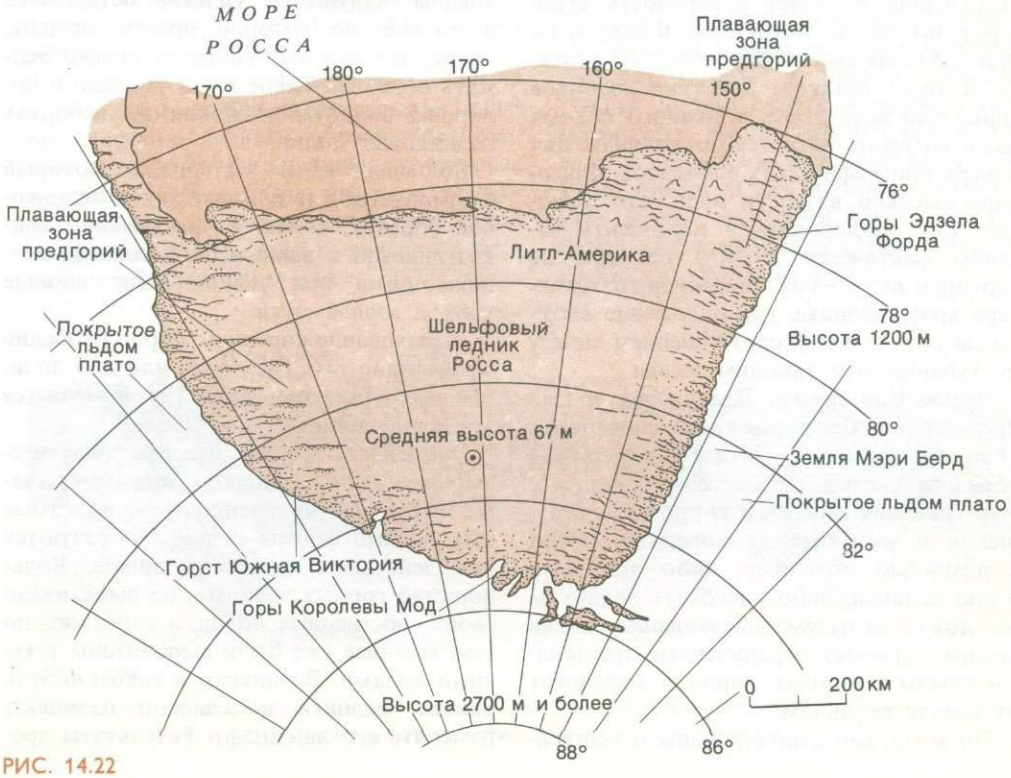


РИС. 14.22
Карта шельфового ледника Росса в Антарктиде – плавающей массы льда толщиной около 300 м, которая покрывает площадь более 600 000 км². (С карты Л. М. Гулда.)

Центральное, похожее на купол ледовое плато достигает 3000 м в высоту, что соответствует мощности льда в этом районе. Только гористый край острова свободен ото льда, но даже здесь большая часть долин заполнена ледниками, которые протягиваются от огромной массы льда, расположенной во внутренней части острова, вниз, к морю (рис. 14.21).

Антарктида занимает площадь около 15 млн. км^2 – больше, чем США и Мексика вместе взятые, – и почти вся покрыта льдом. Этот ледниковый щит в семь с лишним раз больше Гренландского, поверхность у него не такая ровная, как у Гренландского, поскольку он во многих местах прерывается горными цепями и группами вершин. Мощность Антарктического ледникового щита меняется от нескольких сотен метров около гор или у его края до 4000 м и более в центральной части щита (рис. 14.18). Антарктический ледниковый покров благодаря огромному объему является самым крупным на Земле резервуаром пресной воды.

Во многих местах ледниковый покров соединяется с *шельфовым льдом*, который формируется там, где крупные ледники, вытекающие из внутренней части материка, выталкивают свой лед в море. Часто лед попадает в глубокую воду и всплывает. Шельфовый ледник Росса, на котором расположена станция Литтл-Америка, занимает половину моря Росса (рис. 14.22). Его обращенная к морю поверхность представляет собой ледяной уступ, высота которого постоянно равна почти 60 м. Здесь крупные глыбы льда откалываются и уплывают в море в виде гигантских *айсбергов*; некоторые из них достигают более 100 км в поперечнике.

ЛЕДНИКОВАЯ ЭРОЗИЯ И ОСАДКОНАКОПЛЕНИЕ

Оледенение изменяет поверхность суши в результате как эрозии, так и аккумуляции, создавая своеобразные формы рельефа и типы осадков. Действие ледников уникально вследствие огромного объема льда, который движется по долинам или поверх орографических элементов, благодаря высокой вязкости льда, что помогает ему эродировать и переносить частицы фактически любого размера, не сортируя их, и из-за динамичного характера краев ледника, где отложение материала определяется соотношением между поступающим и тающим льдом.

Ледниковая эрозия. Ледниковая эрозия происходит в основном тремя способами: 1) путем удаления рыхлого материала, образовавшегося на месте в результате выветривания; 2) путем коррозии – разрушения и выпахивания коренных пород с помощью обломков, либо вмерзших в дно ледника, либо влекомых ледником по ложу; 3) путем выпахивания, когда ледник отрывает ограниченные трещинами глыбы коренных пород и переносит их вместе со льдом.

По тому, как отполированы и исштрихованы валуны и гальки, оставшиеся в долине, по которой прошел ледник, видно, что лед был способен крепко держать обломки. Такие же штриховка и полировка обнаруживаются на дне и бортах ледниковых долин.

Большая часть материала, который формируется в результате такой ледниковой абразии, является чрезвычайно тонкозернистой и выносится потоками, возникающими при таянии льда, в виде тонкой *горной муки*.

Выпахивание коренных пород особенно эффективно там, где борта или дно долины неровные, или там, где изменяется крутизна долины.

Эрозионные формы рельефа. Фактически все типы ледников вызывают заметные изменения ландшафта, но самые живописные формы рельефа образуются под действием горных ледников. Большинство горных ледников не выпахивало своих собственных долин, а двигалось по тем, которые уже были выработаны текучими водами. Возникнув в каком-нибудь районе, ледники немедленно начинают изменять его ландшафт. Результаты эро-

зии под действием долинных ледников настолько характерны и так сильно отличаются от результатов воздействия других градационных агентов, что ледниковую долину легко узнать, даже если ледник, который ее сформировал, исчез совсем.

В долинах, которые в течение долгого времени были заняты ледниками, вместо форм, образующихся при обычном атмосферном выветривании и речной эрозии, возникают формы рельефа, высеченные льдом. Молодая речная долина в поперечном сечении, как правило, имеет V-образную форму, но когда по такой долине проходит ледник, ее борта и дно подвергаются эрозии, и в результате формируется *U-образная долина* с плоским дном (рис. 14.23, 14.24).

Поскольку лед – твердое вещество и не так подвижен, как вода, он не может легко огибать крутые излучины, выработанные рекой, существовавшей до ледника. В результате ледник стремится срезать небольшие выступы и в конце концов размолоть их, исштриховывая долину и оставляя *усеченные отроги*, которые называют также *ограниченными отрогами*.

У верхних концов ледниковых долин на горных склонах благодаря выпахивающему действию ледника образуются похожие на амфитеатры впадины, окруженные крутыми скалами. Они называются *ледниковыми цирками* и представляют собой одну из наиболее ясно выраженных особенностей оледенения (рис. 14.25). Так как ледниковые цирки постепенно расширяются, углубляются и разрастаются вверх, цирки, расположенные на разных склонах горного хребта или горы, могут в конце концов соединиться. Пространство между такими цирками становится все уже, и здесь в конце концов остаются острые зазубренные *гребни* и *пирамидальные вершины*, такие, как, например, гора Маттерхорн в Швейцарских Альпах (рис. 14.23).

Для дна ледниковой долины характерны куполовидные выступы, которые имеют гладкий склон с той стороны, откуда двигался ледник, и шероховатый или зазубренный склон с противоположной стороны, что обусловлено ледниковым выпахиванием. Такие структуры называют *бараньими лбами*.

В нормальной речной системе притоки впадают в главную долину на одном уровне с главной рекой. Если такая речная сеть заполняется ледниками, то главная долина вследствие большего объема льда будет углубляться быстрее, чем боковые долины. Когда ледники отступят, окажется, что притоки располагаются выше главного русла. На многих горных реках разница в высоте долин измеряется сотнями метров, а иногда превышает 1000 м. Долины, разгружающиеся гипсометрически выше главного русла, называются *висячими долинами* (рис. 14.24, 14.26), и реки из них низвергаются в главную долину каскадами или в виде водопадов, как, например, в случае знаменитого Йосемитского водопада.



РИС. 14.23

Диаграмма, на которой показаны пространственные соотношения форм рельефа, образовавшихся в результате горного оледенения.

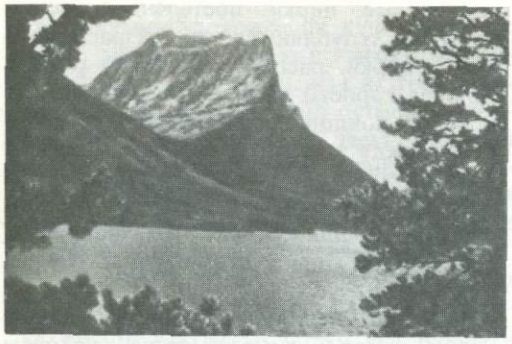


РИС. 14.24
Гора Цитадель в национальном парке Глейшер – хребет с узким как нож гребнем, который отделяет U-образную висячую долину реки Виргиния-Крик от соседней с ней (справа) долины. На переднем плане – озеро Сент-Мари-Лейк в ледниковом троге.

Формы рельефа, образующиеся в районах материкового оледенения, подробно описаны в ряде работ; они не представляют такого живописного зрелища, как те, что сформировались под действием горных ледников. Ледниковое выпахивание происходит лишь на участках развития крутопадающих или сильно трещиноватых пород или на холмах, через которые переползает ледник. В тех местах, где движение льда происходит параллельно древней гидросети, долины могут



РИС. 14.25
Озера в ледниковых цирках – озеро Эллен Уилсон и озеро Линкольн с горой *Маунт-Джексон позади них, национальный парк Глейшер, шт. Монтана.* На склоне горы видны небольшие висячие ледники, один из них – над озером в правой нижней части снимка. (Фотография Барлингтонской северной железной дороги.)



РИС. 14.26
Гора Атабаска и занятые *ледниками висячие долины* (на заднем плане), которые являются боковыми по отношению к леднику Атабаска (на переднем плане); языки льда спускаются из обширного ледяного поля Колумбия, национальный парк Джаспер, провинция Альберта. (Фотография Британских фотолабораторий.)

выпахиваться и углубляться, а там, где лед перемещается поперек речной сети, ледниковые осадки накапливаются в долинах, сглаживая таким образом рельеф.

Из всех особенностей материкового оледенения самой распространенной является *ледниковое выпахивание*, действие которого направлено на формирование низменностей, очищенных от почвы и рыхлого материала, образовавшегося на поверхности коренных пород в результате выветривания. Это удаление почвенного слоя сразу с площадей в тысячи квадратных километров является важным событием в процессе эрозии и аккумуляции материала.

Накопление ледниковых отложений. Материал, эродируемый и транспортируемый ледником, должен в конце концов отложиться либо у краев ледника, либо за его пределами, если происходит дальнейший перенос материала с помощью ветра и воды. Груды обломков, откладываемые непосредственно льдом, называются *ледниковыми (гляциальными) отложениями*, а материал, который откладывается ледниковыми потоками, носит название *флювиогляциальных осадков*.

Термин *ледниковые отложения (ледниковые наносы)* обычно применяют для описания всех отложений, которые переносятся и откладываются ледником. Такие отложения могут быть неслоистыми, и в этом случае их называют *моренной*, или *валунной*, *глиной*, или слоистыми. Отсутствие слоистости указывает на то, что материал был отложен непосредственно льдом и не испытал воздействия текущей воды. Неслоистые отложения образуют специфические формы рельефа, которые зависят от соотношения между льдом в леднике и осадком. Слоистость ледниковых отложений свидетельствует о влиянии воды, которая текла по льду, внутри его, под ним или у краев ледника. В зависимости от соотношения между льдом и текущей водой слоистые отложения в свою очередь образуют характерные формы рельефа.

Неслоистые ледниковые отложения. Крупные валуны, переносимые ледниками, называются *эрратическими*. Они откладываются непосредственно из глетчерного льда, и обычно их обнаруживают в сотнях километров от коренных пород, из которых они образовались. Один из самых крупных эрратических валунов, известных в США,–это гранитный валун размером 27 × 12 × 9 м у города Мадисон в шт. Нью-Гэмпшир. Эрратические валуны располагаются в таких местах, куда никакие агенты транспортировки, кроме ледников, не могли их доставить.

Переносимый ледником материал называется *мореной*. Морены можно разделить на *донную (основную) морену*, которая откладывается под наступающим льдом и во время таяния ледника, *конечную морену*, которая откладывается там,



РИС. 14.27
Один из ледников Аляски с многочисленными притоками, образующими систему циркообразных долин с узкими крутостенными ущельями в нижней части. (Фотография Военно-воздушных сил США.)

где количество тающего льда равно количеству льда, поступающего вследствие течения ледника, *боковую морену*, которая образуется по краям долинного ледника и параллельна его границам, *срединную морену*, которая возникает, когда объединяются две боковые морены сливающихся ледников (рис. 14.17, 14.27, 14.28). Донная морена представляет собой наиболее важные и шире всего распространенные отложения покровных материковых ледников. Она образует чехол изменчивой мощности, для которого характерны многочисленные крупные и мелкие впадины, занятые топями, болотами и озерами, без сколько-нибудь заметной связи между водотоками и более возвышенными участками рельефа. В некоторых областях развития донной морены встречаются гладкие овальные холмы, сложенные валунной глиной, которые в горизонтальном сечении имеют форму линз. Их длинные оси параллельны направлению движения льда. Такие холмы носят название *друмлинов* (рис. 14.29), высота их обычно достигает 10–50 м,



РИС. 14.28
Схематическое изображение ледника, на котором показано положение трех типов морены.



РИС. 14.29
Друмлин – сложенный валунной моренной глиной холм овальной формы около Глизондейла в шт. Массачусетс. Длинная ось друмлина параллельна движению льда. Часто более пологий склон друмлина находится с противоположной от ледника стороны. (Фотография У. Ч. Олдена, Геологическая служба США.)

ширина – 100 м, а длина – 1000 м. Механизм формирования друмлинов пока неясен, но расположение этих холмов указывает на то, что условия, благоприятные для их образования, существовали только во время наступания ледников.

Конечная, боковая и срединная морены встречаются в виде гребней, выделяющихся в рельефе; они формируются в период таяния ледников. Конечная морена как ледниковое образование накапливается во время таяния конца ледника. Когда фронт льда относительно неподвижен, т.е. когда скорость таяния равна скорости течения ледника, этот материал может отложиться в виде высокого вала, параллельного границе льда. Конечные морены позволяют нам установить максимальное продвижение ледника и выделить стадии, в течение которых фронт ледника находился на одном месте (рис. 14.30).

Боковая морена растет за счет обломков, накапливающихся по краям долинного ледника. Когда лед тает, боковые морены остаются в виде валов или террас по краям горных долин с крутыми склонами. В большинстве ледниковых долин боковые морены выражены лучше конечной и донной морен.

Если уклон долины не слишком велик, то послеледниковые потоки оставляют большую часть материала там, где ледник его отложил; в таких местах боковые и конечная морены соединяются и образуют непрерывный вал, или дамбу, попе-

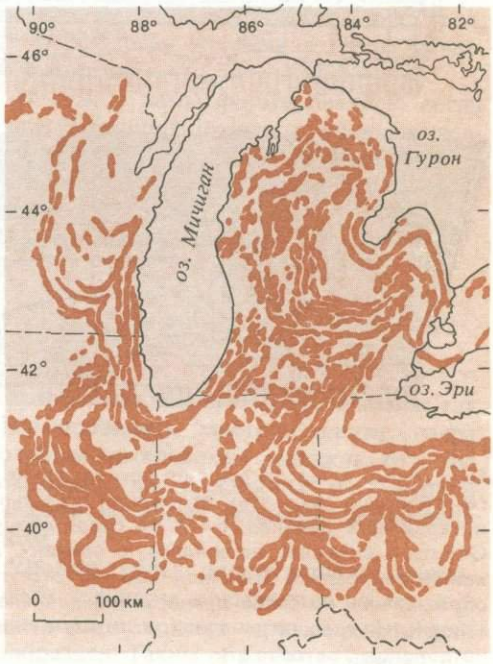


РИС. 14.30
Карта, на которой показано положение конечной морены и многочисленных стадиальных морен растаявших ледников на севере центральных районов США. Фестоны очерчивают положение фронтальных частей ледниковых языков, которые существовали раньше. (По карте ледниковых отложений Северной Америки, изданной Американским геологическим обществом.)

рек долины. В отгороженных этими валами впадинах возникают озера, которые постепенно заполняются осадками и превращаются в болота или луга. Луга занимают плоские днища многих ледниковых долин, подчеркивая U-образный характер ледниковой долины и создавая идеально ровные площадки, похожие на газоны.

Слоистые ледниковые осадки. Вода, которая образуется из тающего льда у края ледника, течет через конечную морену одним или несколькими потоками, а не в виде непрерывного слоя воды. Вода уносит тонкообломочный материал – песок, алеврит и горную муку – от границы льда и откладывает его в форме полого наклоненного аллювиального конуса, который называют *зандровой равниной*. Самый тяжелый материал, такой, как галька, гравий и грубый песок, откладывается возле конечной морены. Затем осаждаются более мелкий песок и алеврит. Горная мука настолько тонка, что река продолжает нести ее, и обычно горной муки в воде содержится так много, что она окрашивает ледниковую реку в молочно-белый или серый цвет. Благодаря действию текущей воды эти осадки сортируются и откладываются в виде слоев, поэтому их легко отличить от морены.

На зандровых равнинах в результате таяния крупных масс льда, оставшихся здесь при отступании главного ледника, часто возникают небольшие бессточные впадины. Эти впадины называются *ледниковыми котловинами*, а те области развития зандров, где таких котловин много, носят название *западинных зандровых равнин* (рис. 14.31).

В тех местах, где потоки воды текут по ледниковому щиту, внутри его или под ним, текущая вода действует как агент, сортирующий осадки и формирующий их слоистость. После того как лед растает,

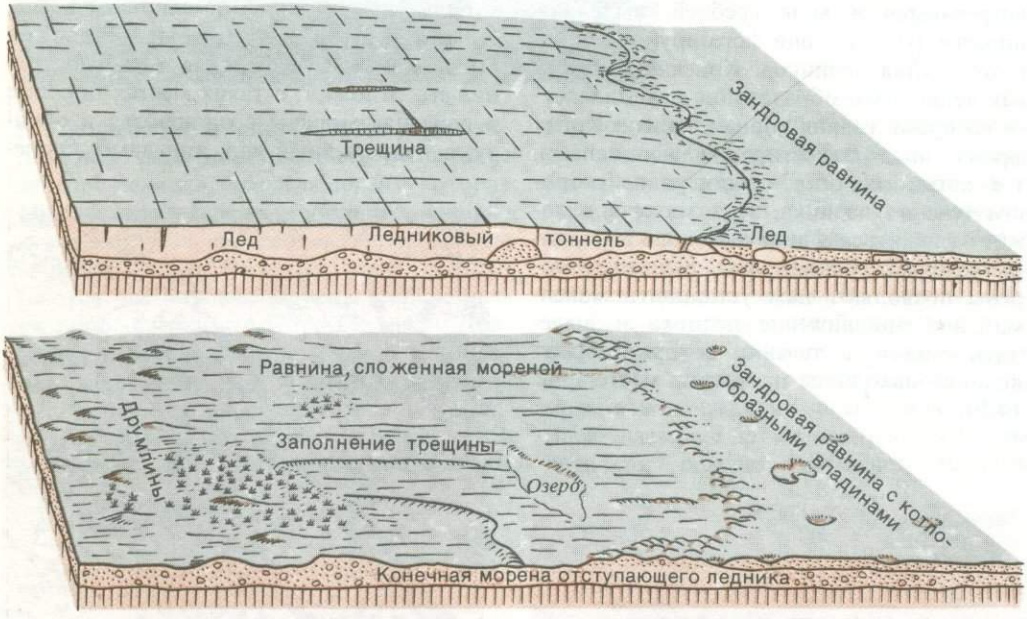


РИС. 14.31

Диаграмма, иллюстрирующая расположение разных типов ледниковых отложений и генетическую связь этих отложений с разными частями ледника. *а* – край отступающего материкового ледника; *б* – та же самая площадь после того, как лед растаял. Обратите внимание на зандровую равнину, покрытую котлообразными впадинами, на холмистый рельеф конечной морены отступающего ледника, на болота и озера, которые образовались на слабо дренируемой равнине, сложенной мореной, на друмлины, на заполнение трещин и на озы, которые отложились в ледовых тоннелях. (По материалам Треуорта.)

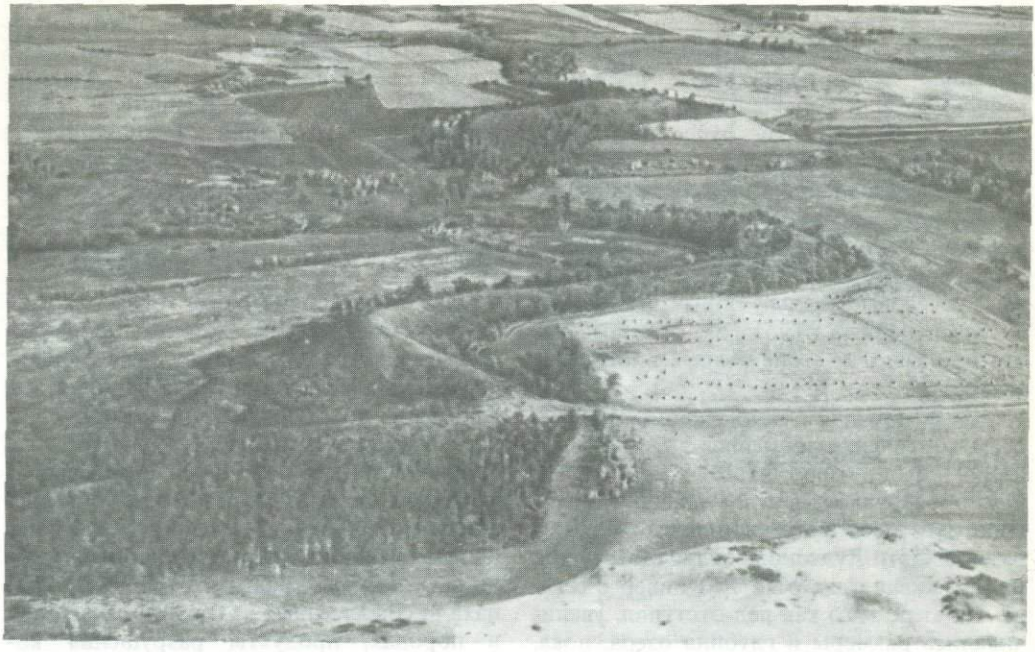


РИС. 14.32

Оз, или «змееподобный вал», около Форт-Рипли в шт. Миннесота (вид с воздуха). По-видимому, озы соответствуют прежним рекам, которые текли подо льдом или по трещинам. (Фотография У. С. Купера.)

остаются извилистые валы, сложенные неправильно слоистым песком и гравием (рис. 14.32). Эти валы, которые называются *озами*, могут протягиваться на многие километры в длину, а ширина их обычно достигает лишь 15–20 м.

Там, где у конца ледника талые воды текли по поверхности льда или внутри его, гравий и песок накапливаются в виде конусообразных холмов, которые называются *камами*. Камы образуются, вероятно, вдоль поясов развития конечных морен и могут располагаться в виде гряд, по морфологии напоминая гряды конечной морены.

И озы, и камы формировались, когда существовавший прежде покровный ледник отступал или стоял на месте, и если когда-нибудь материковые ледники будут наступать, то они, вероятно, уничтожат эти особенности рельефа.

ВРЕ́МЕННЫЕ ЛЕДНИКОВЫЕ ОЗЕРА

Поскольку при материковом оледенении ледники покрывают всю сушу, водоразделы между речными бассейнами также находятся подо льдом. Если поверхность земли перед ледником наклонена к краю льда, то она подпруживает воду, которая образуется в результате таяния льда, и препятствует ее дальнейшему течению. Таким образом вода может затопить большие площади, и они превратятся в краевые ледниковые озера. Именно так сформировались многочисленные озера по краям материковых ледников, которые покрывали часть Европы и Северной Америки во время недавней ледниковой эпохи.

Уровень воды, подпруженной материковым ледником, повышается до тех пор, пока вода не потечет через самый низкий водораздел. Таким образом возникает ис-

ток новой реки, которая вырабатывает себе новое русло; это русло может под большим углом пересекать прежнюю речную сеть. В ряде районов, где сейчас нет никаких рек, такие русла были врезаны в коренные породы.

О существовавших прежде временных ледниковых озерах свидетельствуют изменения в рисунке гидросети, признаки береговой линии, например песчаные пляжи, береговые валы, бары и дельты, а также озерные отложения, которые часто встречаются выше современного уреза воды.

Самым крупным на Северо-Американском континенте временным ледниковым озером было озеро Агассис (рис. 14.33). Оно образовалось, когда ледниковый покров, центр которого находился в юго-западной части Гудзонова залива, отступал, подпруживая сток реки Ред-Ривер с севера. По мере того как лед отступал, увеличивались размеры и глубина озера, пока, наконец, уровень воды не поднялся настолько, что вода потекла через главный водораздел в реку Миннесота там, где сейчас находится город Браунс-Валли, шт. Миннесота. При максимальном уровне воды озеро Агассис достигало 1100 км в длину и 400 км в ширину и занимало площадь свыше 250 000 км^2.



РИС. 14.33
Карта ледникового озера Агассиз при наиболее высоком уровне воды. (По материалам Апема, Геологическая служба США.)

Пока ледник продолжал препятствовать стоку в северном направлении и талые воды поступали в озеро Агассис, избыток воды, переливавшийся через край озера и стекавший в реку Миннесота, образовывал широкий турбулентный поток, который иногда называют ледниковой рекой Уоррен; этот поток прорезал русло на 15–27 м ниже современного уреза воды в реке Миннесота и вливался в реку Миссисипи. Позже, когда открылся сток талых вод в северном направлении, озеро Агассис исчезло, река Уоррен пересохла и ее долина стала заполняться осадками, по которым проложила свой путь современная река.

Великие озера своими размерами и значением в большой мере обязаны влиянию ледниковой эрозии и аккумуляции на среднюю и верхнюю части бассейна реки Святого Лаврентия. Ледники выпахали современные котловины этих озер в породах, продукты разрушения которых присовокупились к остальному грузу обломочного материала ледника и как часть ледниковых осадков были отложены дальше к югу и западу. Когда материковый ледник отступал, а сток воды в реку Святого Лаврентия еще был блокирован льдом, талые воды краевых озер, возникших в свободных ото льда юго-западных частях этих котловин, переливались через водоразделы и поступали в реки, текущие на юг (рис. 14.34).

Поблизости от Великих озер, например у озера Верхнего в шт. Миннесота и у озера Эри в шт. Огайо, все еще ясно видны древние береговые линии, пляжи и береговые уступы этих краевых ледниковых озер. Положение пляжей фикси-

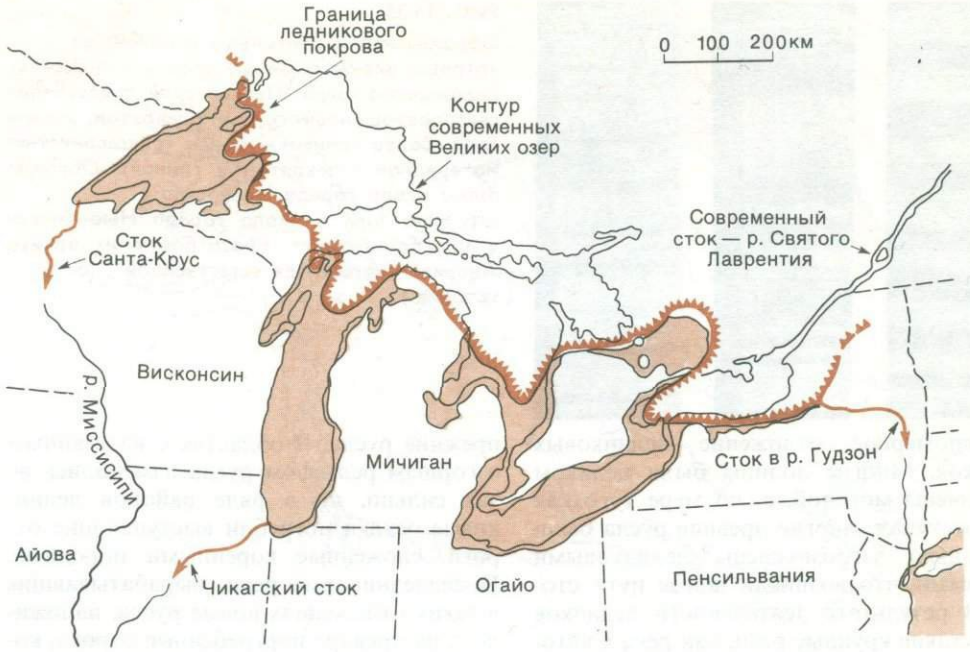


РИС. 14.34

Карта, на которой показан сток избыточной воды из Великих озер до того, как растаял лед, преграждавший сток в реку Святого Лаврентия. (По Тейлору, 1927.)

рует различные уровни воды в озерах, которые устанавливались по мере того, как ледниковый покров таял и последовательно открывались гипсометрически все более низкие каналы стока; в результате уровень воды в озерах понижался до тех пор, пока, наконец, ото льда не освободилось русло и устье самой реки Святого Лаврентия и не установился сток в теперешнем направлении. Эти изменения изучены детально и представляют замечательную главу истории оледенения этого района.

Осадки ледниковых озер. Холодные воды краевых ледниковых озер обладают большей плотностью, чем вода при средних температурах. По этой причине осаждение алеврита и глинистых частиц в них было замедленным, и тонкий осадочный материал во взвешенном состоянии рассеивался по озеру и откладывался на всем дне озерной котловины. Тонкозернистый материал откладывался год за годом в виде *ленточных глин,* состоящих из ясно обособленных слоев, получивших название *годичных слоев* (рис. 14.35). Годичный слой состоит из двух различающихся тонких слойков, один из которых образовался летом, другой – зимой. Летний слоек представлен светло-окрашенным грубым алевритом, а зимний, более темный по цвету, образован более тонким материалом и имеет меньшую мощность. Следовательно, каждый слой ленточных глин соответствует одному году.

Поскольку слои ленточных глин различаются по мощности и другим характеристикам, можно провести корреляцию этих слоев от озера к озеру в том направлении, в котором отступал лед, и таким образом шаг за шагом сосчитать количество лет. Именно так вычислили скорость отступания последнего материкового льда. В долине реки Коннектикут эта скорость составляла в среднем примерно 70 м/год в течение 4300 лет.

Отклонение рек. На рельеф областей, испытавших оледенение, сильно влияет

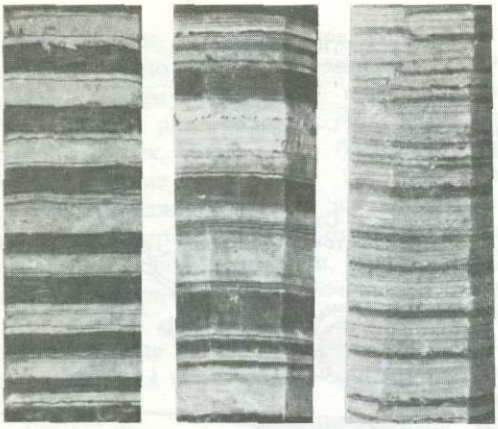


РИС. 14.35
Образцы керна ленточных осадков, на которых видны сезонные слои в отложениях ледникового озера. Летний слой представлен светлоокрашенным грубым алевритом, зимний слой – более темным и более тонкозернистым материалом (алевритом и глиной). Образцы взяты около города Хаверстро в шт. Нью-Йорк и около города Нью-Хейвен в шт. Коннектикут. (*Фотография из архива Американского музея естественной истории.*)

неравномерное отложение ледниковых осадков. Многие долины были целиком заполнены мореной, и, по мере того как лед отступал, многие древние русла были настолько загромождены ледниковыми наносами, что возникли новые пути стока. В результате деятельности ледников даже такие крупные реки, как река Святого Лаврентия, Миссисипи, Огайо и Миссури, в некоторых местах покинули свои прежние русла. В областях с изрезанным и горным рельефом русла изменились не так сильно, но в ряде районов ледниковые осадки погребли выступающие отроги, сложенные коренными породами. Послеледниковые реки, вырабатывавшие в таких отложениях новые русла, наложились на древние поргребенные отроги, которые раньше представляли собой участки бортов долин.

ЛЕДНИКОВЫЕ ЭПОХИ И ИЗМЕНЕНИЕ КЛИМАТА

Считается, что либо современные ледники находятся в стадии отступания, либо сейчас происходит новое оживление процессов последней плейстоценовой ледниковой эпохи. Лед все еще покрывает примерно треть площади, которую занимали материковые ледники во время их последнего крупного продвижения, имевшего место (как определили с помощью радиоуглеродного метода) около 10 000 лет назад.

О том, что на севере провинции Онтарио современные условия близки к ледниковым, свидетельствует тот факт, что к югу и западу от Гудзонова залива и *залива Джеймса весной задерживается таяние* снежных наносов, многие небольшие озера медленно освобождаются ото льда и многолетняя мерзлота залегает в почве лишь в метре или около того от поверхности. *В некоторых горных долинах* Новой Англии последние пласты снега тают всего за месяц до первого зимнего снега. По-видимому, бóльшая часть этой территории только сейчас освобождается от влияния последнего оледенения. Понижение среднегодовой температуры всего на несколько градусов или увеличение количества выпадающего зимой снега могут восстановить ледниковые условия на обширной площади.

Плейстоценовый ледниковый покров Северной Америки возник на севере и *северо-востоке континента и разрастался* во всех направлениях (рис. 14.36). На северо-запад он простирался до Северного Ледовитого океана, а на юго-восток – до долин рек Миссури и Огайо. Небольшие *ледяные поля образовались в горах на* территории западной Канады. Они были представлены двумя десятками долинных ледников и ледником предгорий, которые во многих местах соединялись, образуя *почти непрерывный ледяной покров.* Большое снежное и ледяное поле Колумбия, которое в настоящее время суще-

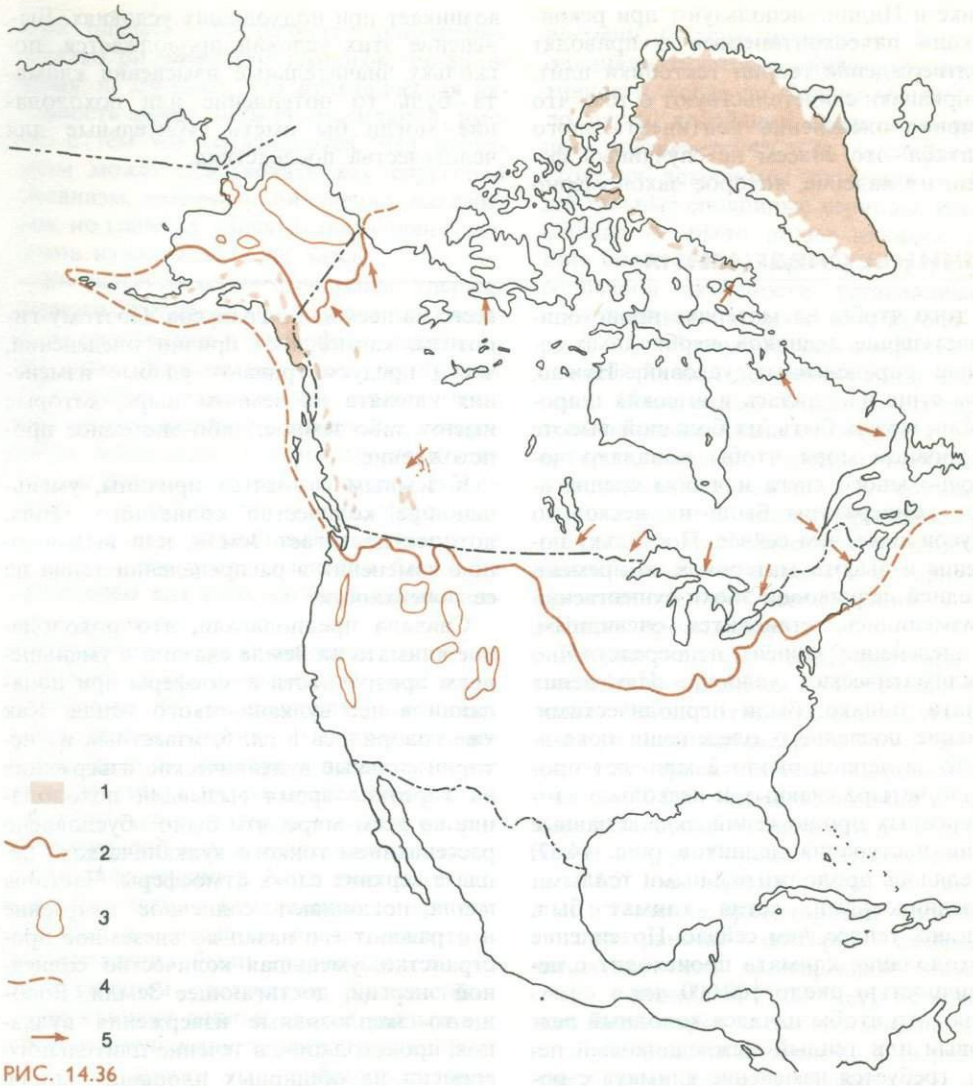


РИС. 14.36

Карта, на которой показаны современные ледники и граница прежнего оледенения в Северной Америке. *1* – современный лед; *2* – южная и северо-западная границы сплошного льда в плейстоцене; *3* – области развития альпийских ледников за пределами материкового ледяного покрова; *4* – шельфовый ледник или фронт ледника в эпохи, когда уровень льда понижался; *5* – общее направление течения льда.

ствует в канадской провинции Британская Колумбия (рис. 14.26), представляет собой либо остаток этой огромной массы льда, либо новый ледниковый покров, возникший на ее месте.

Геологические данные показывают, что за миллионы лет до плейстоценовой ледниковой эпохи было много оледенений. Сведения о них отрывочны, так как эрозия, как правило, уничтожает результаты работы льда, но доказательства того, что оледенения имели место, все-таки сохранились в виде литифицированных валунных моренных глин (*тиллита*) и исштрихованных и отполированных поверхностей. Тот факт, что эти признаки оледенений обнаружены на разных материках – в Австралии, Южной Америке,

Африке и Индии,– используют при реконструкции палеоконтинентов и приводят в подтверждение теории тектоники плит. Эти признаки свидетельствуют о том, что обширное оледенение континентального масштаба – это совсем не случайный феномен, но явление, которое закономерно возникает при подходящих условиях. Выяснение этих условий продолжается, поскольку значительные изменения климата – будь то потепление или похолодание – могли бы иметь губительные для человечества последствия.

ПРИЧИНЫ ОЛЕДЕНЕНИЯ

Для того чтобы на материке происходило наступание ледников, необходимо сочетание определенных условий. Нужно, чтобы суша находилась в высоких широтах или, может быть, на большой высоте над уровнем моря, чтобы выпадало *достаточно много снега и чтобы среднегодовые температуры были на несколько* градусов ниже, чем сейчас. Поскольку положение и высота материков со времени последней ледниковой эпохи существенно не изменились, становится очевидным, что оледенение зависит непосредственно от климатических условий. Изменения климата, однако, были периодическими. Изучение последнего оледенения показало, что за период около 2 млн. лет произошло четыре главных и несколько второстепенных продвижений льда. Главные стадии наступания ледников (рис. 14.37) разделялись продолжительными теплыми межледниковьями, когда климат был, очевидно, теплее, чем сейчас. Потепление и похолодание климата происходит с периодичностью около 100 000 лет.

Для того чтобы начался холодный ледниковый или теплый межледниковый период, требуется изменение климата с понижением или повышением температуры всего на несколько градусов. Поэтому гипотезы, касающиеся причин оледенений, часто предусматривают слабые изменения климата на земном шаре, которые имеют либо земное, либо внеземное происхождение.

К земным относятся причины, уменьшающие количество солнечного тепла, которое достигает Земли, или вызывающие изменения в распределении тепла на ее поверхности.

Сначала предполагали, что похолодание климата на Земле связано с уменьшением прозрачности атмосферы при попадании в нее вулканического пепла. Как уже говорилось в гл. 6, известные из истории сильные вулканические извержения на короткое время вызывали похолодание во всем мире, что было обусловлено рассеиванием тонкого вулканического пепла в верхних слоях атмосферы. Частицы пепла поглощают солнечное излучение и отражают его назад во внеземное пространство, уменьшая количество солнечной энергии, достигающее Земли. Вообще-то эксплозивные извержения вулканов, происходящие в течение длительного времени на обширных площадях, могут вызвать такое похолодание климата на



РИС. 14.37
Схематическое изображение положения границ ледниковых осадков четырех главных стадий оледенения в центральных районах Северной Америки. (По карте ледниковых отложений США к востоку от Скалистых гор, изданной Американским геологическим обществом.)

всей планете, что начнется оледенение. Однако большинство геологов, по-видимому, не считают, что вулканическая активность могла быть столь сильной; вместе с тем все соглашаются, что вулканизм может действовать как спусковой механизм, вызывающий начало оледенения, но главные причины наступания ледников нужно искать не здесь.

Уменьшение количества тепла, удерживаемого Землей, связано также с изменением содержания в атмосфере углекислого газа. Углекислый газ пропускает в атмосферу солнечное излучение с меньшей длиной волны, но замедляет потерю тепла. Благодаря углекислому газу климат на Земле становится теплее, и уменьшение его количества в атмосфере должно вызвать похолодание. Однако не доказано, что этих изменений было бы достаточно для того, чтобы вызвать ледниковую эпоху.

Изменения в распределении тепла на поверхности Земли связаны прежде всего с переменой направления океанских и воздушных течений. Эти течения переносят тепло от экватора к полюсам, и изменение схемы их распределения могло бы вызвать похолодание климата в приполярных районах и как следствие этого наступание ледников. Хотя данные об изменении течений в ледниковые периоды и имеются, создается впечатление, что эти изменения были скорее следствием, чем причиной оледенения. Кроме того, существующие данные скорее указывают на общее понижение температуры на Земле, а не просто на перераспределение тепла.

Сегодня большинство ученых обращаются к внезапным причинам оледенений. Последние связывают с вариациями солнечной активности или с известными изменениями положения Земли относительно Солнца. Хотя обе эти гипотезы не новы, последние астрономические и океанографические наблюдения, кажется, свидетельствуют в пользу обеих гипотез.

Раньше Солнце считали очень стабильной звездой. Его стабильность подтверждается геологическими данными о непрерывности геологической и биологической эволюции. Тем не менее известно, что на сравнительно коротких отрезках времени Солнце изменчиво. В течение одиннадцатилетнего цикла солнечной активности, когда на Солнце меняется число пятен, колебания солнечного излучения достигают 4%. За последние три столетия астрономы отмечали и более длительные спокойные периоды, когда на Солнце не было видно никаких пятен. Еще более длиннопериодные флуктуации солнечной активности устанавливаются по изменению количества изотопа углерода ^{14}C, образующегося в верхней части атмосферы под действием солнечных частиц. Измеренные вариации солнечной активности несильно отличаются от тех, которые, согласно оценкам, необходимы для начала оледенений. К сожалению, данных об этих длиннопериодных флуктуациях все еще недостаточно, чтобы доказать возможную связь с материковым оледенением, но исследования в этой области продолжаются.

Вторая гипотеза о внеземных причинах оледенения опирается на изменение положения Земли относительно Солнца по трем разным параметрам. Это 1) изменение эксцентриситета земной орбиты (с периодом 90 000 лет), 2) изменение угла между экватором и плоскостью вращения Земли вокруг Солнца (меняется от 21,5° до 24,5° за период около 40 000 лет) и 3) изменение ориентировки земной оси в пространстве (которое называется *прецессией*, или *предварением равноденствий*, с периодом 21 000 лет). Каждый из этих параметров имеет тенденцию изменять распределение солнечной энергии на поверхности Земли, и, действуя всегда совместно, они то усиливают, то гасят влияние друг друга. Время от времени зимы могут быть холодными, а летние периоды между ними – жаркими, или зимы – мягкими, а летние периоды – холодными. Хотя среднегодовые температуры остаются теми же самыми, считается, что холодное лето является критическим и позволяет снегу не растаять и просуществовать в течение всего года. Если снег накапливается, это приводит к формированию ледников, которые продвигаются вперед и вследствие того, что снег отражает солнечное тепло, еще больше охлаждают поверхность Земли. Со-

гласно этой модели, эпохи оледенения заканчиваются, когда снова наступают холодные зимние и жаркие летние месяцы, что позволяет снегу растаять за лето. Жаркое лето заставляет ледяной покров быстро сокращаться.

С тех самых пор, как были высказаны предположения об астрономической природе причин оледенения, они подвергались широкой критике, но данные, полученные в последнее время с помощью глубоководного бурения, указывают на хорошее соответствие между астрономическими циклами и периодами продвижения и отступания ледников.

Причины оледенения все еще до конца не выяснены, но они вызывают большой интерес, поскольку судьба значительной части населения Земли зависит от климата. Мы живем в относительно благоприятный период развития нашей планеты. Но перспективу наступания ледников, которые покрыли бы большую часть плодородных обрабатываемых земель, нельзя назвать приятной. С другой стороны, если бы растаяли гигантские ледниковые покровы Гренландии и Антарктиды, в океаны поступило бы так много воды, что многие из густонаселенных районов Земли оказались бы затопленными.

В обоих случаях великие ледниковые эпохи напоминают нам, насколько хрупок и преходящ наш мир.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ

Лед и ледники представляют собой важные факторы процессов градации (сглаживания) на Земле. Работа льда обусловлена расширением воды при замерзании и расширением и сжатием льда при изменении температуры. Ледники воздействуют на сушу вследствие того, что текут под влиянием силы тяжести.

Лед на поверхности озер раздвигает обломочный материал, в результате чего вокруг озер образуются озерные валы. В море прибрежный лед и льдины служат как бы плотами, на которых разносится обломочный материал. Речной лед выпахивает и разносит обломки пород, образует ледяные заторы и вызывает наводнения. Лед, содержащийся в земле, приводит к дезинтеграции пород посредством морозного расклинивания и вспучивания и способствует разрыхлению и гравитационному переносу масс. Многолетняя мерзлота изменяет поверхность земли за счет солифлюкции, формирования каменных глетчеров и особенностей структурного грунта, таких, как каменные (мерзлотные) полигоны, каменные полосы и гирлянды.

Постоянная аккумуляция снега приводит к образованию снежных полей; снег испытывает перекристаллизацию, превращаясь в зернистый фирновый снег, который с увеличением толщины переходит в способный течь лед. Ледники перемещаются путем перекристаллизации, скольжения по плоскостям внутри ледника и по поверхности ложа. Верхняя часть толщи льда довольно хрупка и характеризуется крупными и мелкими трещинами. Нижняя часть толщи льда перемещается посредством пластического течения.

Ледники текут из зоны аккумуляции в зону разгрузки, где они разрушаются в результате таяния и абляции. Выделяют горные, или долинные ледники, ледники предгорий и ледниковые покровы (щиты), или материковые ледники.

Горные ледники выскабливают и выпахивают долины, по которым они текут, превращая их в долины отчетливой U-образной формы, формируют цирки и гребни, пирамидальные вершины и висячие долины.

Предгорные ледники представляют собой слившиеся воедино расширения долинных ледников вдоль фронта гор в высоких широтах.

Материковые ледники, например ледниковые покровы Гренландии и Антарктиды, также эродируют поверхность суши посредством выпахивания, соскабливания и выдалбливания. Подобно другим ледникам, они откладывают гетерогенную несортированную неслоистую валунную глину в виде конечной, боковой и донной морен, которые отмечают про-

движение и отступание ледников. Образующаяся при таянии ледников вода откладывает слоистые осадки, в том числе зандры, озы и камы.

Временные ледниковые озера, такие, как озеро Агассис и озеро – предшественник Великих озер, формировавшиеся вдоль границ ледниковых покровов, изменили системы дренажа доледниковой эпохи. Ленточные глины, волноприбойные уступы, осадки пляжей, дельт и русел стока дают представление о размерах этих огромных озер.

В плейстоценовое время материковое оледенение распространялось на бóльшую часть территории Канады и северных районов США. Аналогичные ледники появлялись в Северной Америке и на других континентах и в некоторые древние геологические эпохи. Причины оледенений не установлены. На возникновение ледников могли влиять многие факторы, но в настоящее время наиболее достоверными кажутся гипотезы, согласно которым изменение количества энергии, получаемой Землей, обусловлено внеземными причинами. Зафиксированы колебания энергии, испускаемой Солнцем, и в масштабе геологического времени эти колебания могут быть достаточно велики для того, чтобы возникли более холодные ледниковые периоды, разделенные более теплыми межледниковьями. Другой причиной оледенений могло быть изменение ориентировки Земли относительно Солнца. Хотя при этих циклических изменениях общее количество солнечной радиации, получаемой Землей, остается неизменным, иное распределение энергии может привести к тому, что летние периоды станут более холодными, и таяние снега замедлится, что со временем может вызвать наступание ледников.

ВОПРОСЫ

1. Почему лед плавает в воде?
2. Каким образом лед, образовавшийся в стоячей или проточной воде, ускоряет эрозию?
3. Каким образом лед в грунте ускоряет гравитационный перенос?
4. Чем ледник отличается от снежного или ледяного поля?
5. Что представляет собой зона течения в леднике? Какие факторы способствуют ее формированию?
6. Сравните эрозионные и аккумулятивные формы рельефа, образовавшиеся в результате работы ледников и рек.
7. В чем главное отличие речной долины от ледниковой?
8. Какие данные свидетельствуют о существовании великих ледниковых эпох?
9. Какие высказывались предположения о причинах оледенений?

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Cotton C. A., 1948, Climatic Accidents in Landscape-Making, John Wiley and Sons, Inc., New York.

Crowell J. C., Frakes L. A., 1970, Phanerozoic glaciation and the causes of ice ages, Amer. Jour. Sci., vol. 268, pp. 193–224.

Dyson J. L., 1962, The World of Ice, Alfred A. Knopf, Inc., New York.

Flint R. F., 1971, Glacial and Quaternary Geology, 2d ed., John Wiley and Sons, Inc., New York.

Kamb B., 1964, Glacier geophysics, Science, vol. 146, pp. 353–365.

Kingery W. (ed.), 1963, Ice and Snow – Properties, Processes, and Applications, The M.I.T. Press, Cambridge, Mass. [Имеется перевод: *Кингери В. Д.*, ред., Лед и снег. Свойства, процессы, использование.– М.: Мир, 1966.]

Matsch C. L., 1976, North America and the Great Ice Age, McGraw-Hill Book Company, New York.

Paterson W. S. B., 1969, The Physics of Glaciers, Pergamon Press, Ltd., Oxford.

Turekian K. (ed.), 1971, Late Cenozoic Glacial Ages, Yale Univ. Press, New Haven, Conn.

Wright H. E., Frey D. G. (eds.), 1965, The Quaternary of the United States, Princeton Univ. Press, Princeton, N.J.

Zeuner F. E., 1959, The Pleistocene Period, Its Climate, Chronology and Faunal Successions, Hutchinson and Co., London.



15 ОКЕАНЫ И БЕРЕГА

Роль океанических бассейнов в геологии велика. Они занимают площадь около 361 млн. км^2, что соответствует 70,8% поверхности Земли (табл. 15.1). В них постоянно поступает осадочный материал, часть которого приносится с суши, часть имеет морское происхождение. В океане заключено около 86% общего количества воды на Земле. Океанические воды служат главным источником влаги для атмосферных осадков, которыми питаются реки и поддерживается животная и растительная жизнь. Большая часть этой воды возвращается реками в океан, где груз осадочного материала, захваченного ими по пути, осаждается и в конце концов превращается в осадочные породы. К тому же сам океан дает приют массе организмов, которым принадлежит важная роль в образовании осадков (рис. 15.1).

В этой главе речь идет об особенностях рельефа океанических бассейнов, свойствах и движении океанической воды и геологических результатах воздействия волн и течений на берега.

ОКЕАНИЧЕСКИЕ БАССЕЙНЫ

Методы изучения. Океаническое дно изучается разными способами. Глубина воды определяется акустическим зондированием. Океаническая кора под толщей воды исследуется с помощью отраженных и преломленных сейсмических

Таблица 15.1

Некоторые данные по океанам

Площадь	$261 \cdot 10^6$ км^2
Тихий океан	$180 \cdot 10^6$ км^2
Атлантический океан	$107 \cdot 10^6$ км^2
Индийский океан	$74 \cdot 10^6$ км^2
Средняя глубина	3795 м
Средняя глубина Тихого океана	4028 м
Средняя глубина Атлантического океана	3332 м
Средняя глубина Индийского океана	3897 м
Наибольшая известная глубина	11034 м (Тихий океан)

Максимальные глубины в Тихом океане:

Год измерения	Местонахождение	Корабль	Глубина, м
1923	Желоб Минданао	«Эмден» (Германия)	10497
1952	Желоб Тонга	«Хорайзн» (США)	10882
1959	Марианский желоб	«Витязь» (СССР)	11020
1960	Марианский желоб	«Триест» (США)	11034

Объем $1370 \cdot 10^6$ км^3
Среднее значение солености 34,482‰
Общее количество растворенного вещества $5 \cdot 10^{22}$ г
Среднее значение плотности морской воды 1,025 г/см^3

волн, гравиметрических измерений, магнитометрии, измерения теплового потока и сейсмо-акустического зондирования осадков (рис. 15.2). Самый новейший метод исследования океана заключается в использовании подвижных, управляемых, погружающихся на глубину аппаратов, позволяющих проводить детальные наблюдения и фотографировать с близкого расстояния. Находящиеся внутри акванавты могут манипулировать механическими руками для захвата образцов.

Прежние приспособления для отбора образцов включали пробоотборные трубки, с помощью которых можно было поднимать колонки рыхлых, неконсолидированных осадков длиной в несколько

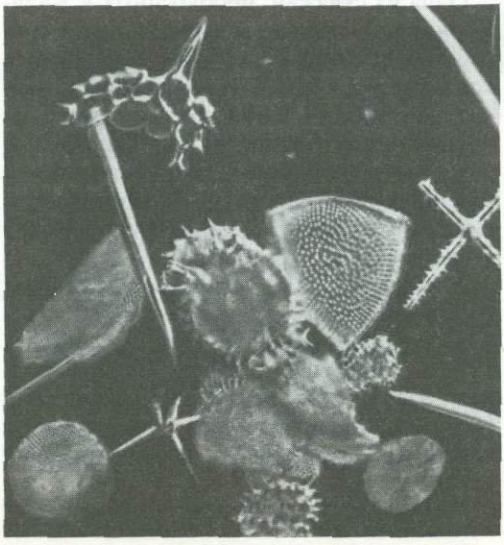


РИС. 15.1
Радиолярии из глубоководного ила (сильно увеличено).

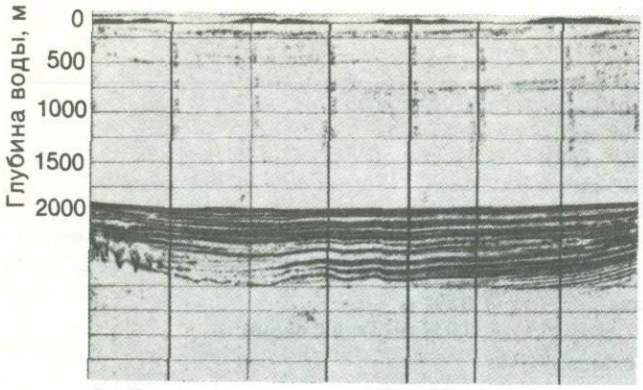


РИС. 15.2
Сейсмоакустический (спаркеровский) профиль слоистой толщи на дне Соломонова моря в западной части Тихого океана. Мощность осадков в средней части профиля около 600 м. (По Джорджу П. Вулларду.)

метров. Использование судна «Гломар Челленджер» с буровой установкой (рис. 15.3) увеличило этот диапазон до многих сотен метров и при этом для твердых, литифицированных (консолидированных) пород, залегающих ниже рыхлых осадков океанического дна.

Акустическое зондирование. Глубина океанических бассейнов определяется главным образом с помощью акустического зондирования. Эхолотом измеряется время, за которое звуковой сигнал достигает дна и его отражение – эхо возвращается обратно к кораблю. Исходя из известной скорости распространения звука в воде, прибор автоматически регистрирует глубину по мере того, как корабль следует своим курсом. Записывающие устройства используются для получения непрерывной записи, по которой составляются карты океанических бассейнов. В последние десятилетия за счет использования электронного навигационного оборудования и искусственных спутников сильно повысилась точность определения местонахождения корабля во время зондирования.

Проект глубоководного бурения. Совместные океанографические исследования под названием «Проект глубоководного бурения» (сокращенно ДСДП[1]) с использованием судна «Гломар Челленджер» с буровой установкой начались с серии рейсов в 1968 г. За 59 рейсов, выполненных в течение первых 10 лет работы, было пробурено 688 скважин в 541 пункте в Атлантическом, Тихом и Индийском океанах, Мексиканском и Калифорнийском заливах, Средиземном море. Была накоплена большая коллекция – более 51 830 м керна, которая в настоящее время доступна для изучения учеными разных специальностей всего мира. Самая большая глубина океана в местах бурения составляла 7044 м в рейсе 60 в Марианском желобе. Максимальная глубина, на которую были вскрыты породы ложа океана, составила 1300 м. Древнейшие из вскрытых скважинами пород относятся по возрасту к низам верхней юры (около 160 млн. лет), что подтверждает предположение об удалении более древних пород в результате спрединга океанического дна, завершающегося их погружением (субдукцией) в мантию.

Одна из скважин, пробуренных в Калифорнийском заливе, должна быть приспособлена для опускания в нее 5-метрового контейнера с сейсмочувствительной аппаратурой, для удобства соединенной с записывающим прибором на дне. Целью является долговременная запись в этом районе современного (в геологическом смысле) рифтинга и спрединга океанического дна.

В августе 1972 г. началась третья фаза работ по Проекту глубоководного бурения, которая продолжалась до августа 1975 г. Затем последовала Международная фаза бурения дна океана (сокращенно ИПОД[1]), отличающаяся расширенной квотой международного финансирования

[1] От англ. DSDP – Deep Sea Drilling Project. – *Прим. перев.*

[2] От англ. IPOD – International Phase of Ocean Drilling. – *Прим перев.*

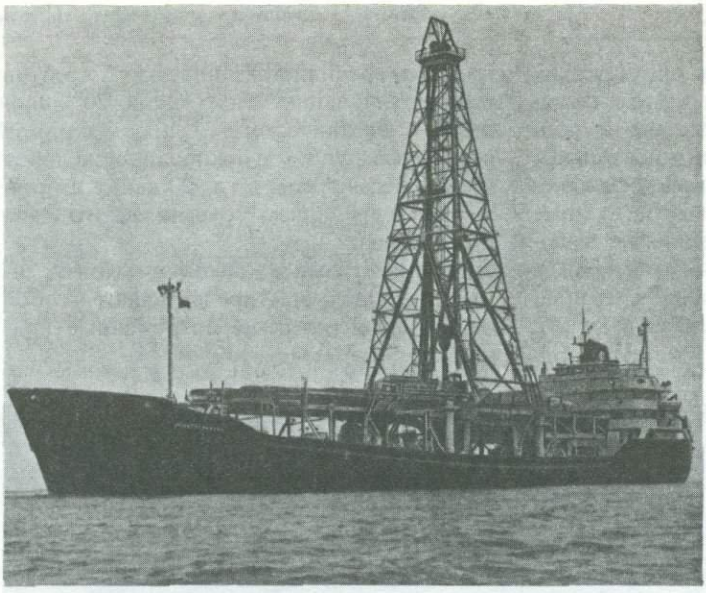


РИС. 15.3

«Гломар Челленджер» — судно с буровой установкой, используемое в работах по Проекту глубоководного бурения (DSDP); с его помощью ведется бурение и отбор керна океанических осадков и связанных с ними потоков лавы во всех океанах земного шара. По контракту с Национальным научным фондом ведущей организацией DSDP является Скриппсовский океанографический институт Калифорнийского университета в Сан-Диего. Судно «Гломар Челленджер» принадлежит компании «Глобел мэрин инкорпорейтед» в Лос-Анджелесе, которая по субконтракту со Скриппсовским институтом осуществляет бурение и отбор керна. Судно весит 10 400 т, имеет длину 122 м, а его буровая вышка, рассчитанная на подъем груза весом до 454 545 кг, возвышается почти на 60 м над ватерлинией. Это первый корабль, способный вести бурение в открытом океане с использованием динамической системы фиксации для удержания корабля над буровой скважиной. Возможность повторного вхождения позволяет производить смену буровых коронок и снова входить в ту же самую скважину на океаническом дне. Прогрессивным является применение автоматического стеллажа для труб, вмещающего около 7200 м буровых труб диаметром около 12,5 см. (Фотография Скриппсовского океанографического института, Калифорнийский университет, Сан-Диего.)

и большим числом участвующего в работах персонала. Ряд ученых настаивают на использовании значительно более крупного спасательного судна «Гломар Эксплорер», принадлежащего Военно-морскому флоту США и потенциально способного производить бурение на бóльшую глубину, при условии, если можно будет прийти к соглашению относительно приемлемой программы работ и найти необходимые для этого средства. Главной задачей в этом случае было бы изучение континентальных окраин, где можно рассчитывать на открытие месторождений нефти и газа. Глубина бурения с «Гломара Челленджера» ограничена длиной его буровой колонны, которая составляет 7317 м. Ряд исследователей предпочли бы продолжить менее дорогостоящее, чем на «Эксплорере», относительно неглубокое бурение с «Гломара Челленджера» со стратиграфическими целями.

КРУПНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ РЕЛЬЕФА

Главные элементы рельефа океанических бассейнов – это 1) континентальные шельфы, 2) континентальные склоны с подводными каньонами, 3) континентальное подножие, 4) система срединно-океанических хребтов, 5) островные дуги, 6) ложе океана с абиссальными равнинами, положительными формами рельефа (главным образом вулканами, гийотами и атоллами) и глубоководными желобами.

Чуть ли не всемирная система подводных срединно-океанических хребтов и поднятий, занимающих около 20% площади океанического дна, система островных дуг и глубоководных желобов будут рассмотрены в гл. 20 ввиду их связи со спредингом океанического дна и тектоникой плит.

Континентальные шельфы. Континентальные шельфы представляют собой окраины континентов, погруженные при-

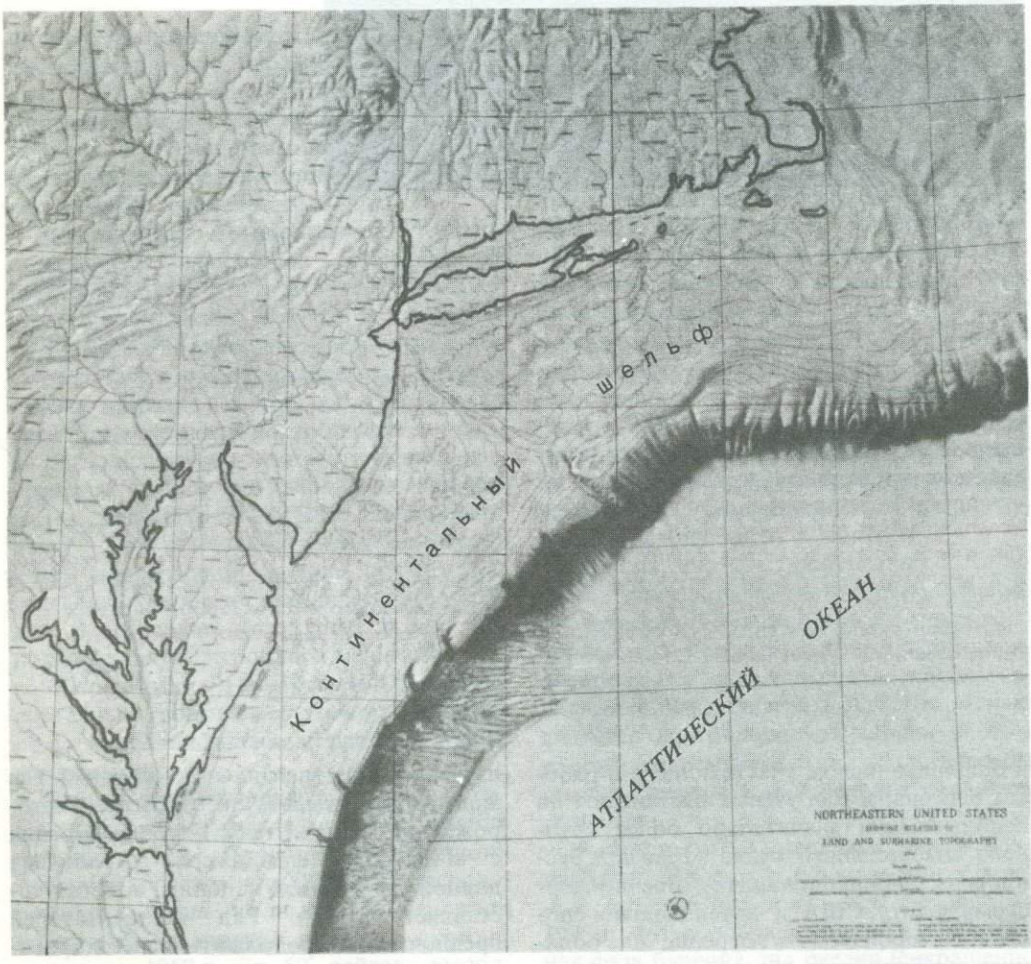


РИС. 15.4

Фотография рельефной модели континентального шельфа у северо-восточного побережья США. Обратите внимание на подводный каньон, тянущийся от реки Гудзон через шельф и дальше вниз по континентальному склону в направлении глубоководной части океана. (Фотография компании «Аэро сервис корпорейшн».)

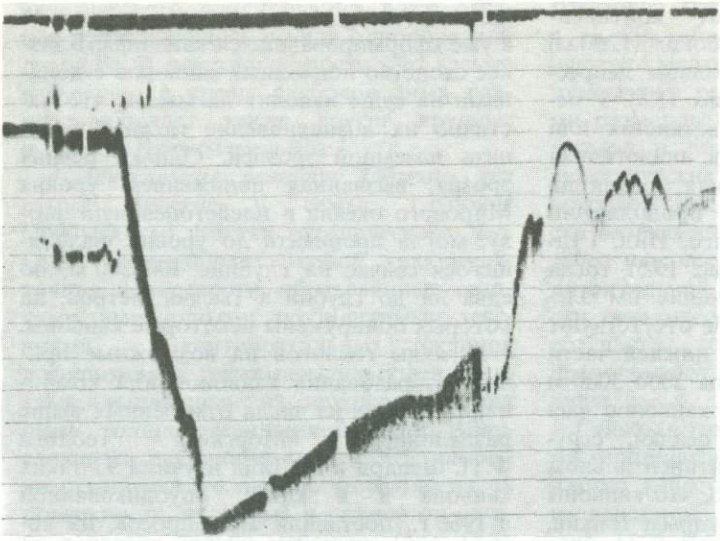


РИС. 15.5
Фатограмма через подводный каньон Астория у устья реки Колумбия. Максимальная глубина каньона в этом его сечении около 600 м. (По материалам Океанографического института Университета шт. Орегон.)

близительно до 200 м ниже уровня моря у их внешнего края, откуда начинается более крутое погружение морского дна. Их общая площадь около 7 млн. км^2, или около 2% площади дна Мирового океана.

Поверхность шельфов разнообразна. Местами она осложняется подводными руслами (рис. 15.4) и грядами, замкнутыми депрессиями, подводными террасами и коралловыми рифами. В одних местах дно образовано коренными породами, в других – илом, песком или галькой. На дне мелкого моря у берегов Новой Англии и восточной Канады в изобилии представлены ледниковые формы рельефа – друмлины, зандровые наносы, глубокие троги.

Континентальные шельфы особенно чутко реагируют на относительные изменения уровня океана, вызываемые тектоническими движениями, размывом и понижением суши, накоплением осадков в акваториях. Изменения обусловлены также потерей воды, идущей на образование льда в ледниках, или ее возвращением в океан при их таянии. Опускание берега или повышение уровня моря могут приводить к вторжению моря на территорию прибрежных низменностей. И наоборот, при воздымании берега или понижении уровня моря часть континентального шельфа может превратиться в прибрежную равнину.

Континентальный склон и подводные каньоны. От внешнего края шельфа, называемого также бровкой шельфа, дно опускется круче (хотя все же достаточно плавно), образуя континентальный склон. Его ширина от 15 до 30 км (рис. 15.4–15.6). Континентальный склон вместе с континентальным подножием погружается до глубин порядка 2000 м.

Долины на континентальном склоне, частично продолжающиеся в область континентального подножия, называются подводными каньонами. Каньоны во

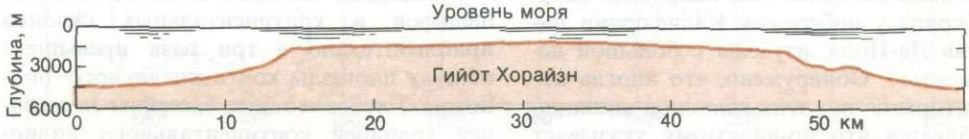


РИС. 15.6
Разрез через гийот Хорайзн в западной части Тихого океана (без увеличения вертикального масштаба). (По Гамильтону, 1956.)

многих местах рассекают континентальный склон в виде глубоких (1200 м) V-образных, похожих на долины депрессий с крутыми стенками (рис. 15.5). У некоторых из них имеется ветвистая или дендровидная сеть притоков, аналогичная той, которую создает речная эрозия на суше. Часть их лежит на продолжении устьев рек, таких, как Конго, Инд, Гудзон, Делавэр, Колумбия (рис. 15.5), тогда как у других соответствующие им элементы на близлежащей суше отсутствуют или почти отсутствуют. В нижней части каньоны достигают глубины 2000–3000 м ниже уровня моря. Стенки каньонов часто скальные, а донные осадки, сгруженные у их устьев на континентальном подножии, указывают на то, что каньоны играют роль лотков, по которым тонкий, а также грубый осадочный материал сносится на большую глубину.

Механизм образования каньонов с уверенностью не установлен. Его связывают с 1) эрозионной деятельностью турбидитных течений, 2) мутьевыми потоками и процессами подводного оползания, 3) эрозионной деятельностью рек, дренировавших континентальные окраины в эпохи понижения уровня моря, 4) эрозионной деятельностью приливных течений, 5) разрывной тектоникой.

Турбидитные течения представляет собой нисходящие под действием силы тяжести потоки воды, насыщенной взвешенным материалом и поэтому более тяжелой, чем чистая вода. Вследствие ускорения на подводных склонах они могут увлекать песчаный материал со скоростью, достаточной для того, чтобы вызвать эрозию. Известно, что турбидитные течения рвут подводные трансатлантические кабели, но многие геологи сомневаются в их способности глубоко врезаться в твердые породы. Некоторые подводные каньоны, как, например, каньон Скрипс у побережья Калифорнии напротив Ла-Йола, изучены с большой детальностью. Обнаружено, что иногда после штормов дно этих каньонов внезапно углубляется, что, по-видимому, указывает на подводное оползание или какой-то иной способ перемещения песчаного материала вниз по склону. Возможно, правда, что эти процессы происходят только в уже сформировавшихся каньонах. Близкое сходство подводных каньонов с долинами на суше наводит на мысль, что частично их возникновение можно объяснить наземной эрозией. Однако речная эрозия, вызванная понижением уровня Мирового океана в плейстоценовую эпоху, могла проникать до уровня, находящегося сейчас на глубине 100–200 м, но едва ли до глубин в тысячи метров, на которых обнаружены некоторые каньоны.

Взгляды геологов на возможные причины образования каньонов или комбинации причин из числа отмеченных выше разделились. «Морские» геологи Ф. П. Шепард и Р. Дилл изучили 93 таких каньона и в книге, опубликованной в 1966 г., поставили 28 вопросов, на которые должны быть даны ответы, прежде чем можно будет, по их мнению, остановиться на какой-то приемлемой теории. Вполне возможно, однако, что с помощью лишь одной теории нельзя объяснить происхождение всех типов подводных каньонов.

Континентальное подножие. Континентальное подножие представляет собой «осадочную оторочку» с полого наклоненной поверхностью в основании континентального склона. Эта оторочка отсутствует на некоторых участках океана у берегов Калифорнии и в зонах, прилегающих к глубоководным желобам. Континентальное подножие сложено осадками, накопившимися в краевых частях ложа океана, и, следовательно, является аналогом предгорных аллювиальных равнин, образованных речными осадками у подножия горных массивов. Полагают, что континентальное подножие создается в результате деятельности турбидитных течений и гравитационного переноса материала с континентального склона.

Суммарная площадь континентальных шельфов и континентальных склонов приблизительно в три раза превышает общую площадь континентального подножия. Глубоководные бассейны за внешней границей континентального подножия занимают около 3/5 всей поверхности земного шара.

Ложе океана. До применения методов

акустического зондирования ложе океанов представлялось в виде однообразной равнины. В действительности оно весьма изменчиво и кроме глубоководных равнин включает также другие крупные и мелкие формы рельефа.

а. Абиссальные равнины. Обычно это самые плоские и самые глубокие (3000–6000 м) участки океанического дна. Они представляют собой аккумулятивные поверхности, образованные осадками, вынесенными турбидитными течениями с континентальных склонов и подножия, а также пелагическими осадками, выпавшими из находящейся над ними толщи океанической воды. Абиссальными равнинами занято 30% площади океанического дна, но морфология их поверхности, их форма и размер от океана к океану сильно меняются (рис. 15.4).

б. Положительные формы рельефа. Не считая системы срединно-океанических хребтов (которые будут описаны в гл. 20), абиссальные равнины осложняются мелкими и крупными, выраженными в рельефе дна возвышенностями размером от маленьких абиссальных холмов и подводных гор до больших вулканических построек типа Гавайских островов. Две своеобразные разновидности возвышенностей – *гийоты* и *атоллы* – дают нам некоторое представление о горизонтальной и вертикальной подвижности океанического дна, в том числе тех его частей, которые в настоящее время представляют собой абиссальные равнины.

Гийоты – это подводные горы с плоскими вершинами (рис. 15.6). Огромное множество гийотов открыто в центральном и западном секторах Тихого океана (рис. 15.7). Некоторые из них очень велики. Размер вершины гийота Кейп-Джонсон 11 × 16 км, а гийот Хорайзн имеет

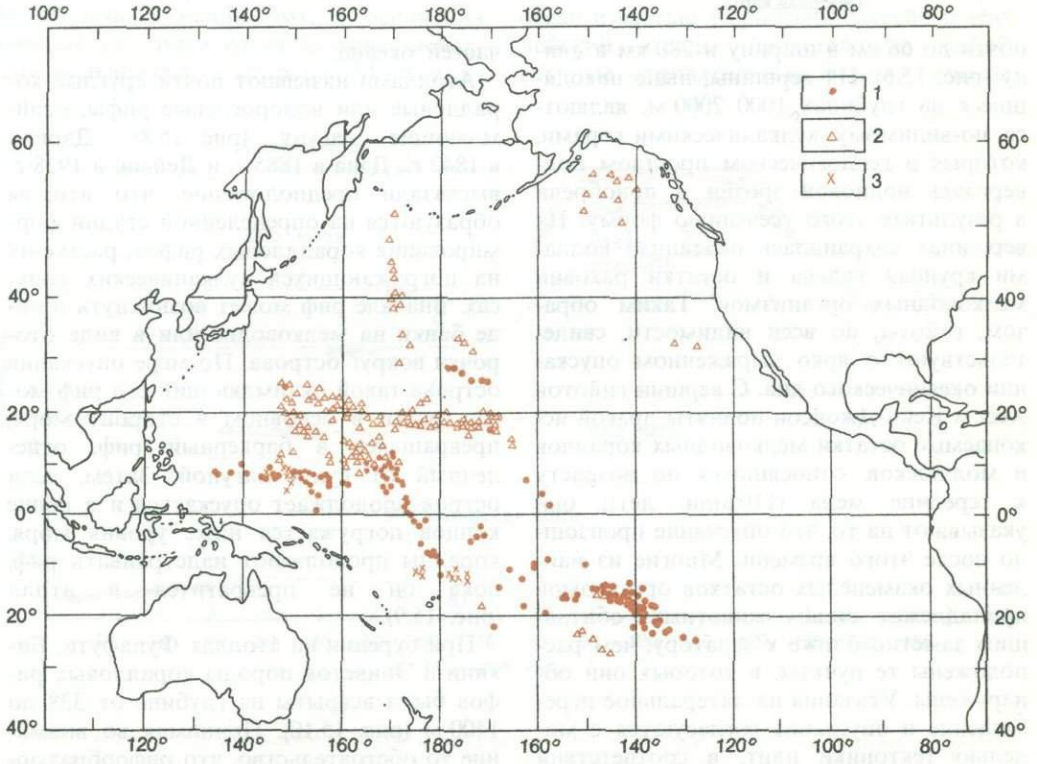


РИС. 15.7

Погруженные древние острова в Тихом океане, превратившиеся в гийоты и атоллы. *1* – атоллы; *2* – гийоты; *3* – погруженные атоллы. (По Менарду, 1964.)

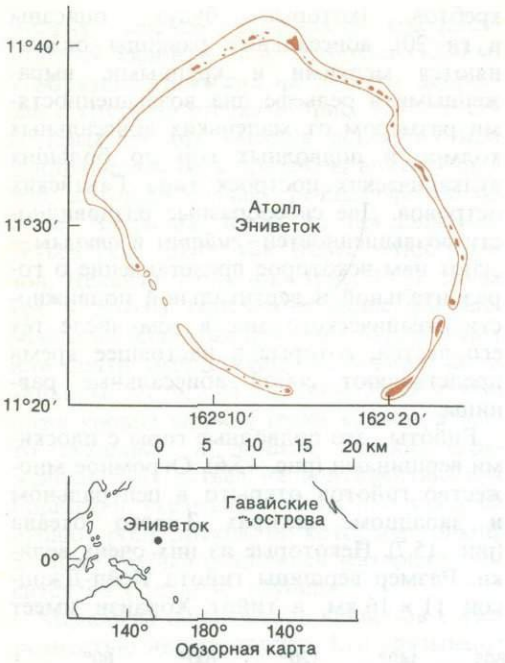


РИС. 15.8
Карта атолла Эниветок. (По материалам Лэдда и Шлангера, 1960, Геологическая служба США.)

почти до 66 км в ширину и 280 км в длину (рис. 15.6). Их вершины, ныне находящиеся на глубинах 1000–2000 м, являются, по-видимому, вулканическими горами, которые в геологическом прошлом подверглись волновой эрозии и приобрели в результате этого усеченную форму. На вершинах сохранилась окатанная волнами крупная галька и остатки раковин мелководных организмов. Таким образом, гийоты, по всей видимости, свидетельствуют о ярко выраженном опускании океанического дна. С вершин гийотов Хесс и Кейп-Джонсон подняты драгой ископаемые остатки мелководных кораллов и моллюсков, относящихся по возрасту к середине мела (110 млн. лет); они указывают на то, что опускание произошло после этого времени. Многие из найденных окаменелых остатков организмов принадлежат видам животных, обитавшим заметно ближе к экватору, чем расположены те пункты, в которых они обнаружены. Указания на латеральное перемещение и опускание согласуются с моделью тектоники плит, в соответствии с которой океаническая кора движется от возвышающихся срединно-океанических хребтов в сторону более глубоководных частей океана.

Атоллами называют почти круглые коралловые или водорослевые рифы, окаймляющие лагуну (рис. 15.8). Дарвин в 1842 г., Дэна в 1885 г. и Дейвис в 1928 г. высказали предположение, что атоллы образуются на определенной стадии формирования коралловых рифов, растущих на погружающихся вулканических конусах. Вначале риф может возникнуть в виде банки на мелководье или в виде оторочки вокруг острова. По мере опускания острова такой окаймляющий его риф может расти в основном в сторону моря, превращаясь в барьерный риф, отделенный от суши лагуной. Затем, если остров продолжает опускаться и в конце концов погружается ниже уровня моря, кораллы продолжают надстраивать риф, пока он не превратится в атолл (рис. 15.9).

При бурении на атоллах Фунафути, Бикини и Эниветок породы коралловых рифов были вскрыты на глубине от 338 до 1400 м (рис. 15.10). Принимая во внимание то обстоятельство, что рифообразующие кораллы в настоящее время обитают только на небольшой глубине, мы мо-



РИС. 15.9
Диаграмма, иллюстрирующая формирование атолла. *а* – остров с окаймляющими его рифами; *б* – по мере опускания острова окаймляющие его рифы растут вверх и превращаются в барьерный риф; *в* – при дальнейшем опускании барьерный риф превращается в атолл.

жем, по-видимому, говорить о значительном погружении, обусловленном спредингом, и перемещении в более глубокие части океана. Фораминиферы (крошечные *животные с известковой раковиной*) верхнеэоценового возраста, найденные в керне глубоких скважин, указывают на опускание, происходившее на протяжении по крайней мере 50 млн. лет. Установлено, что основание рифа Эниветок сложено базальтами. По-видимому, в основании атоллов находятся когда-то существовавшие вулканические острова. Многие из них были срезаны наподобие гийотов, но оставались вблизи поверхности моря, поскольку кораллы и ассоциирующиеся с ними организмы наращивали риф с той же скоростью, с какой шло погружение дна. В других местах, где кораллы не обеспечивали необходимый рост вверх, вместо атоллов возникали гийоты.

в. Отрицательные формы рельефа. Глубоководные желоба, окружающие Тихий океан и частью Карибский бассейн и Индийский океан, представляют собой главные отрицательные формы рельефа

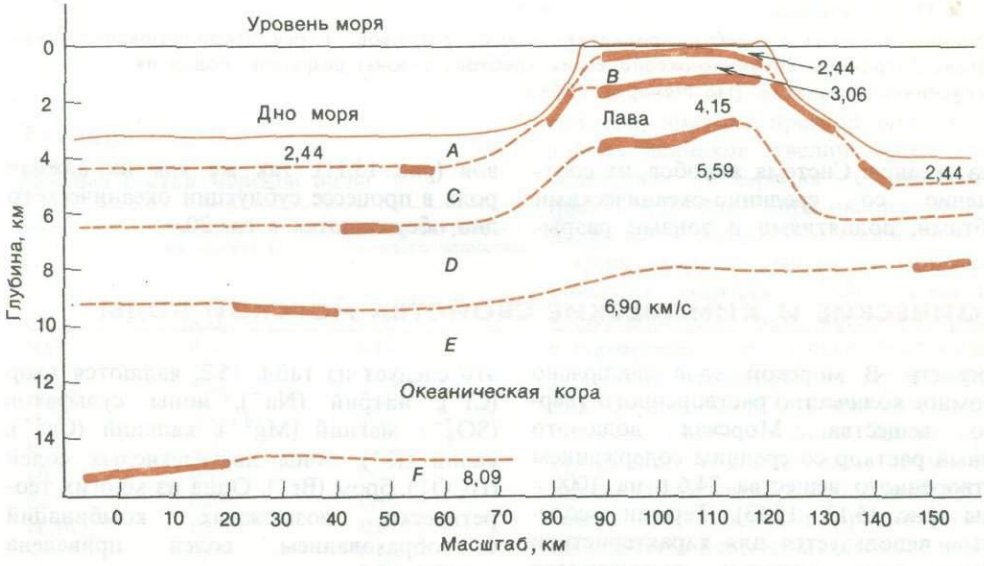


РИС. 15.10
Предполагаемое строение земной коры в районе атолла Эниветок. Цифрами указана скорость сейсмических волн (в км/с). Вертикальный масштаб увеличен приблизительно в 5 раз. Два верхних слоя A и B – рифы и отложения лагуны; слой C – лавы базальтового состава (вскрытые бурением); слой D – более плотные лавы или интрузивные магматические породы; E – нормальная океаническая кора; F – мантия. (По Райту, 1957, Геологическая служба США.)

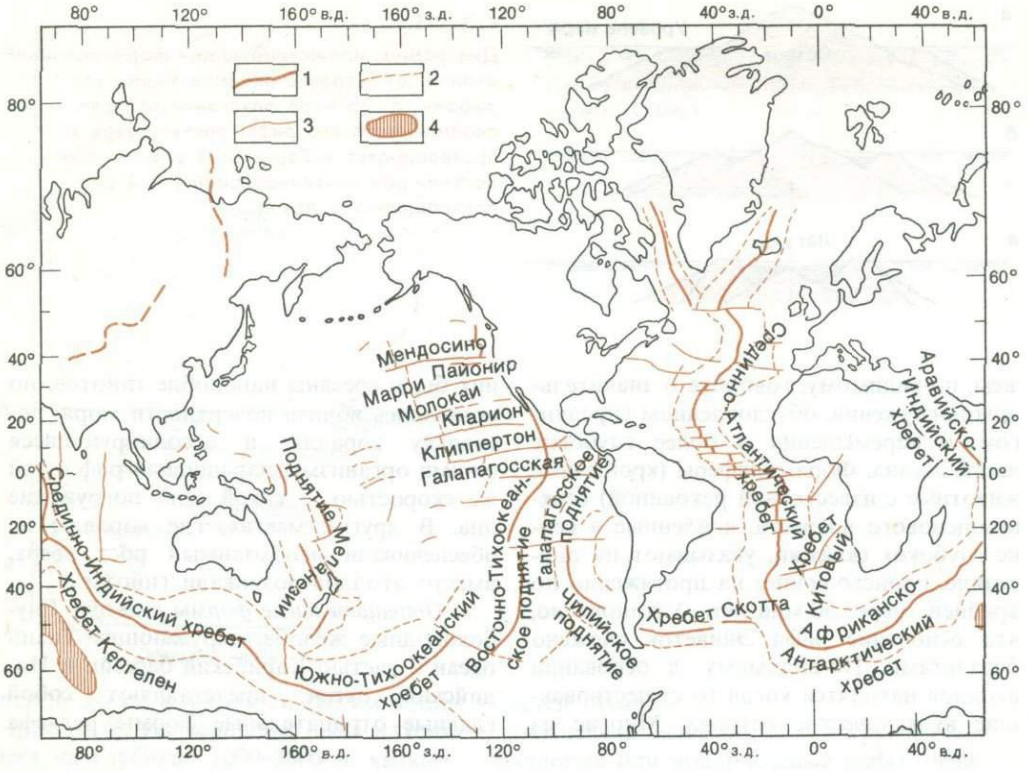


РИС. 15.11

Срединно-океанические хребты, поднятия и зоны разрывов. *1*–оси срединно-океанических хребтов; *2*–границы срединно-океанических хребтов; *3*–зоны разрывов, поднятия; *4*–асейсмичное поднятие. (По Менарду, 1964.)

ложа океанов. Система желобов, их соотношение со срединно-океаническими хребтами, поднятиями и зонами разрывов (рис. 15.11), так же как их важная роль в процессе субдукции океанического дна обсуждаются в гл. 20.

ФИЗИЧЕСКИЕ И ХИМИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА МОРСКОЙ ВОДЫ

Соленость. *В морской воде заключено* огромное количество растворенного твердого вещества. Морская вода – это ионный раствор со средним содержанием растворенного вещества 34,6 г на 1000 г воды (рис. 15.12, 15.13). Термин «соленость» используется для характеристики *состава этого раствора, выраженного* в промилле (‰). Твердое вещество, растворяясь в морской воде, распадается на ионы. В морской воде обнаружено по меньшей мере 67 различных химических элементов; однако главными из них, как *это следует из табл. 15.2, являются хлор* (Cl^-), натрий (Na^+), ионы сульфатов (SO_4^{2-}), магний (Mg^{2+}), кальций (Ca^{2+}), калий (K^+), ионы двууглекислых солей (HCO_3^+), бром (Br^-). Одна из многих теоретически возможных комбинаций с образованием солей приведена в табл. *15.3*.

Соленость океанической воды заключена между крайними значениями 33 и 37‰, но обычно колеблется от 34 до 35‰. У поверхности соленость понижается из-за выпадения в море атмосферных



РИС. 15.12

Изменение с глубиной температуры, солености и вычисленной скорости распространения звука в океане у южного побережья Калифорнии. Средняя скорость распространения звука берется от поверхности океана до той или иной определенной глубины. (По Свердрупу и др., 1942.)

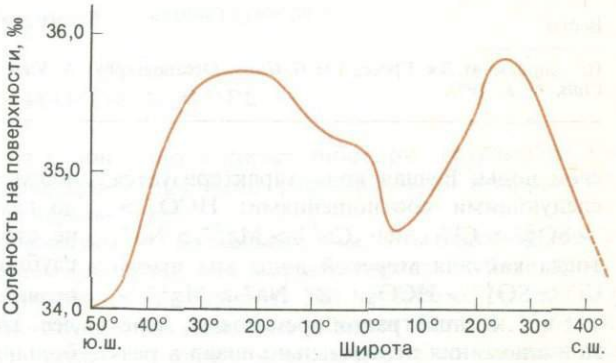


РИС. 15.13

График зависимости солености морской воды от широты. Наиболее высокая соленость отмечается на широте около 25° с. ш., что объясняется сильным испарением и малым количеством атмосферных осадков. Соленость понижается по направлению к экватору и высоким широтам. (По Вюсту, 1958.)

Таблица 15.2

Ионный состав морской воды

Ион	Частей на тысячу (‰)	Вес растворенного твердого вещества, %
Cl^-	18,80	55,05
Na^+	10,77	30,61
SO^{2-}	2,72	7,68
Mg^{2+}	1,29	3,69
Ca^{2+}	0,41	1,16
K^+	0,38	1,10
HCO_3^-	0,14	0,41
Br^-	0,07	0,19
$H_3BO_3^-$	0,03	0,07
Sr^{2+}	0,01	0,03
Всего	34,62	99,99

По данным К. Б. Краускопфа: *K. B. Krauskopf*, Introduction to Geochemistry, 2d ed., McGraw-Hill Book Company, New Jork, 1979.

осадков, притока пресной воды с суши, таяния ледников, увеличивается же она вследствие испарения с поверхности (рис. 15.13) или образования морского льда, почти лишенного солей.

Существует несколько возможных источников морских солей: 1) часть их в растворенном виде могла содержаться в первичной воде; 2) некоторые соли, вероятно, были вымыты из пород морского дна; 3) часть солей, по-видимому, поступила за счет дегазации Земли при ее остывании; 4) в настоящее время источником солей служит подводная вулканическая деятельность и горячие источники на морском дне; 5) часть солей выносится в океан реками, в которые они попадают из подземных вод, вымывающих их из пород на суше. В отношении последнего из указанных источников следует заметить, что солевой состав воды в реках существенно отличается от состава мор-

Таблица 15.3

Растворенное твердое вещество морской воды, представленное в виде солей

Соль	Частей на тысячу (‰)	Вес, %
Хлористый натрий (NaCl)	23,477	68,085
Хлористый магний ($MgCl_2$)	4,981	14,445
Сульфат натрия (Na_2SO_4)	3,917	11,359
Хлористый кальций ($CaCl_2$)	1,102	3,196
Хлористый калий (KCl)	0,664	1,926
Бикарбонат натрия ($NaHCO_3$)	0,192	0,557
Бромистый калий (KBr)	0,096	0,278
Борная кислота (H_3BO_3)	0,026	0,075
Хлористый стронций ($SrCl_2$)	0,024	0,070
Фтористый натрий (NaF)	0,003	0,009
Всего	34,482	100,000

По данным М. Дж. Гросса: *M. G. Gross*, Oceanography: A View of the Earth, Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs, N. J., 1977.

ской воды. Речная вода характеризуется следующими соотношениями: $HCO_3^- > SO_4^{2-} > Cl^-$ и $Ca^{2+} > Mg^{2+} > Na^+$, тогда как для морской воды мы имеем $Cl^- > SO_4^{2-} > HCO_3^-$ и $Na^+ > Mg^{2+} > Ca^{2+}$. Концентрации кремнезема, железа и алюминия относительно низки в речной воде и составляют менее одной миллионной доли в морской воде.

Происхождение и история становления солености Мирового океана до сих пор остаются интригующей проблемой для химиков-океанографов. Сегодня господствует взгляд, согласно которому состав морской воды отличается поразительным постоянством. Изучение древних форм жизни в океане показывает, что состав воды мало изменился за последние 600 млн. лет (т. е. с начала кембрийского периода).

Температура. Температура океана меняется от экватора к полюсам и от поверхности к абиссальным глубинам. У экватора температура на поверхности в среднем равна примерно 36°С, тогда как в полярных областях она составляет около -2°С, т. е. близка к точке замерзания морской воды. У дна температура воды меняется от -2°С в полярных областях до $+2$°С в низких широтах. Температура воды в океане быстро уменьшается от поверхности до глубины 400 м, где она равна примерно 4°С. Затем до глубины 2000 м она понижается уже не столь быстрыми темпами и на этой глубине становится относительно постоянной – около 2°С (рис. 15.12). Для более глубоких слоев океана характерен большой объем холодной плотной воды, которая движется из полярных и субполярных областей в сторону экватора, входя составной частью в общую систему циркуляции Мирового океана.

Вариации температуры воды у поверхности океана на разных широтах отражают разницу в количестве получаемого солнечного тепла. Вклад в тепловой бюджет океана слабого тепла, поступающего из земных недр, от радиоактивности пород морского дна и окисления органического вещества, пренебрежительно мал.

Растворенные газы. Газы, как и твердое вещество, присутствуют в растворенном виде в морской воде. Самыми распространенными из них являются азот, кислород и двуокись углерода, получаемые из воздуха. Общее количество их здесь во много раз больше, чем в атмосфере, вследствие высокой растворимости газов в холодной воде. Кислород необходим для морских организмов и для процессов гниения органического вещества, двуокись углерода служит пищей для зеленых и бурых морских водорослей.

Освещенность. Солнечный свет быстро пропадает с глубиной; при этом глубже всего проникают лучи голубой части спектра. Более половины световых волн видимой части спектра поглощается в первых десяти метрах морской воды среднего состава, 99% поглощается в верхних 100 м. Бóльшая часть поглощенной энергии трансформируется в тепло, но существенная ее доля усваивается с помощью фотосинтеза морскими растениями.

Плотность и давление. Плотность средней по солености и температуре морской воды составляет примерно 1,025. В холодных полярных водах она увеличивается приблизительно до 1,028, а в теплых тропических морях уменьшается приблизительно до 1,022. Изменение плотности, обусловленное изменением солености, температуры и давления, ответственно за существование определенного вида океанических течений.

Гидростатическое давление на любой глубине соответствует весу толщи воды. Хотя вода почти несжимаема, давление на больших глубинах все же достаточно велико для весьма слабого увеличения плотности. Без этого слабого возрастания плотности воды с глубиной уровень моря был бы примерно на 30 м выше существующего.

ЗОНЫ ОБИТАНИЯ ОРГАНИЗМОВ В МОРЕ

Морская среда разделяется на пять зон обитания, каждая из которых характеризуется своей фауной и флорой: *литоральную*, или *приливно-отливную*, *неритовую*, *батиальную*, *абиссальную* и *пелагическую*.

Литоральная, или приливно-отливная, зона. Литоральная, или приливно-отливная, зона включает площадь расположенную между уровнями высокого и низкого приливов. В этой зоне при низком приливе обнажается морское дно, при высоком приливе оно скрывается под водой. Зона всегда подвержена сильному воздействию волн, из-за чего условия жизни здесь очень суровые. Организмы должны либо крепко прикрепляться к дну, либо селиться в норах. Некоторые из них укрываются в сохраняющихся во время низкого прилива водоемах, у других развиваются анатомические особенности, позволяющие им пережить время, в течение которого они оказываются на воздухе.

Неритовая зона. Неритовая зона протягивается от линии низкого прилива до бровки континентального шельфа. Процветающая здесь жизнь, вероятно, намного богаче, чем на такой же площади в любом другом месте земного шара. Поскольку глубина воды здесь не превышает 200 м, верхняя часть зоны освещена солнцем, пища имеется в изобилии и буйно развивается огромное количество разнообразных видов морских организмов, питающихся либо друг другом, либо веществами, растворенными в морской воде.

Батиальная зона. К батиальной зоне относится морское дно на глубине приблизительно от 200 до 2000 м. На дне моря в этой зоне обитает богатая популяция животных, несмотря на то что растительная жизнь здесь из-за отсутствия света очень убога. Благодаря тому что осадки накапливаются медленно, живущие на дне организмы-мусорщики успевают уничтожить бóльшую часть органического вещества. Осадки состоят главным образом из известковых раковин планктонных организмов, кремневых диатомовых водорослей и спикул губок.

Абиссальная зона. Абиссальной зоне принадлежит дно моря ниже уровня 2000 м. До этой зоны не доходит солнечный свет, и температура в ней постоянно близка к точке замерзания. Так как растения в этих условиях существовать не могут, те животные, которые зависят от растительной пищи, живут за счет того, что подымаются отсюда в освещенный слой воды у поверхности. Строение раковин и скелетов животных, живущих на абиссальных участках дна, свидетельствует о том, что на этих глубинах способны существовать только высокоспециализированные создания.

Пелагическая зона. Пелагической зоне

соответствует верхний слой воды на обширных пространствах открытого моря за пределами литоральной зоны. Жизнь в этой зоне включает пассивно плавающие планктонные формы и самостоятельно плавающих животных. Наиболее обычными растениями являются водоросли, в том числе диатомовые, а из животных – всевозможные виды от микроскопических форм до китов. Их устойчивые твердые части попадают в донные осадки глубоко внизу. Местный подъем холодной воды, богатой питательными веществами, в определенных районах океана вызывает бурный рост количества мелких организмов, служащих тем звеном в пищевой цепи, от которого зависят более высокоразвитые организмы.

ЦИРКУЛЯЦИЯ И ДВИЖЕНИЕ ВОДЫ В ОКЕАНЕ

В циркуляцию и движение вовлечена вся толща морской воды от поверхности до самых глубоких ее слоев. Волны разной высоты движутся по морю в виде сложной бесконечной последовательности. Внутреннее трение мало влияет на однажды образовавшиеся волны, поэтому, первоначально возникнув под действием устойчивых ветров на широких просторах открытого океана, они распространяются на расстояния в сотни и даже тысячи километров. При ударе о берег часть их энергии расходуется на эрозию и перенос обломочного материала.

Кроме волн и связанного с ними прибоя, движение воды осуществляется также в виде разрывных течений (сулоев), приливов, ветровых поверхностных океанических течений, подводной циркуляции и других возникающих на глубине видов плотностных течений, гигантских волн, или *цунами*, вызванных землетрясениями. Приливы уже были рассмотрены в гл. 2.

Причина движения. Движение морской воды вызывается главным образом *ветром, штормами, изменением плотности, землетрясениями.*

а. Трение ветра. Наиболее обычная причина движения морской воды – трение ветра, проносящегося над водной поверхностью. Именно сила трения вызывает возникновение широкого спектра волнового движения и в открытом море приводит к образованию поверхностных ветровых, или дрейфовых, течений.

б. Штормы. Очень сильные штормы иногда приводят к образованию исключительно высоких волн и связанных с ними течений. Тайфуны в историческую эпоху постоянно опустошали прибрежные районы Индии, Юго-Восточной Азии и Филиппин и время от времени – побережья Тайваня и Японии. Во время одного из штормов у Малабарского берега юго-западной Индии уровень моря поднялся вблизи берега на 7 м, и вода затопила обширную территорию. Ураганы Карибского региона, перемещающиеся в западном направлении, прежде чем повернуть к северу или северо-востоку, неоднократно обрушивались на Атлантическое побережье и побережье Мексиканского залива с сокрушительными ветрами, ливнями и наводнениями. Галвестон, город в Техасе, был фактически уничтожен в 1900 г. нахлынувшей морской волной, которая пронеслась над ним, утопив 6000 человек. Ураганом и сопровождавшими его высокими волнами в 1935 г. в районе островов Кис (Флорида) были смыты шоссе и железнодорожная дамба между островами, опрокинуты здания и стальные опоры, снесены дома на большой площади. Аналогичный шторм в 1962 г. обрушился на все Атлантическое побережье от Флориды до Канады.

в. Изменение плотности. При испарении из океана удаляется большое количество воды; при этом увеличивается соленость и, следовательно, плотность поверхностной воды, которая в результате стремится опуститься вниз. Плотность увеличивается также при понижении температуры. Выпадение атмосферных осадков и прогрев дают противоположный эффект. Холодные плотные воды полярных областей опускаются вниз и медленно перемещаются по направлению к экватору. Они поднимаются в виде во-

сходящих течений в других частях океана. Изменение плотности, вызывается ли оно испарением, изменением температуры или взвешенным осадочным материалом, служит главной причиной циркуляции воды в глубинах океана.

г. Землетрясения. Известно, что сейсмические морские волны огромной разрушительной силы распространяются в глубь суши на несколько километров и поднимаются в высоту на десятки метров выше нормального уровня моря. Волны такого типа вызываются, как будет показано ниже (в гл. 18), землетрясениями. Их называют цунами.

Поверхностные океанические течения. В поясах тропических пассатов с устойчивыми ветрами, дующими в постоянных направлениях, поверхностные слои морской воды увлекаются ветром (рис. 15.14). Пассаты дуют с северо-востока в областях, лежащих к северу от экватора, и с юго-востока в областях, расположенных к югу от экватора. Под их воздействием вода сгоняется к экватору с обеих сторон; здесь она движется в западном направлении в виде экваториального течения, которое огибало бы всень земной шар, если бы на его пути не вставали континенты. Этим экваториальным дрифтом порождаются главные течения в экваториальной области Мирового океана. В Северной Атлантике перемещающиеся к западу экваториальные воды подходят

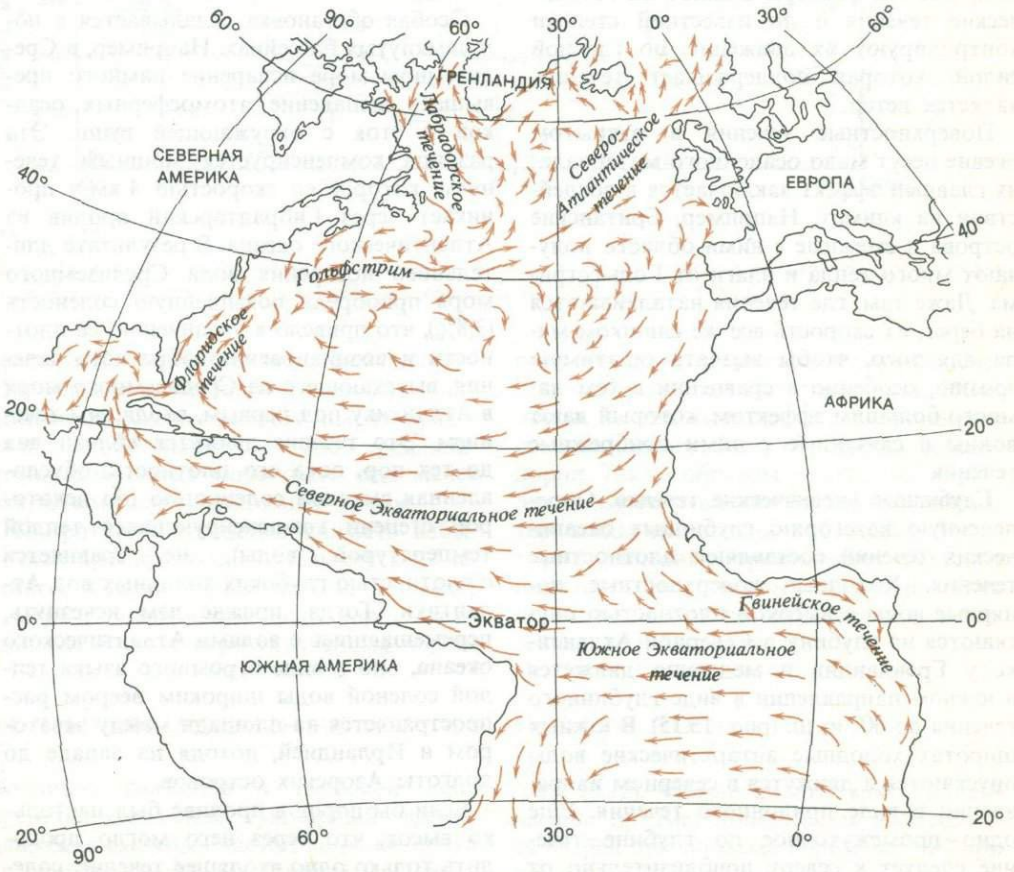


РИС. 15.14

Поверхностные океанические течения в Атлантическом океане. Наиболее крупными являются экваториальные течения, перемещающиеся в западном направлении. Гольфстрим и грандиозное круговращение воды в Северной Атлантике. (По Шотту, 1935.)

к восточным берегам Бразилии, откуда часть течения отклоняется вдоль северного берега Южной Америки. Достигнув восточного окончания Карибских островов, оно разделяется снова, и часть его пересекает Карибское море и уходит в Мексиканский залив. Затем эта ветвь прорывается через Флоридский пролив и образует Гольфстрим. В Северной Атлантике Гольфстрим выделяется как масса воды, обладающая своим храктерным цветом, температурой и соленостью. Такого же рода течения образуются в Южной Атлантике и Тихом океане.

Форма континентального шельфа, очертания береговой линии, *эффект Кориолиса*, связанный с вращением Земли,– все эти факторы влияют на океанические течения и до известной степени контролируют их движение, но главной силой, которая поддерживает течения, является ветер.

Поверхностные течения в открытом океане несут мало осадочного материала; их главный эффект заключается в воздействии на климат. Например, Британские острова и смежные с ними области получают много тепла и влаги от Гольфстрима. Даже там, где течения наталкиваются на берег, их скорость все же слишком мала для того, чтобы вызвать ощутимую эрозию, особенно в сравнении с тем намного большим эффектом, который дают волны и связанные с ними прибрежные течения.

Глубинные океанические течения. Определенную категорию глубинных океанических течений составляют плотностные течения. Холодные поверхностные полярные воды с высокой плотностью опускаются на глубину в Северной Атлантике у Гренландии и медленно движутся в южном направлении в виде глубинного течения до 60° ю. ш. (рис. 15.15). В южных широтах холодные антарктические воды опускаются и движутся в северном направлении в виде придонного течения. Еще одно – промежуточное по глубине – течение следует к северу приблизительно от 60° ю. ш. до 20° с. ш. на глубине около 1000 м. Другие приповерхностные течения опускаются вблизи 40° с. ш. и 40° ю. ш. и текут к экватору на глубине около 600 м; здесь они поднимаются и начинают движение в обратном направлении вблизи поверхности океана. В Атлантическом океане, таким образом, существует сложная система циркуляции, и во многих отношениях сходные системы характерны для всех остальных океанов. Эти системы находятся в динамическом равновесии, в котором тонко сбалансированы процессы нагревания, охлаждения, разбавления пресной водой и увеличения концентрации солей при испарении. Свой отпечаток накладывают также форма бассейна, конфигурация океанического дна и вращение Земли. Для завершения одного цикла этой глубинной циркуляции требуются тысячи лет.

Особая обстановка складывается в полузамкнутых бассейнах. Например, в Средиземном море испарение намного превышает выпадение атмосферных осадков и сток с окружающей суши. Эта разница компенсируется мощным течением, которое со скоростью 4 км/ч проникает через Гибралтарский пролив из Атлантического океана. В результате длительного испарения вода Средиземного моря приобрела повышенную соленость (3,8‰), что привело к увеличению ее плотности и возникновению обратного течения, вытекающего из Средиземного моря в Атлантику под первым, входящим течением. Это течение движется вблизи дна до тех пор, пока его плотность, обусловленная высокой соленостью (до некоторой степени компенсирующаяся теплой температурой воды), не сравняется с плотностью глубоких холодных вод Атлантики. Тогда, прежде чем исчезнуть, перемешавшись с водами Атлантического океана, оно в виде огромного языка теплой соленой воды широким веером распространяется на площади между экватором и Ирландией, доходя на западе до долготы Азорских островов.

Если бы порог в проливе был настолько высок, что через него могло проходить только одно входящее течение, соленость достигла бы такой концентрации, при которой начинается осаждение гипса и соли. Глубоководным бурением в Средиземном море были вскрыты древние

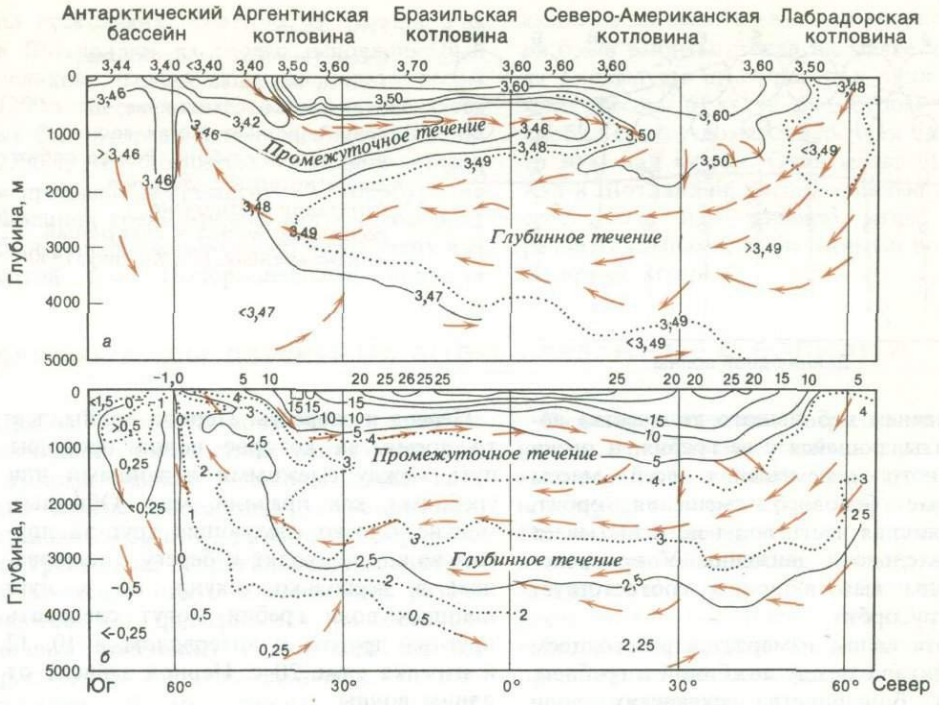


РИС. 15.15

Широтный разрез глубинных плотностных течений в Атлантическом океане, обусловленных разницей солености (*а*) и разницей температуры (*б*). (По Вюсту, 1958.)

соленосные осадки значительной мощности. Вполне возможно, что многие соленосные отложения земного шара образовались в обстановке, подобной средиземноморской, когда море было еще менее открытым, чем в настоящее время.

Напротив, в гумидном климате избыточная пресная вода полузамкнутых бассейнов, будучи более легкой, вытекает в море у поверхности. Если порог высокий, как в устье переуглубленных ледниками фиордов Норвегии, в глубине бассейна образуются застойные воды. Кислород в них истощается, большинство организмов погибает, образуется сероводород. Таким образом, отсутствие циркуляции заметно влияет на жизнь и характер осадконакопления в бассейне. Некоторые лишенные органических остатков пиритоносные глины геологического прошлого, вероятно, образовались в бассейнах подобного типа.

ВОЛНОВОЕ ДВИЖЕНИЕ И ОСОБЕННОСТИ ВОЛН

Волновое движение в глубокой воде представляет собой суммарный эффект движения смежных частиц воды по почти круговым траекториям (орбитам). Описываемые частицами орбиты, наподобие цепной реакции, вплотную, частично перекрываясь, следуют друг за другом в направлении распространения волны (рис. 15.16). Можно видеть, как лежащий на воде предмет поднимается и смещается вперед при подъеме волны, затем – при опускании волны – опускается и смещается назад без сколько-нибудь заметного изменения своего положения. Такого же характера движение происходит в толще воды: сама волна движется вперед, но, за

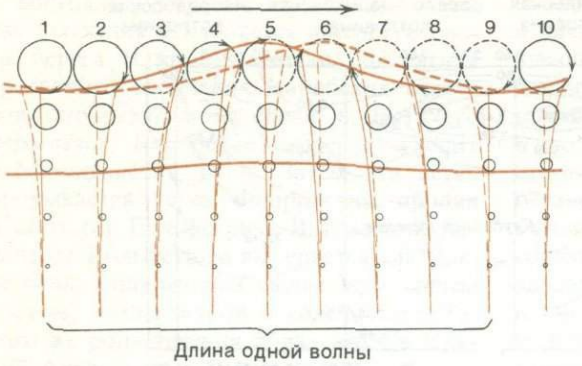


РИС. 15.16
Схематическое изображение волны, показывающее относительное движение частиц воды в разных частях волны и на разной глубине. Размер орбит дан в масштабе. Жирным пунктиром обозначено положение волны в следующий момент времени. (По Кюнену, 1950.)

исключением небольшого количества воды, скатывающейся с ее гребня, и очень медленного перемещения всей массы в случае бокового смещения орбит, подавляющая часть воды не испытывает поступательного движения. У поверхности воды высота волны соответствует диаметру орбит.

Высота волны *измеряется расстоянием* по вертикали между ложбиной и гребнем. Высота большинства океанских волн меньше 3 м и лишь у некоторых из них достигает 3–6 м. Штормовые волны в районе Британских островов достигают в высоту 10 м, а в антарктических водах – 16 м.

Длина волны, соответствующая расстоянию по горизонтали между соседними гребнями, меняется от 1 м и менее в относительно спокойных озерах до нескольких сот метров в районах зарождения штормовых волн. При выходе из района шторма высокие штормовые волны постепенно уплощаются,[1] длина их увеличивается, и в конце концов они превращаются в зыбь – длинные низкие волны. Длина волн зыби[2] может колебаться от 300 до 600 м.

Глубина проникновения волн зависит от размера круговых орбит или высоты волн и соотношения между глубиной воды и длиной волны. С увеличением глубины волновое движение быстро уменьшается, поэтому уже на глубине, равной половине длины волны, оно становится слабым (рис. 15.16); однако слабое волнение достигает морского дна даже в том случае, если длина волны меньше 1/20 глубины.

1 – [illegible]
2 – [illegible]

Период и скорость. Период волны, т. е. *то время, за которое волна проходит* путь между смежными ложбинами или гребнями, как правило, мал. Обычные, мелкие, близко следующие друг за другом волны подходят к берегу с интервалом в несколько секунд, но в цуге длинных волн гребни могут следовать *друг за другом с интервалом в 10, 12* и изредка даже 20 с. Период зависит от длины волны.

Скорость волн в глубокой воде прямо связана с периодом. Так, волна с периодом 6 с движется со скоростью около 35 км/ч. Волны с периодом 20 с несутся *со скоростью около 100 км/ч.*

Интерференция. Часто в движении одновременно находятся несколько накладывающихся друг на друга систем волн с разной длиной, высотой и направлением движения, так что возникающее в результате их взаимодействия волнение оказывается скорее неупорядоченным, чем ритмичным. Разные системы волн интерферируют между собой; они часто гасят друг друга, если их фазы не совпадают, и усиливаются в случае совпадения фаз.

Сила волн. Волны в зависимости от их высоты и длины обладают огромной силой. Средняя волна высотой 2 м оказывает давление около 15 т/м^2. Давление штормовых волн гораздо больше, примерно как у автомобиля при ударе о бетонную стенку на скорости 80 км/ч. Максимальное давление длится лишь доли секунды, но удары волн все время повторяются.

Силу волн можно проиллюстрировать

на нескольких примерах. У города Уик в Шотландии из своего основания был целиком вырван блок волнореза весом 1200 т. Несколькими годами позже здесь же был оторван бетонный блок, весящий 2350 т, с помощью которого было исправлено повреждение. У Шербура во Франции трехметровый валун весом 3,2 т был переброшен волнами через стену высотой 6 м. Подброшенными волнами камнями на высоте 45 м над уровнем моря были выбиты стекла на маяке у города Тилламук в шт. Орегон, а один булыжник весом 61 кг и диаметром 0,28 м пробил крышу дома смотрителя на высоте 30 м над морем. Окна маяка Даннет-Хэд в Шотландии, расположенные на высоте 100 м над уровнем моря, были разбиты камнями, захваченными волнами во время шторма.

ДРУГИЕ ВИДЫ ДВИЖЕНИЯ ВОДЫ, СВЯЗАННЫЕ С ВОЛНАМИ

Прибой. Скорость волн на мелководье уменьшается вследствие трения о дно при глубинах меньше половины длины волны. Волны постепенно укорачиваются, становятся выше и круче до тех пор, пока их гребни не запрокидываются и обрушиваются, и они в конце концов разбиваются или распадаются на беспорядочные прибойные волны или буруны (рис. 15.17). Типично волновая, ундулирующая, форма волны нарушается, и энергия движения волны несет воду вперед в виде накатной волны (рис. 15.18). Сила тяжести возвращает затем избыток воды с пляжа в море в виде обратной, откатной, волны.

Так как волны разной высоты и длины разрушаются при разной глубине воды, полоса прибоя смещается взад и вперед в зависимости от высоты прилива и состояния моря. Волноприбойная зона, или зона бурунов, лежит между берегом и линией прибоя.

Разрывные течения. Разрывными течениями, или сулоями, называют узкие потоки воды, вытекающие из волноприбойной зоны в море через линию прибоя. Питаемые прибрежными течениями в волноприбойной зоне, они пересекают ее в виде узких полос (рис. 15.19). Их скорость может достигать 1 м/с. Они способствуют удалению воды и осадков, принесенных на пляж ветровыми (дрифтовыми) течениями.

Преломление, отражение и дифракция волн. Волны, подходящие к берегу под острым углом, изгибаются в результате преломления (рис. 15.20). В то время как ближайшая к берегу часть волны касается дна и ее движение замедляется, удаленная от берега часть волны продолжает двигаться вперед со своей обычной скоростью. В итоге фронт волны на мелководье разворачивается почти параллельно берегу. Поэтому все элементы берега, и бухты и мысы, подвергаются почти ло-

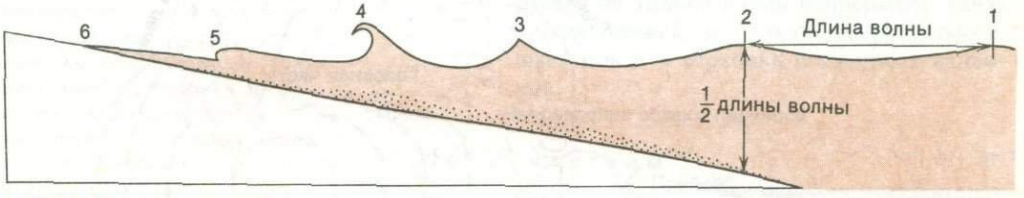


РИС. 15.17

Последовательные стадии образования прибоя и бурунов. Длинные низкие волны открытого моря (1) начинают задевать дно (2) на глубине, равной половине длины волны, и становятся на наклонном дне короче и выше (3). Это продолжается до тех пор, пока слишком малая глубина не начинает препятствовать частицам воды совершать полное круговое движение; когда это происходит, волны запрокидываются и обрушиваются у линии прибоя (4). После этого вода несется вперед в виде турбулентного наката (5), который сходит на нет, выкатываясь на пляж (6). После короткого отката вся последовательность повторяется при следующей волне. Донный песок в волноприбойной зоне взмучивается.



РИС. 15.18
Пляж в государственном парке Иколе, шт. Орегон. Волны разбиваются на отлогом дне, вода несется дальше на песчаный пляж, и избыток ее затем скатывается обратно в океан в виде откатной волны. На песке можно различить фестончатые следы, оставленные волнами. Океан относительно спокоен и находится в фазе отлива. (Фотография Департамента шоссейных дорог шт. Орегон.)

бовой атаке волн. Но преломление волн приводит к тому, что фронт атаки растягивается и сила ее ослабевает в бухтах, и, напротив, концентрируется и усиливается на боковых и головных участках мысов. Системы преломленных волн видны на многих фотографиях искривленных скалистых берегов (рис. 15.20).

Волны испытывают также дифракцию: при прохождении препятствия, например у конца дамбы, их направление меняется и энергия рассеивается. Рассеивание энергии приводит к уменьшению высоты волн за препятствием.

При ударах о скалы или искусственные волнорезы волны могут отражаться так же, как свет отражается зеркалом. Явления дифракции и отражения обязательно следует учитывать при проектировании портов и бассейнов для яхт, чтобы свести к минимуму возможность ущерба для небольших судов и избежать затягивания песком входов.

Перемещение материала вдоль берега. Если волны, подходящие к берегу под острым углом, преломляются не полностью, то косой накат воды на берег и ее возвращение почти прямо вниз по уклону пляжа вызывают перемещение твердых частиц вдоль берега по зигзагообразным, как зубья пилы, траекториям; это приводит к перемещению материала



РИС. 15.19
Схематическое изображение разрывного течения (сулоя), показывающее положение питающего канала, горла, головной части и границы пены по отношению к береговой линии и зоне прибоя. Длиной стрелок показана относительная скорость движения воды. (По Шепарду, 1972.)



РИС. 15.20

Фронт волны, искривленный в результате преломления, округ Кари, шт. Орегон. Изгиб фронта волны вызывается препятствиями на извилистой береговой линии. Маленькая бухта слева отрезана от моря песчаным баром (за деревом); песок накапливается также с подветренной стороны небольших утесов (скалистых выступов, отчлененных от суши волновой эрозией). (Фотография Департамента шоссейных дорог шт. Орегон.)

или миграции пляжей (рис. 15.21). При таком движении галька может переноситься на многие километры от места ее образования, песок же транспортируется на сотни километров.

Прибрежные течения. Косо подходящие к берегу волны вызывают образование течений, идущих вдоль берега. Часть воды в волноприбойной зоне у берега гонится вперед параллельно генеральному направлению береговой линии. Скорость такого течения может достигать нескольких метров в секунду; оно способно драгировать дно и переносить путем волочения песок и гравий. Прибрежные течения переносят также частицы, поднятые со дна в волноприбойной зоне, в особенности песок, взмученный в турбулентной воде.

Прибрежными течениями и с помощью механизма миграции пляжей большое количество песка (табл. 15.4) транспортируется не только вдоль непрерывно тянущихся пляжей, но также вокруг мысов, выступов и в верховья подводных каньонов.

РИС. 15.21

Перемещение гальки и песка вдоль берега, вызванное подходом волн к берегу под косым углом. Косой накат каждой волны выносит твердые частицы на пляж по диагонали – под углом к берегу, откат же возвращает их почти прямо вниз по склону. Затем частицы подхватываются следующей набегающей волной и снова выносятся на пляж. Последовательность движения – от *а* к *б*, от *б* к *в* и т. д., но для перемещения на расстояние, превышающее длину волны, требуется многократно повторяющееся движение под действием многих волн, тогда как на рисунке изображены единичные траектории.



Таблица 15.4
Количество песка, перемещающегося вдоль берега

Район	м³/год[1]	Период, годы
Мыс Санди-Хук, шт. Нью-Джерси	377 145	1885–1933
То же	333 540	1933–1951
Пролив Абсикон, шт. Нью-Джерси	306 000	1935–1946
Залив Галвестон, шт. Техас	334 687	1919–1934
Окснард, шт. Калифорния	765 000	1938–1948
Порт-Уайнимe, шт. Калифорния	382 500	1938–1948

[1] 1 м³ весит около 1,8 т.
По данным Дж. У. Джонсона: *J. W. Johnson*, The littoral drift problem at shoreline harbors. Proc. Amer. Soc. Civil Engineers, Waterways and Harbars Division, vol. 83, paper 1011, 1957.

Береговые процессы в озерах. Все береговые процессы, характерные для морских побережий, происходят и в озерах, но там, где волны меньше, их действие может быть менее эффективным. Близ некоторых отрезков морских побережий волнение меньше, и они подвергаются менее жестоким атакам волн, чем берега некоторых озер, но, как правило, береговые процессы в озерах не так мощны.

На Великих озерах береговая линия в слабо консолидированных породах в некоторых районах отодвигается на 2–3 м в год. Особенно сильному воздействию берег подвергается во время половодий, связанных с сезонными колебаниями уровня воды.

Воздействие волн может быть усилено или ослаблено *сейшами*, представляющими собой периодические наклоны всей водной поверхности озера, подобные движению единичной волны в тазу. Чаще всего сейши вызываются ветром и перемещением областей низкого и высокого атмосферного давления, но они могут быть также связаны с движениями земной коры и с землетрясениями. Во время землетрясения в марте 1964 г. сейша образовалась на озере Кенай, Аляска. Сейша, возникшая при перекосе дна озера Хебген в шт. Монтана во время землетрясения Мадисон-Каньон в 1959 г., несколько раз перехлестывала через плотину Хебген-Дам. Поверхность озер бывает горизонтальной только в тех случаях, когда ветер и атмосферное давление позволяют ей успокоиться. Перепад атмосферного давления на противоположных концах крупных озер приводит к понижению уровня воды в области высокого давления и его повышению в области низкого давления. Колебания воды могут продолжаться сутками. Волновая эрозия усиливается при подъеме сейши, так как в более глубокой воде уменьшается трение о дно в прибрежной зоне. Это относится и к приливам на морских побережьях. При увеличении трения о дно во время отлива волновая эрозия уменьшается.

ЭРОЗИЯ БЕРЕГОВ

Механизмы эрозии. Волны разрушают берега несколькими способами. Для дезинтеграции и удаления рыхлых пород, таких, как глина, алеврит, песок, гравий или ледниковая морена, хватает *ударного* и *размывающего* действия волн. Для разрушения крепких коренных пород требуются более значительные усилия. Обычно волны разрушают крепкую породу, непрестанно долбя ее *гидравлическими клиньями*, которые возникают по трещинам при ударах волн; под их воздействием порода мало-помалу разрушается. Этот механизм представляет собой разновидность *гидравлического выпахивания*. Другой механизм разрушения берегов волнами – *абразия*. Волны, содержащие песок и гравий, абрадируют, стирают каме-



РИС. 15.22
Эрозия берега на Йоркширском побережье Англии, где за время, прошедшее с эпохи римских завоеваний, были размыты места расположения около 30 городов. Мыс Фламборо-Хед на севере сложен крепкими известняками. Мыс Сперн-Хед на юге представляет собой косу. Лежащий между ними ровный берег представляет собой береговой уступ – клиф, сложенный легко разрушающимися ледниковыми валунными глинами, песком и гравием. (По Стирсу.)

нистый берег. Волны также пропиливают выемки и щели и подтачивают породы, лежащие выше зоны непосредственного воздействия волн. Потерявшие опору породы обваливаются или сползают в море. Берега, сложенные известняками, подвергаются, кроме того, *растворению* в морской воде. В узких проходах и расселинах дно может подчищаться *приливно-отливными* потоками.

Отступание берегов. Главный результат волновой эрозии заключается в наступлении моря на сушу (рис. 15.22). Если берег сложен рыхлыми или сильно трещиноватыми породами, скорость его отступания может местами достигать нескольких метров в год.

Одним из примеров быстрого срезания берега волнами может служить остров Гельголанд в Северном море. В результате волновой эрозии его периметр сократился с 200 км в 900 г. до 5 км в 1900 г. Его площадь уменьшилась примерно до 0,6 км^2, прежде чем перед первой мировой войной были приняты защитные меры для того, чтобы сохранить остров в качестве немецкой военно-морской базы.

В Йоркшире, Англия, берег в районе Холдернесса был размыт за период между 1852 и 1952 гг. на протяжении 60 км со средней скоростью 1 м/год, а местами до 3 м/год. Береговой уступ высотой в среднем 15 м сложен здесь относительно рыхлыми ледниковыми отложениями. Потери со времен римских завоеваний оцениваются в виде полосы суши шириной 4 км (рис. 15.22).

Избирательная эрозия. Твердые породы по большей части размываются неравномерно. По мере того как волны непрестанно долбят берег и наносят ему мощные удары, выявляются различия в устойчивости пород, обусловленные степенью их цементированности, трещиноватости, прочности на истирание. В итоге такого неоднородного воздействия линия берега в крепких породах приобретает изъеденную, зазубренную в плане форму. И наоборот, берега, сложенные рыхлыми, слабо литифицированными породами, оказывающими однородное сопротивление волнам, размываются равномерно с образованием сглаженной береговой линии (рис. 15.22).

Характерные эрозионные формы рельефа. С волновой эрозией связано образование ряда характерных форм рельефа

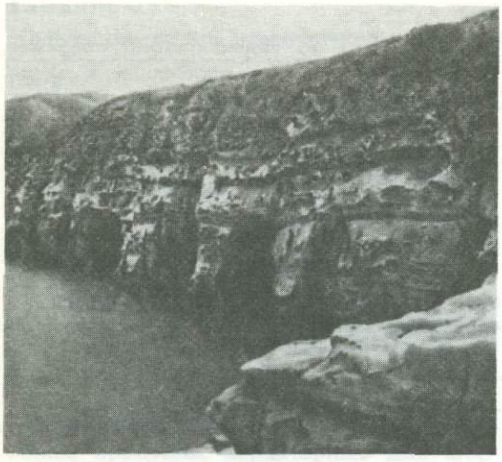


РИС. 15.23
Береговой уступ (клиф) и гроты в районе Ла-Йолла, шт. Калифорния. Клиф «подрезан» волнами. (Фотография Арнолда, Геологическая служба США.)

морских берегов. Одна из наиболее типичных – это *береговой (волноприбойный) уступ*[1] или *клиф* (рис. 15.23). В основании обрывов, выработанных в крепких коренных породах, обычно имеются крупные горизонтальные *ниши*, вытянутые вдоль зоны прямых ударов волн (рис. 15.24). Разрушая рыхлые породы в нижней части берегового уступа, волны могут выдалбливать *волноприбойные гроты*.[2] Если в кровле таких гротов имеются проломы,[3] вода может вырываться через эти «*вентиляционные*» *отверстия* вверх, особенно во время штормов или приливов. В тех случаях, когда гроты насквозь прорезают выступающие в море скалистые мысы, могут образоваться *естественные каменные мосты* или *морские арки*. При размыве в зонах тектонических разрывов образуются *глубокие расселины* (рис. 15.25).

Любые массивы прочных пород, отчленившиеся от суши в результате размыва окружавших их пород, превращаются в *морские утесы* или *столбовидные скалы* (рис. 15.26). Процесс расширения трещин и обрушение арок способствуют возникновению изолированных морских утесов. Врезание более крупного масштаба, чем размыв по тектоническим трещинам

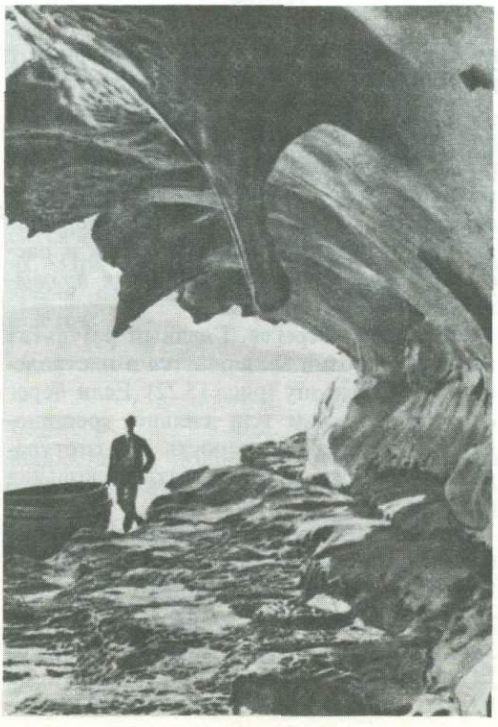


РИС. 15.24
Волноприбойная ниша в основании берегового уступа в районе Нанаймо, провинция Британская Колумбия. (Фотография Министерства внутренних дел Канады.)

1 wave-cut cliff
2 sea caves
3 skylights

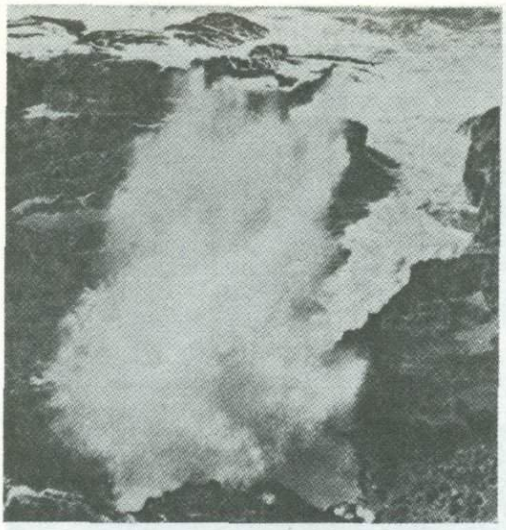


РИС. 15.25
Расселина, образовавшаяся в результате эрозии вдоль зоны разрыва в базальтовых лавах. (Фотография Департамента шоссейных дорог шт. Орегон.)

с образованием расселин, приводит к образованию *бухт* на участках берега, сложенных менее прочными породами, тогда как их антиподы – выдающиеся в море скалистые выступы – сохраняются в виде *мысов*.

По мере того как эрозия, разрушая и удаляя породы берега, продвигается все дальше в глубь суши, береговой откос, по которому катятся волны, расширяется и превращается в плоскую поверхность, называемую *волноприбойной террасой*. Эта поверхность частично обнажается при отливе (рис. 15.27). Обычно на ней видны многочисленные неровности – ямы, рвы, холмы, скальные рифы, обязанные своим происхождением избирательной эрозии.

Валуны, галька и песок, служащие орудием волновной эрозии, сами подвержены эрозии (рис. 15.28). Они истираются друг о друга, приобретая округлую форму и уменьшаясь в размерах. Вновь и вновь подвергаясь перекатыванию, они



РИС. 15.26
Группа морских утесов в районе Бандон, шт. Орегон. Первоначально окружавшие их менее крепкие породы были размыты волнами. (Фотография Департамента шоссейных дорог шт. Орегон.)

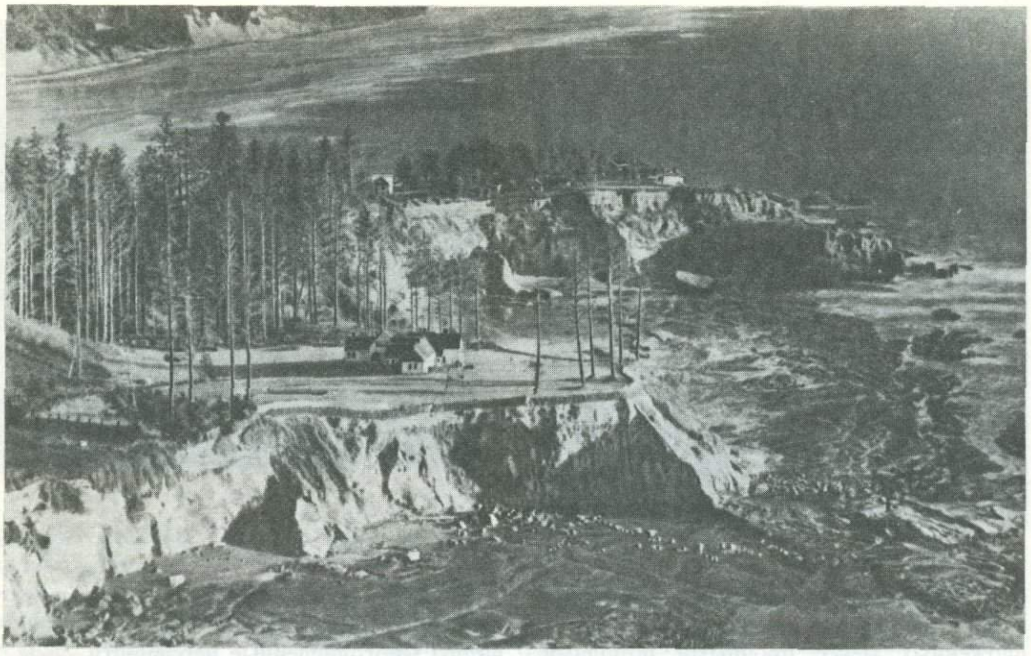


РИС. 15.27

Приподнятая морская терраса, береговой уступ и формирующаяся в настоящее время волноприбойная терраса (обнажающаяся при отливе) в районе государственного парка Девилс-Панч-Боул в шт. Орегон. Обеими террасами срезаются полого наклоненные слои песчаников и алевролитов. Обе террасы образовались в результате эрозионной деятельности океана; при этом верхняя терраса образовалась до воздымания берега, нижняя (продолжающаяся формироваться) – позже. (Фотография Департамента шоссейных дорог шт. Орегон.)

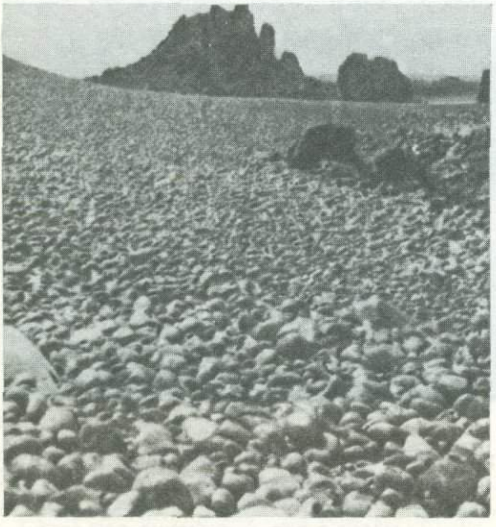


РИС. 15.28

Хорошо окатанная галька на пляже в окрестностях города Ньюпорт, шт. Орегон.

сортируются по размеру и удельному весу. При сортировке происходит концентрация магнетита, хромита, золота, платины, оловянных и вольфрамовых руд, циркона, граната и редкоземельных минералов, причем часто в количестве, достаточном для промышленной разработки заключающих их осадков.

ОСАДКОНАКОПЛЕНИЕ В БЕРЕГОВОЙ ПОЛОСЕ

Материал, транспортируемый волнами и прибрежными течениями, может двигаться к берегу или уноситься на глубину в сторону от берега за пределы действия волн. Местами материал перемещается вдоль берега, попадая в бухты или получая возможность спокойно осесть на дно, если волны и течения ослабевают.

Береговые осадки накапливаются главным образом в форме *пляжей, намывных кос, баров, барьерных баров* и *волнонамывных террас* (рис. 15.29). Эти образования распространены не только по берегам современных морей и озер, но были, несомненно, свойственны и древним побережьям. Часть из этих древних береговых осадков, сохранившихся до наших дней в толщах горных пород, служит важным источником нефти и природного газа. Ископаемые береговые осадки, обладающие высокой пористостью и проницаемостью, являются прекрасными коллекторами, в которых накапливаются и из которых могут быть извлечены эти флюиды.

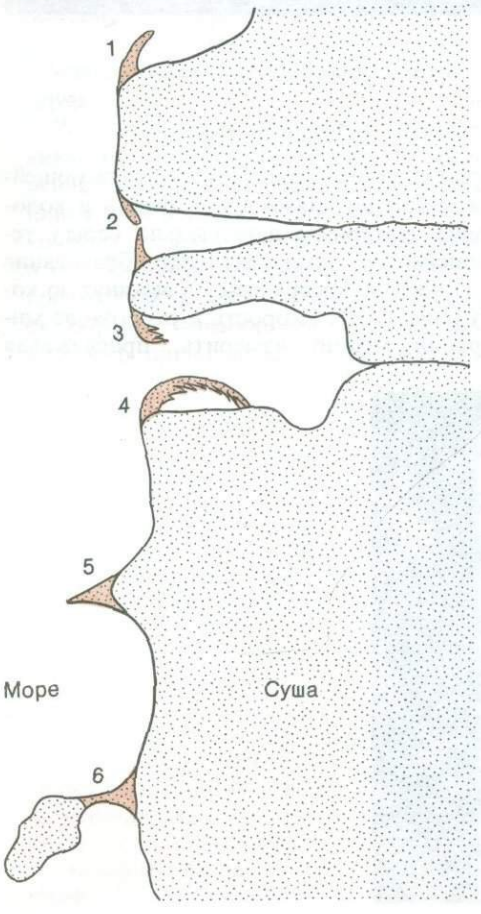


РИС. 15.29
Морфологические типы береговых осадков: 1 – коса; 2 – бар устья бухты; 3 – крючковидная коса; 4 – петлевидный бар; 5 – фестончатая коса; 6 – пересыпь (томболо).

Пляжи. В типичном виде отложения пляжей представляют собой гряды или насыпи гальки, гравия или песка, полого спускающиеся в сторону моря (рис. 15.30, 15.31). Сезонные изменения состояния моря могут приводить к удалению и повторному возвращению пляжных осадков. При накоплении осадков на обращенной к морю стороне пляжа его площадь может увеличиваться (обычно путем образования многократно повторяющихся гряд) на сотни метров и даже километры.

Косы. Типичная коса – это продолжение пляжа в сторону моря от какого-то пункта на суше или в горловине залива. Частицы осадка постоянно намываются на пляж диагональным накатом косо подходящих к берегу волн и уносятся обратно



РИС. 15.30

Галечниковый пляж в районе Три-Айленд-Коув на острове Кейп-Бретон, провинция Новая Шотландия. Пляж состоит из дискообразной уплощенной гальки, лежащей друг на друге как дранка на крыше. (Фотография Геологической службы Канады.)

с пляжа под прямым углом к берегу при откате (рис. 15.21). В результате такого повторяющегося зигзагообразного движения осадочные частицы перемещаются вдоль пляжа до тех пор, пока не достигнут конца суши. Здесь они образуют косу, вначале в виде отмели и позже в виде нового выступа суши. При продолжающейся миграции пляжа вдоль берега и волочении материала параллельно берегу течениями это аккумулятивное образование удлиняется, превращаясь в вытянутую косу (рис. 15.29). Скорость и расстояние миграции можно измерить, прослеживая



РИС. 15.31

Пляж в бухте Эмералд-Бей, Лагуна-Бич, шт. Калифорния. По морской террасе проходит автострада. (Фотография компании «Спенс эйр фотос».)

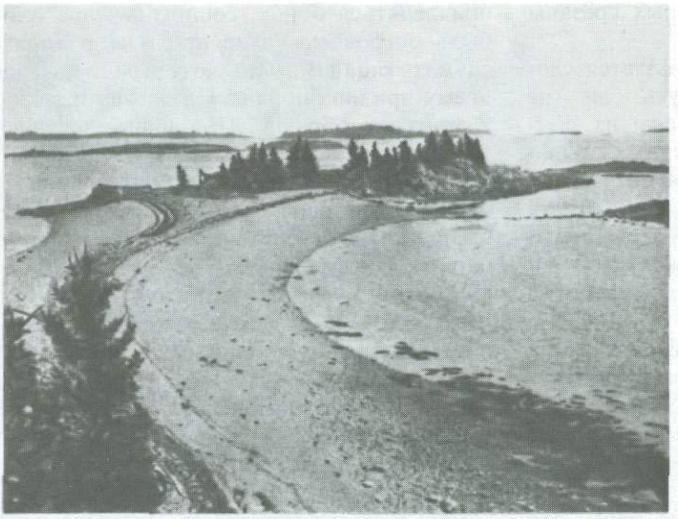


РИС. 15.32
Остров, соединяющийся с сушей, Спрус-Хед-Айленд, шт. Мэн. Песчаный бар, связывающий остров с берегом, носит название пересыпи, или томболо. (Фотография Бастина, Геологическая служба США.)

перемещение какого-нибудь приметного материала, например особых типов пород, радиоактивного песка или искусственно введенного флюоресцирующего песка.

Растущие концы некоторых кос наталкиваются на сопротивление преломленных волн или поперечных по отношению к ним течений. В результате этого их кончики изгибаются, превращаясь в *крючковидные косы* (рис. 15.29). Иногда крючковидная коса полностью загибается, образуя *петлевидный бар*, оба конца которого причленены к суше. Косы, соединяющие острова между собой или острова с «большой землей», называются *пересыпью*, или *томболо* (рис. 15.29, 15.32). Косы, целиком или почти целиком перегораживающие вход в бухту, становятся *барами устья бухты* (рис. 15.29, 15.33). Косы обычно развиваются также по обе

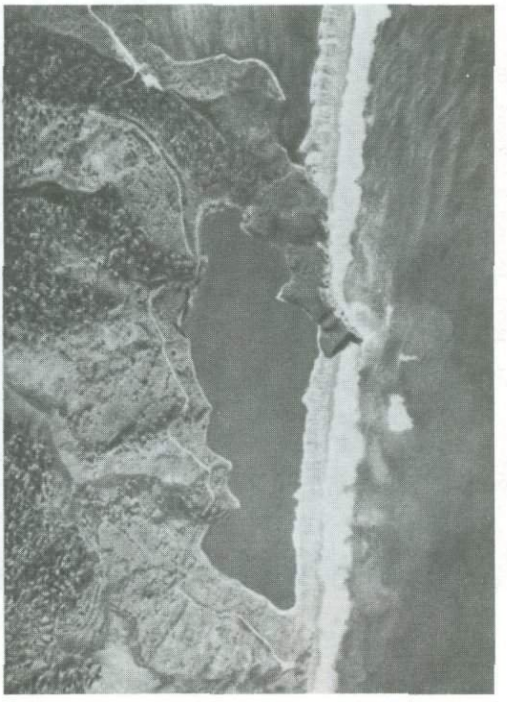


РИС. 15.33
Бар устья бухты и береговая лагуна вблизи города Юрика в шт. Калифорния. Лагуна (в центре) отрезана от Тихого океана песчаным баром. Выше (южнее) расположена еще одна такая же лагуна. Песчаный бар этого типа образуется из косы, которая растет до тех пор, пока не отрежет бухту от открытого моря. Такие и другие подобные им бары спрямляют форму береговой линии. (Фотография компании «Фэрчайлд эриел сервис».)

стороны мысов, концы которых срезаны волновой эрозией.

Бары. Термин «бар» используется свободно по отношению чуть ли не к любым прибрежным насыпям из рыхлого песка и гравия, принесенных волнами и течениями. В дополнение к наземным формам рельефа, таким, как косы, пересыпи и барьерные бары, существуют многочисленные бары, представляющие собой просто подводные отмели разной конфигурации.

Некоторые бары и косы имеют серповидную форму. Осадки в форме таких фестончатых выступов, далеко выдающихся в море, можно видеть на мысе Гаттерас в Северной Каролине и на мысе Канаверал во Флориде (рис. 15.34).

Барьерные бары. Барьерные бары – это длинные прибрежные бары, вытянутые параллельно берегу. От суши они отделяются лагунами (рис. 15.35) и обычно бывают покрыты холмами песка, переваемого ветром. Барьерные бары создаются волнами, наносящими «бортовые» удары по пологому откосу песчаного дна моря. Барьерный бар может причленяться одним концом к суше или быть островом. Узкие проходы в барах служат каналами, по которым вода во время прилива попадает в лагуну и вытекает из нее обратно. Приливные течения, проходящие по этим каналам, могут намывать приливные дельты в спокойной воде позади бара. Под действием волн, прибрежных течений и ветра барьерные бары могут с течением времени медленно смещаться в сторону суши или вдоль берега. Многие пользующиеся популярностью пляжи, как, например, пляж у города Атлантик-Сити в шт. Нью-Джерси, являются барьерными барами. Формирование кос, барьерных баров, баров в горловинах заливов приводит к сглаживанию неровностей береговой линии.

Волнонамывные террасы. Часть осадочного материала, смываемого с пляжа в море, скапливается ниже того уровня, на котором он взмучивается волнами. Если свал материала на глубину идет по круто опускающемуся дну моря, материал оседает в наклонном положении. Если же осадки разносятся по плоской поверхности дна, то они имеют тенденцию накапливаться ниже зоны волнения в форме волнонамывной террасы. Вследствие изменения уровня моря, связанного с оледенением в плейстоцене, волнонамывные террасы у современных побережий, как правило, отсутствуют. Хорошие примеры можно, однако, наблюдать на обнаженных берегах древних озер.

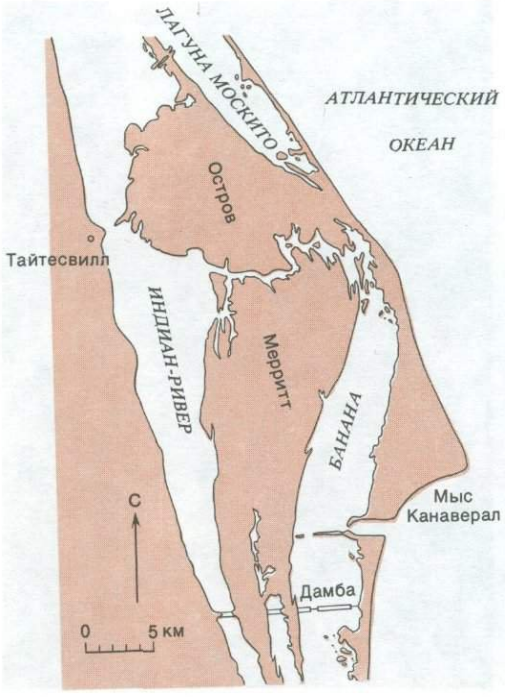


РИС. 15.34
Фестончатая форма береговых наносов на мысе Канаверал, шт. Флорида.

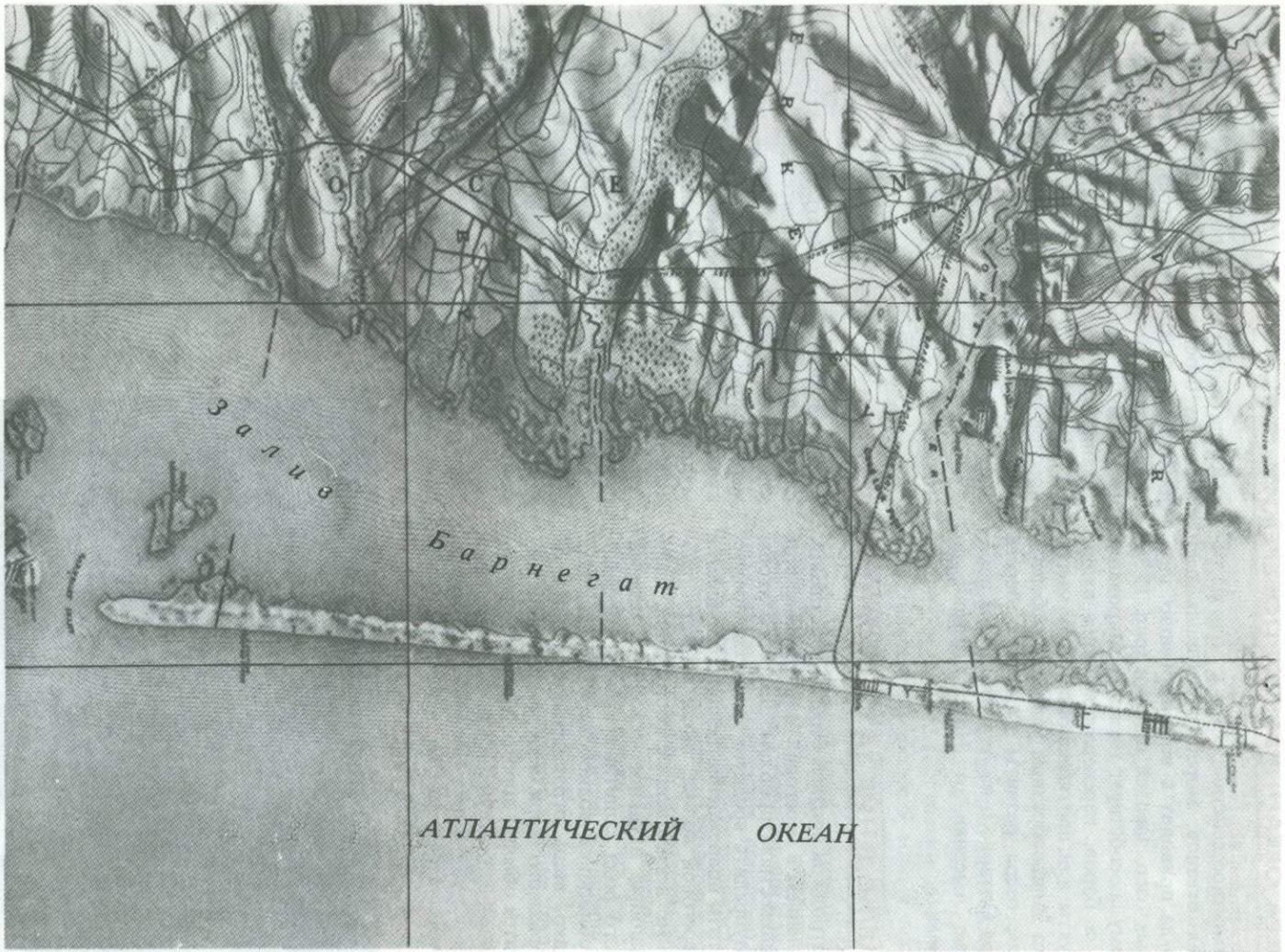


РИС. 15.35

Макет побережья шт. Нью-Джерси в районе залива Барнегат; виден длинный барьерный бар—прибрежная песчаная гряда, намытая волнами, прибрежными течениями и ветром. (По материалам компании «Аэро сервис корпорейшн».)

ОЗЕРА ОКЕАНИЧЕСКИХ ПОБЕРЕЖИЙ

Совместное действие ветра и волн на берегах океанов, морей и крупных озер иногда приводит к возникновению здесь новых озер, заводей и лагун (рис. 15.36). Этому способствует также формирование кос и баров, перегораживающих входы в бухты или протягивающихся от мысов через заливообразные углубления берега. Такие озера развиты у южного берега озера Онтарио и на Атлантическом побережье Америки от Новой Англии до Панамы.

Когда в результате поднятия или каких-либо береговых процессов эстуарии и заливы оказываются отрезанными от моря, вода в них благодаря речному притоку обычно опресняется вплоть до образования пресных озер. В озере Маракайбо в Венесуэле и озере Никарагуа живут пресноводные акулы, что приводит к мысли о некогда существовавшей связи этих озер с морем.

НАБЛЮДЕНИЕ ЗА СОСТОЯНИЕМ БЕРЕГОВ

Контроль за эрозией берегов и осадконакоплением в береговой зоне сталкивается с множеством проблем. Для того чтобы предупредить вредную эрозию и предотвратить повреждение ценного имущества в береговой полосе, люди возводят различные искусственные сооружения, сдерживающие активность волн и течений. Такого рода защитные стенки, перемычки, облицовка, волнорезы и дамбы дают, однако, лишь ограниченную защиту от штормового моря, а их поддержание обходится обычно дорого. Местами они нарушают существующий режим поведения волн и прибрежных течений. В некоторых случаях устойчивые до этого берега внезапно начинают размываться. В других случаях происходит нежелательное отложение песка. Ряд сооружений, как, например, дамбы, устанавливаемые перпендикулярно берегу, возводятся с целью стимулировать накопление осадков. Они используются для улавливания дополнительного песка там, где не хотят допустить размыв пляжа.

Постройка дамб в проливе Лейк-Уэрт во Флориде привела к накоплению осадков на северной (защищенной от течений) стороне и к истощению пляжей дальше вдоль берега с подветренной стороны, так что в окрестностях города Палм-Бич началась эрозия (рис. 15.37). Проблему

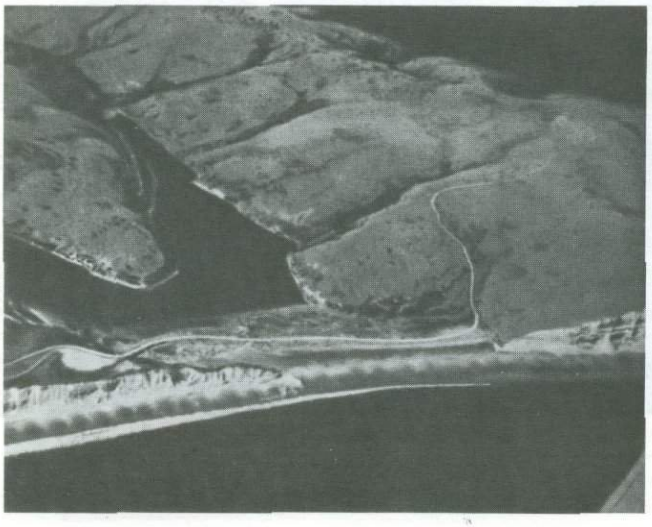


РИС. 15.36
Пресноводный водоем на побережье Калифорнии, образовавшийся в устье реки, блокированном береговыми осадками. (Фотография Брэдли.)



РИС. 15.37
Канал Лейк-Уэрт в шт. Флорида, через который пропускают песок для поддержания пляжей в районе Палм-Бич с помощью поперечных дамб.

решили, закачивая песок за проливом.

Сооружение в 1929 г. волнореза для защиты гавани Санта-Барбара в шт. Калифорния вызвало накопление перед волнорезом песка со скоростью 600 000 т в год. К 1934 г. емкость этого места была исчерпана, и песок начал двигаться вокруг конца волнореза и заполнять гавань (рис. 15.38). К 1952 г. в гавани за волнорезом накопилось более 9 млн. т песка. В настоящее время песок постоянно вычерпывают из гавани, пополняя им расположенный южнее пляж, который был сильно размыт.

У Санта-Моники в Калифорнии для защиты малогрузных судов примерно на 600 м в море был выдвинут волнорез. За ним, однако, образовалась волновая тень, послужившая причиной накопления у берега песка. Вначале у пляжа образовался песчаный выступ, а через 30 лет эта естественная насыпь выросла в ширину до нескольких сотен метров.

Несмотря на упомянутые выше трудно-

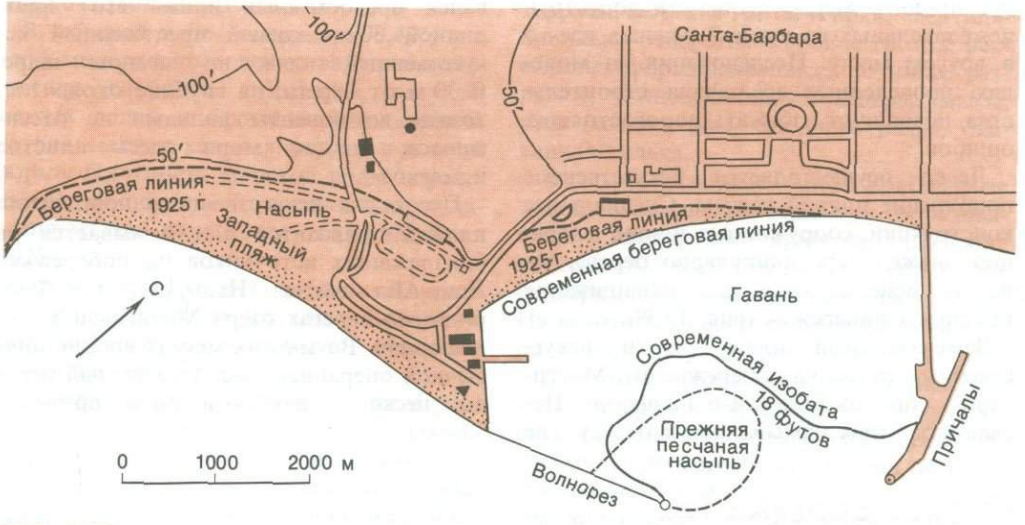


РИС. 15.38
Аккумуляция песка, перемещающегося вдоль пляжа, у города Санта-Барбара в шт. Калифорния; песок скапливается преимущественно к западу от волнореза и у его конца, где поэтому возникает необходимость проведения землечерпательных работ.

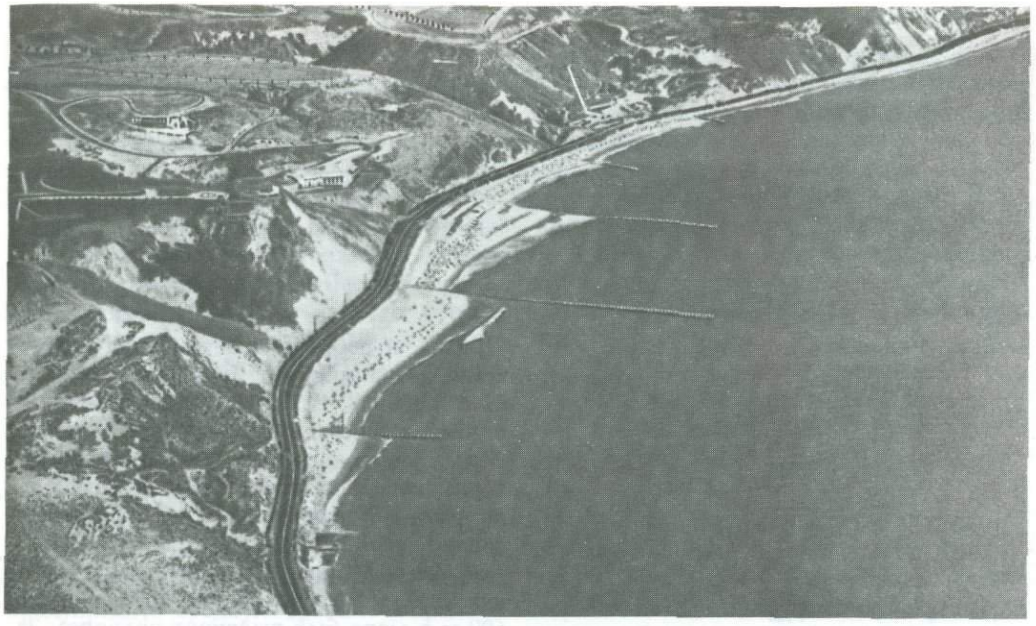


РИС. 15.39

Поперечные дамбы, сооруженные для предотвращения миграции пляжей вдоль берега у города Санта-Моника в шт. Калифорния. (Фотография компании «Спенс эйр фотос».)

сти, инженеры обычно достаточно успешно справляются с выбором проектов, соответствующих местным условиям, и могут принять меры, чтобы не допустить нежелательных изменений режима где-то в другом месте. Исследования на моделях, проведенные до начала строительства, позволяют избежать дорогостоящих ошибок.

Легко осуществляется искусственное пополнение пляжей песком. Специальные конструкции, сооружаемые в зоне миграции пляжей перпендикулярно берегу, успешно используются для наращивания песчаного побережья (рис. 15.39).

Замечательный пляж создан искусственным путем на побережье шт. Миссисипи у городов Билокси и Галфпорт. Песчанистые илы намывались к берегу, где слабыми волнами из них вымывался тонкий материал; в результате оставалась песчаная фракция, из которой и образовался превосходный пляж. Этот пляж длиной 30 км – самый протяженный искусственный пляж на земном шаре. В 30 м от берега, на глубине около 1 м, тонкие компоненты волнами не отсеиваются, и дно моря здесь илистое и мягкое.

Песок для искусственного пополнения пляжей привозится или намывается из близлежащих источников на побережьях Лонг-Айленда, шт. Нью-Джерси и Флориды, на берегах озера Мичиган и в Калифорнии. Во многих местах вполне привычной операцией стал транзитный перенос песка за дамбы и узкие проливы.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ

Океанические бассейны заслуживают внимания не только из-за их огромного размера (71,8% поверхности Земли) и глубины (максимальные глубины превышают 11 000 м), но и как области сосредоточения терригенных и органических

осадков. Океаны поставляют влагу для дождей, а волны и прибрежные течения преобразуют берега.

Океаническое дно изучается геофизическими методами (сейсмическими, гравиметрическими, магнитометрическими и акустическими); используются для этого также глубоководные аппараты и бурение (в особенности ведущееся по Проекту глубоководного бурения). Глубина воды измеряется с помощью эхолотирования. Средняя глубина Мирового океана составляет 3795 м.

Элементами подводного рельефа являются континентальные шельфы, континентальные склоны, континентальное подножие, абиссальные равнины и ряд форм относительно более подчиненного значения – подводные каньоны, срединно-океанические хребты и поднятия, островные дуги, глубоководные желоба, подводные вулканы, подводные горы, гийоты, коралловые рифы, атоллы.

Температура морской воды у поверхности колеблется приблизительно от 35°C в тропиках до −2°C в полярных областях, но температура основной массы воды чуть выше точки замерзания. Свет проникает лишь на небольшую глубину, и поэтому в большей части океана не только холодно, но и темно.

В морской воде содержится 3,45% (по весу) минерального вещества, преимущественно хлоридов, сульфатов, двууглекислых солей и бромистых соединений натрия, магния, кальция и калия в ионной форме. Плотность морской воды определяется температурой, соленостью и давлением; она колеблется около значения 1,025.

Вся среда обитания морских организмов подразделяется на зоны – литоральную, неритовую, батиальную, абиссальную и пелагическую.

Поверхностные течения открытого океана, подобные Гольфстриму, перемещаются в основном под действием господствующих ветров глобального значения и в меньшей степени под действием штормов. Глубинные течения представляют собой плотностные течения, вызываемые перепадами температуры и солености.

Морские волны складываются из движения частиц воды по непрерывно следующим друг за другом круговым орбитам, диаметр которых равен высоте волны. Волны очень разнообразны не только по высоте, но также по длине, глубине проникновения, периоду волны и скорости распространения. Штормовые волны накатываются на берег с силой, способной двигать крупные валуны и швырять камни на большую высоту над уровнем моря.

Волны подвержены интерференции, преломлению, дифракции и отражению. На мелководье волны создают прибой, накатные и откатные волны в волноприбойной зоне, вызывают перемещение материала вдоль берега и прибрежные течения.

Эрозионная деятельность волн проявляется в истирании и смыве рыхлого материала, гидравлическом разрушении и абразии твердых пород, растворении известняков. Эти процессы приводят к отступанию берегов со скоростью, которая легко может быть измерена. При этом образуются морские утесы и столбовидные скалы, ниши, волноприбойные террасы, морские гроты и арки, «вентиляционные» отверстия в кровле гротов, расселины, сформировавшиеся по зонам разрывов, волноприбойные пещеры, мысы, ямы (котлы), рвы, скальные рифы, окатанная галька.

Волны и связанные с ними прибрежные течения намывают осадки с образованием пляжей, кос, крючковидных кос, петлевидных баров, пересыпей (томболо), барьерных баров, волнонамывных террас. На некоторых берегах под действием ветра и волн образуются озера и лагуны.

Для того чтобы ограничить нежелательную эрозию берегов или стимулировать, там, где в этом есть необходимость, аккумуляцию береговых осадков, используются защитные стенки, облицовка берегов, волнорезы, дамбы, ведутся землечерпательные работы, намывается песок за дамбами и узкими проливами.

ВОПРОСЫ

1. Какие методы используются для изучения океанических бассейнов?
2. Какие формы подводного рельефа обнаруживаются на морском дне?
3. Связаны ли между собой течения в атмосфере и в океанах? Если связаны, то как?
4. Как океанические течения влияют на климат суши? Объясните и приведите примеры.
5. За счет каких энергетических источников образуются волны в воде?
6. Каковы важные свойства волн, которые могут быть измерены?
7. Какие эрозионные и аккумулятивные формы рельефа суши образуются в результате воздействия энергии волн на берега?
8. Какими средствами можно контролировать эрозию и отложение осадков в береговой полосе?

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Bascom W., 1964, Waves and Beaches, Anchor Books, Doubleday and Co., Inc., New York.

Capurro L. R. A., 1970, Oceanography for Practicing Engineers, Barnes and Noble, New York.

Davis R. A., Jr., 1977, Principles of Oceanography, 2d ed., Addison-Wesley Pub. Co., Inc., Reading, Mass.

Gross M. G., 1977, Oceanography: A View of the Earth, Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs, N. J.

Heezen B. C, Hollister C. D., 1971, The Face of the Deep, Oxford Univ. Press, New York.

McCormick J. M., Thiruvathukal J. V., 1976, Elements of Oceanography, Saunders, Philadelphia.

Menard H. W., 1964, Marine Geology of the Pacific, McGraw-Hill Book Company, New York.

Moore J. R. (ed.), 1971, Oceanography (Readings from Scientific American), W. H. Freeman and Company, San Francisco.

Nairn A. E. M., Stehli F. G., 1973, The Ocean Basin and Margins, Plenum Press, New York.

Shepard F. P., 1977, Geological Oceanography: Evolution of Coasts, Continental Margins, and the Deep-Sea Floor, Crane, Russak and Co., New York.

Shepard F. P., Dill R. F., 1966, Submarine Canyons and Other Sea Valleys, Rand McNally and Company, Chicago.

Turekian K. K., 1976, Oceans, 2d ed., Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs, N. J.

Vetter R. C., 1973, Oceanography: The Last Fronier, Basic Books, New York.

Worthington L. V., 1976, On the North Atlantic Circulation, The Johns Hopkins Press, Baltimore.



16 РАБОТА ВЕТРА

В предыдущих главах было описано влияние ветра на усиление процессов испарения, распределение над поверхностью Земли дождевых облаков, температуру и образование волн и морских течений. Ветер выступает также в роли градационного, сортирующего фактора.

Градационное действие ветра объясняется не столько его силой, сколько огромным объемом вовлекаемого в движение воздуха. Геологически активная, или турбулентная, часть атмосферы – тропосфера обладает толщиной около 6 км у полюсов, 11 км в средних широтах и 18 км на экваторе. При обычных обстоятельствах пыль сосредоточена в нижних слоях этого объема воздуха, но при атомных взрывах и взрывных вулканических извержениях пыль выбрасывается в самые высокие слои тропосферы и даже еще выше – в стратосферу.

Тонкая пелена пыли, которую несет ветер, обычно не производит внушительного впечатления до тех пор, пока не взвешивается проба, взятая с изучаемой территории, и не вычисляется общий вес пыли при пылевой буре. Один грамм пыли (т. е. приблизительно то количество, которое умещается на десятицентовой монете) на 0,1 м^2 площади дает 10 т на 1 км^2. В районе города Линкольн в шт. Небраска в марте 1935 г. за 4 дня накопилось в пять раз большее количество пыли (5 г на 0,1 м^2). На этой же площади в апреле за две недели выпало дополнительно еще 9 г пыли на 0,1 м^2. Видимость



РИС. 16.1
Надвигающаяся пылевая буря на западе Оклахомы. Такая буря способна переносить огромное количество пыли на большое расстояние. (Фотография компании «Пикчерс».)

во время жестокой пылевой бури сильно уменьшается (рис. 16.1).

Пылевая буря, далеко превосходящая все те, которые бывают на Земле, наблюдалась на Марсе в период с сентября по ноябрь 1971 г. Она зафиксирована на фотографиях, полученных «Маринером-9». Этой пылевой бурей, поднявшейся до высоты 6 км, планета была окутана целиком на протяжении почти всего этого двухмесячного срока.

Диаметр частиц марсианской пыли, покрывающей обширные площади на поверхности Марса, оценивается в 0,010 мм, что соответствует тонкому порошку талька. Плотность атмосферы Марса более чем в 100 раз меньше плотности земной атмосферы; следовательно, для возникновения пылевой бури, даже в случае такой тонкой пыли, необходима скорость ветра 160 км/ч. Марсианские пылевые бури возникают чаще и отличаются большей силой, когда планета максимально приближается к Солнцу; это наводит на мысль, что причиной таких сильных ветров может служить интенсивный конвективный прогрев. При осаждении пыли образуются длинные полосы дюн длиной более 135 км.

Из приведенных примеров должно быть ясно, что ветер, как геологический фактор, проявляется наиболее действенно там, где влажность, атмосферные осадки и растительный покров сведены до минимума.

ВЕТРОВАЯ ЭРОЗИЯ

Выдувание. Сухие рыхлые породы разрушаются ветром путем выдувания (дефляции). Под напором ветра выносятся мелкие частицы глинистой и алевритовой размерности – в зависимости от того, на что ветер способен. Вихрями, смерчами и восходящими струями воздуха этот материал поднимается вверх и удерживается во взвешенном состоянии турбулентным движением воздуха.

Величину выдувания определить нелегко. Как правило, одноактно выносится небольшая порция материала, причем эта порция поступает с обширной площади. Местами тем не менее выдувание можно заметить без труда. В юго-западных районах Северной Америки тонкий рыхлый материал сметается (не без помощи дождевого смыва) с обширной площади выходов горных пород почти с такой же скоростью, с какой идет их разрушение и дезинтеграция (рис. 16.2). Во время пы-



РИС. 16.2

Пещеры в скалах в районе Сьерра-Ласаль-Драй-Валли («Сухая долина Сьерра-Ласаль»), шт. Юта. На этой открытой ветрам территории ветер является мощным фактором эрозии. Рыхлый материал уносится ветром почти с той же скоростью, с какой идет разрушение. Обратите внимание на исштрихованные и покрытые бороздами коренные породы. (Фотография Джексона, Геологическая служба США.)

левой «вакханалии» 1930-х годов от выдувания жестоко пострадали почвы по периферии Великих равнин на большой территории, занятой фермами.

а. Впадины выдувания. Впадины, созданные ветровой эрозией, относятся к особенно ярким проявлениям выдувания. В центральной части южных районов шт. Орегон и на востоке Калифорнии ветром были вырыты впадины в днищах пересохших озер, сложенных авлевритом, вулканическим пеплом и диатомитом (рис. 16.3). Впадины большей частью широкие и неглубокие, но некоторые из них достигают в глубину 15 м. Их площадь колеблется от одного акра и меньше до одного квадратного километра или чуть больше. Озерные отложения озера Данби в шт. Калифорния подверглись эрозии, в результате чего на площади 25 км^2 вы-



РИС. 16.3

Выдувание (дефляция) рыхлых озерных осадков в районе Фоссил-Лейк, Озерный округ, шт. Орегон. В результате выдувания рыхлого материала образовалась обширная впадина с сохранившимися внутри ее останцами. Самые высокие из останцов, защищенные от разрушения пластами крепких пород или кустарником, имеют высоту 2–3 м. На переднем плане видны обломки крепких пород, которые из-за большого веса не могли быть унесены ветром; они остались на месте в виде остаточного гравия.

работался рельеф с перепадом высот около 5 м.

Сотни впадин такого же типа встречаются в тонкозернистых коренных породах на западе Великих равнин. Одна из впадин в районе гор Ларами в шт. Вайоминг, называемая «Большой ямой», имеет 15 км в длину, 5 км в ширину и от 30 до 50 м в глубину.

Еще более обширные и глубокие впадины выдувания описаны в пустыне Гоби в Центральной Азии, где бессточные депрессии до 50 км в длину и 30 м в глубину образовались в выветрелых гранитах. В эпоху, когда климат отличался от современного еще большей сухостью, из гранитов были выдуты ветром мелкие дезинтегрированные частицы кварца и полевого шпата.

С выдуванием связаны аналогичные депрессии в Ливийской пустыне в северо-западных районах Египта, хотя какая-то роль здесь могла принадлежать и разрывной тектонике. Семь из этих депрессий имеют глубину от 200 до 300 м. Дно впадины Каттара занимает площадь около 18 000 км^2; оно лежит в среднем на глубине 65 м, а в самых низких пунктах — на глубине до 134 м ниже уровня моря (рис. 16.4). Как бы ни был велик вклад разрывов в формирование подобного рельефа, ветровая эрозия по меньшей мере поддерживает и расширяет впадину.

б. Остаточные продукты. Частицы слишком крупные или слишком тяжелые при выдувании остаются на месте; они получили название *остаточного гравия* (рис. 16.3). Продолжительное накопление остаточного гравия, гальки и более крупных обломков в конце концов может привести к тому, что вся поверхность покроется слоем плотно лежащих несцементированных частиц, образующих так называемую *пустынную мостовую*. Такое покрытие препятствует дальнейшему выдуванию лежащего под ним более тонкого материала.

Истирание песком. Твердые породы разрушаются ветром путем абразии, т. е. за счет естественного процесса истирания



РИС. 16.4

Впадины на севере Египта, возникшие в результате ветровой эрозии. Дно гигантской впадины Каттара (длина 280 км) опускается до 134 м ниже уровня моря. Изогипсы даны в метрах. (По Боллу, 1933.)

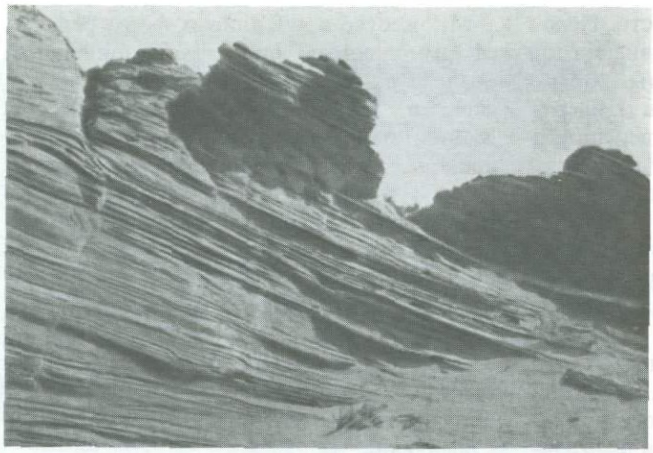


РИС. 16.5
Эродированные ветром песчаники. Слоистость в песчаниках рельефно подчеркивается благодаря обработке ветром. (Фотография Грегори, Геологическая служба США.)

песком; такой процесс сходен с применяемыми в технике методами полировки металлических отливок или чистки каменных зданий. Читателю, возможно, хорошо знакомы повреждение лобовых стекол и краски автомашин в ходе однойединственной песчаной бури, образование матовой поверхности и последующее разрушение стекол на окнах, обращенных в сторону песчаного берега, или иссеченные ветром египетские пирамиды. Такие же процессы истирания песком, действующие с перерывами, но в течение длительного времени, вытачивают параллельные *желобки* или узкие длинные *ниши* в основании песчаных холмов или вдоль наклонно залегающих пластов (рис. 16.5), снабжая при этом ветер дополнительными порциями песка.

У некоторых пород, подвергшихся обработке песком или алевритом, образуется *полированная* или чаще встречаю-

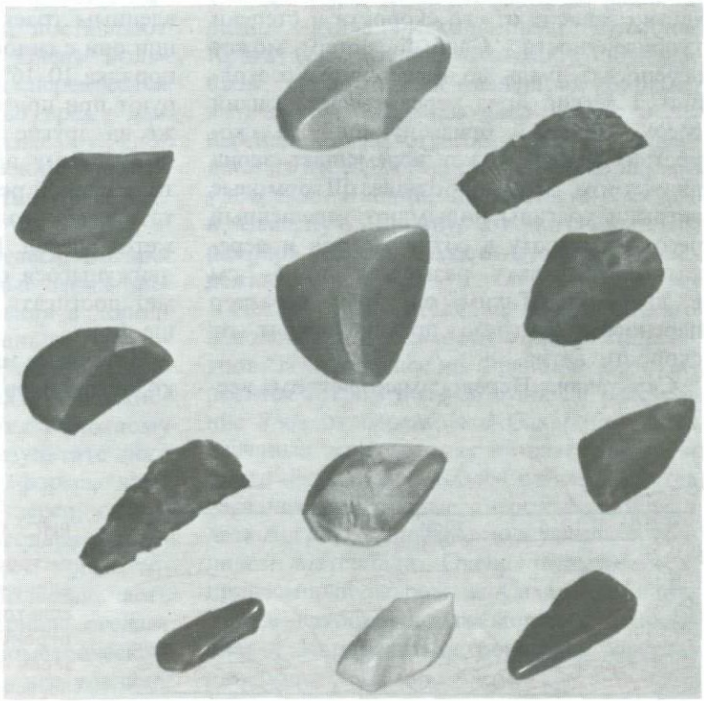


РИС. 16.6
Отполированная и ограненная ветром галька или эоловые многогранники из впадины Биг-Хорн, шт. Вайоминг.

щаяся слегка матовая поверхность. Некоторые тонкозернистые массивные породы, как, например, кварциты, могут быть отполированы до блеска. Поверхность песчаных зерен, подвергшихся абразии, становится *матовой* в результате ее обтачивания и образования на ней выемок и мельчайших трещин.

Галька при естественном истирании ее песком также полируется (в случае однородного материала) или покрывается бугорками и выемками (если материал гальки неоднороден). При достаточно длительном воздействии галька шлифуется по одной или нескольким плоским граням с образованием *эоловых многогранников* или *трехгранников (драйкантеров)* (рис. 16.6).

Множество причудливых форм рельефа сформировалось при комбинированном воздействии выветривания, истирания песком и других эрозионных процессов. К ним относятся открытые неглубокие пещеры, столообразные скалы, эоловые столбы и другие скульптурные формы. В открытых областях на обнаженной поверхности горных пород могут возникать системы фестончатых, подрезанных снизу гребней, называемых *ярдангами*, и разделяющих их удлиненных выемок шириной в несколько метров; однако в количественном отношении эффект ветровой абразии относительно мал по сравнению с выдуванием.

ПЕРЕНОС ВЕТРОМ

Пылевые частицы обычно переносятся во *взвешенном состоянии*, тогда как песчаные зерна перемещаются по поверхности земли прыжками (*сальтация*) или путем перетекания (соскальзывания).

Способность ветра к транспортировке частиц зависит от его скорости и степени турбулентности. Слабый ветер может *переносить пыль во взвешенном состоянии*, а легкий бриз перекатывает тонкий песок. Сильный бриз, дующий со скоростью 20 м/с, может перемещать зерна диаметром 1 мм и больше. Штормовые ветры и ураганы подымают взвешенный песок на высоту в сотни метров и *перекатывают гальку размером до 5–7 см* в диаметре. Таким образом, характер переносимого груза прямо зависит от скорости ветра.

Сальтация. Переносимые ветром песчаные зерна перемещаются по поверхности земли, *подпрыгивая под крутым* углом на высоту от нескольких сантиметров до нескольких метров; ветер, скорость которого над поверхностью возрастает, заставляет их двигаться по искривленным траекториям, так что при падении они с силой приземляются под углом *порядка 10–16°. Они не только рикошетируют* при приземлении, но налетают также на другие зерна, что приводит к непрерывному продолжению сальтации по типу цепной реакции (рис. 16.7). В результате песок толчками, беспорядочно движется вперед. При сильном ветре высота *движущегося облака песчаных зерен* может достигать 2 м, но обычно она меньше 1 м.

Источники материала. Имеется несколько источников переносимого ветром ма-

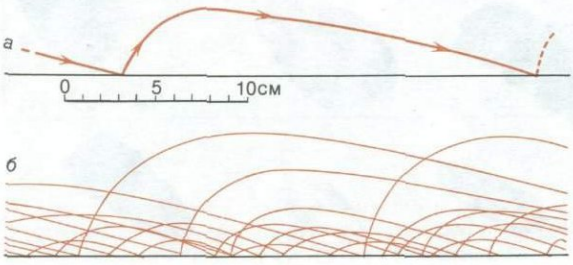


РИС. 16.7

а – траектория перемещения единичного песчаного зерна при сальтации; *б* – траектории перемещения множества песчаных зерен при сальтации. (По Бэгнолду: *Bagnold*, 1941.)

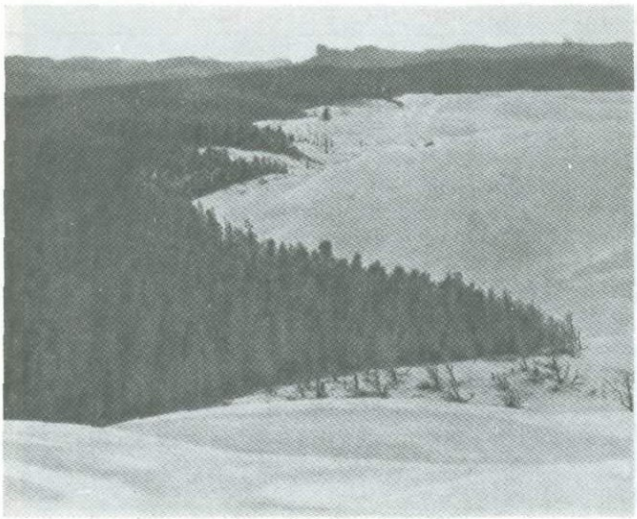


РИС. 16.8
Песчаные дюны на побережье шт. Орегон, вторгающиеся в лес. (Фотография Службы национальных парков.)

териала. Основным из них служат, по-видимому, продукты разрушения горных пород, образующиеся при их дезинтеграции и абразии. Свой вклад вносят также речные осадки, ледниковые морены и песок побережий (рис. 16.8). Непосредственным источником часто являются осадки со дна высохших озер. Огромное количество легкого, угловатой формы обломочного материала, весьма подходящего для переноса ветром, поставляют вулканические извержения. Очень большое количество материала переносится во взвешенном состоянии во время пылевых бурь, как это доказывают упоминавшиеся выше измерения, проведенные в районе города Линкольн, шт. Небраска.

Изменения в процессе переноса. Во время переноса ветром песчаные зерна претерпевают заметные изменения в дополнение к уже упомянутому раньше образованию у них матовой поверхности. Перекатываясь или подпрыгивая у поверхности земли, они подвергаются взаимному истиранию (*корразии*), в результате чего их размер уменьшается и форма, даже в случае очень маленьких зерен, становится более округлой. Благодаря повторяющемуся *отсеиванию* песок, кроме того, сортируется, так что бóльшая часть перенесенного ветром материала оседает в виде однородной в гранулометрическом отношении массы. Пыль из нее удаляется, а крупные частицы остаются позади. В противоположность этому размер и угловая форма пылевых частиц, переносимых во взвешенном состоянии, когда столкновения неэффективны, сохраняются неизмененными.

Дальность переноса. Расстояния, на которые перемещаются переносимые ветром частицы, изменяются в очень широких пределах. Хорошо известен дальний разнос вулканической пыли вулканов Кракатау, Везувий, Катмай. Обычная пыль, поднимаемая пылевыми бурями, в течение нескольких дней может быть перенесена из Австралии в Новую Зеландию, из пустыни Гоби в Азии к кораблям у берегов Японии, из пустыни Сахары в Северную Европу, от юго-западных районов США к Атлантическому побережью.

Песок, движущийся по земле, обычно преодолевает только несколько километров. Тем не менее во Франции песок заносится ветром в глубь суши на расстояние 8 км от берега, а в Сахаре мощные песчаные осадки лежат на известняковом плато на удалении 160 км от выходов тех песчаников, которые, вероятно, будучи дезинтегрированными, послужили источником материала. Очень тонкий песок, принесенный ветром из Сахары, обнаружен в глубоководных морских отложениях у Карибских островов на расстоянии более 4500 км.

ОСАЖДЕНИЕ МАТЕРИАЛА, ПЕРЕНОСИМОГО ВЕТРОМ

Причины. Основными причинами осаждения материала, который переносится ветром, являются: 1) ослабление или прекращение ветра, 2) выпадение дождя или снега, 3) наличие препятствий.

При ослаблении ветра осаждается как пыль, так и песок. Частицы оседают под действием силы тяжести, так как при уменьшении турбулентности и скорости ветра теряется их кинетическая энергия.

Выпадение атмосферных осадков очищает воздух, промывая его. Иногда в воздухе находится достаточно увлажненной пыли для загрязнения дождя и снега.

Препятствия играют роль в основном при переносе песка. Они могут быть любого рода – единичные камни, скальные выступы, скалистые холмы, гряды, изгороди, строения, кусты, отдельно стоящее дерево или лес. Песок скапливается и на наветренной, и на подветренной сторонах многих препятствий. Скопление песка, однажды возникнув, тут же само становится препятствием и с этого момента имеет тенденцию расти, стимулируя осаждение на нем дополнительного материала. Местами песок может выдуваться за пределы досягаемости ветра – в пруд или озеро – или переноситься через обрыв.

ФОРМЫ НАКОПЛЕНИЯ ЭОЛОВЫХ ОСАДКОВ

В связи с тем, что пыль переносится во взвешенном состоянии, а песок по большей части передвигается по поверхности земли, при осаждении происходит их сепарация с образованием обширных по площади покровов осевшей пыли и локальных скоплений песка. Те и другие вместе представляют собой эоловые осадки (название происходит от имени бога ветров Эола). В том случае, если отложенная ветром пыль обладает значительной мощностью, ее называют *лёссом*. Естественные скопления песка называются *дюнами*.

Лёсс. Лёссовые отложения широко распространены в центральной части бассейна реки Миссисипи и в области Великих равнин. Значительные их скопления встречаются также в горах Пелоус-Хиллс на востоке шт. Вашингтон, по реке Огайо, на севере Центральной Европы, в Восточной Европе, в Судане, Аргентине и Китае. Области распространения тонкозернистых рыхлых и плодородных лёссовых осадков совпадают со многими богатейшими по производству пшеницы территориями.

а. Основные свойства лёсса. Мощность лёссов в долине Миссисипи колеблется от 1 м и менее до нескольких десятков метров. Они состоят главным образом из частиц алевритовой размерности, очень разнообразных по своему минеральному составу. Частицы представлены кварцем, полевым шпатом, кальцитом, роговой обманкой и слюдой и находятся в основном в свежем, мало выветрелом состоянии. Лёссы залегают на ледниковых наносах или, при отсутствии последних, на более древних породах. Несмотря на то что цементация в лёссах обычно отсутствует, угловатая форма свободных зерен обеспечивает настолько прочное сцепление, что вертикальные стенки выработок, пройденных в лёссе, не обрушаются годами. Полости, оставленные глубоко проникающими корнями трав и обычно заполненные карбонатом кальция, придают лёссу неясную столбчатую отдельность.

б. Происхождение лёсса. Лёсс образуется в условиях сухого холодного или сухого теплого климата из исходного материала ледникового или пустынного происхождения. Материал для лёссов ледникового происхождения, таких, как лёссы на территории шт. Айова, вероятно, поступал с высыхающих пойм рек, питающихся талыми ледниковыми водами, или сдувался прямо с самих плейстоценовых ледниковых щитов. Самые мощные лёссовые осадки находятся на подветренной стороне на возвышенностях, прилегаю-



РИС. 16.9
Береговой песок, надуваемый ветром в глубь суши на побережье Калифорнии южнее города Пойнт-Сэл. Прибрежные пляжи – обычный источник переносимого ветром песка. (Фотография компании «Спенс эйр фотос».)

щих к долинам рек Миссисипи и Миссури. К востоку они утоняются. По-видимому, главным поставщиком материала были поймы ледниковых рек. Пыль, вероятно, могла легко захватываться и удерживаться на месте растительностью. В аналогичной обстановке лёссы образуются в настоящее время по долинам большинства разветвленных ледниковых рек Аляски.

За исключением лёссов, развитых по реке Миссури, мощность лёссов Небраски и Канзаса возрастает по направлению к местности Санд-Хиллс на северо-западе шт. Небраска. Очевидно, что их накопление частью связано с древними пылевыми бурями пустынного типа или типа тех бурь, которые происходят в неледниковых засушливых районах на западе США.

Лёссы северо-западных районов Китая, имеющие, как уже было сказано, мощность сотни метров, образовались, вероятно, за счет материала пустынь Центральной Азии в условиях теплого сухого климата. Вскрытые при эрозионном врезе более поздних рек, они стали ареной катастрофических оползней, вызванных мощным землетрясением в декабре 1920 г. Под рухнувшими грудами лёсса и глины нашли свою гибель около 100 000 человек. Желтая река в Китае (Хуанхэ) получила свое название из-за окраски воды, обусловленной тонкими лёссовыми частицами, которые она несет во взвешенном виде.

Дюны – это холмы или гребни навеянного ветром песка, находящиеся, как правило, в движении. Некоторые скопления песка неподвижны из-за их генетической связи с какими-нибудь закрепленными объектами или благодаря тому, что они удерживаются на месте растениями.

Песок для дюн поступает с песчаных пляжей (рис. 16.9) или других образований морских побережий, из песчаных осадков речных пойм и террас, из песчаных наносов равнин ледниковых областей и аллювиальных конусов выноса (рис. 16.10), со дна высохших озер, за счет дезинтеграции первоначально песчанистых пород и последующего отсеивания материала.

Самым распространенным минералом дюнных песков является кварц, но обычен и смешанный минеральный состав. Дюны, занимающие площадь около 650 км^2 в районе Уайт-Сандз («Белые пески») в шт. Нью-Мексико, состоят из гипса (рис. 16.11); дюны, сложенные кальцитом (источником которого служат коралловые рифы), встречаются на Бермудских островах.

а. Миграция дюн является результатом переноса песка с наветренной стороны к гребню дюны, с которого песок скаты-

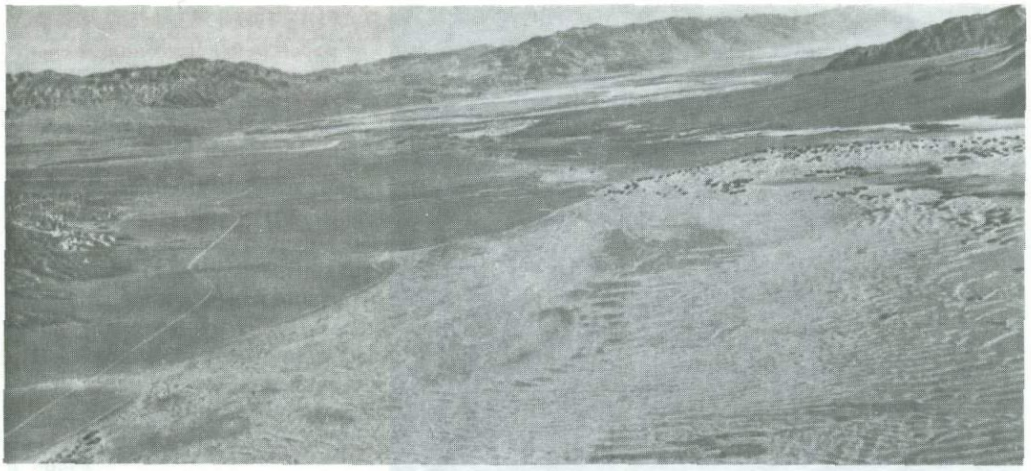


РИС. 16.10

Копьевидные песчаные дюны (на переднем плане) и аллювиальный конус выноса в окрестностях Стовпайп-Уэллс в Долине Смерти, шт. Калифорния. (Фотография компании «Спенс эйр фотос».)

вается или соскальзывает вниз по поверхности скатывания в ветровую тень на подветренной стороне дюны (рис. 16.12–16.14). Угол наклона наветренной стороны обычно меньше 10°, подветренной – от 25 до 34°. Многие дюны смещаются в направлении ветра лишь на несколько метров в год. Дюны побережья Бискайского залива вблизи Байонны в юго-западной Франции перемещаются в сторону суши с постоянной скоростью от 1 до 2 м в год на протяжении десятилетий. На юго-восточном берегу Балтийского моря дюна переместилась на 13 км

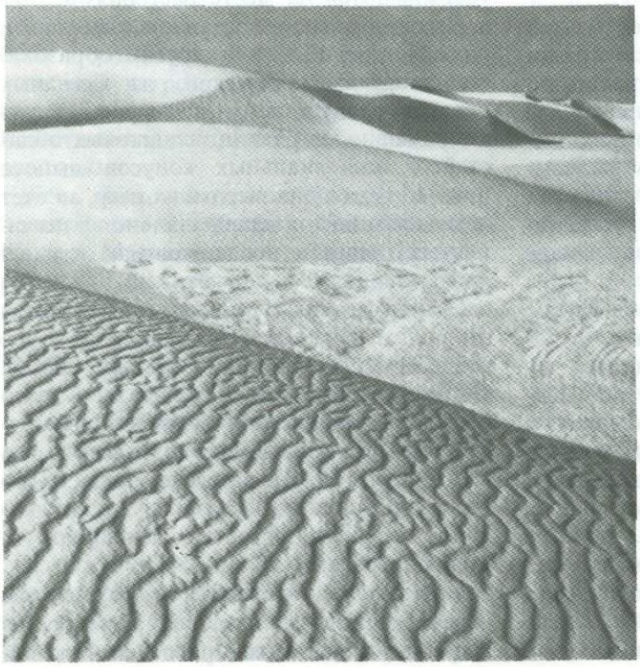


РИС. 16.11

Дюны, состоящие из гипсового песка, национальный заповедник Уайт-Сандз («Белые пески») в шт. Нью-Мексико. Хотя бóльшая часть дюн обычно сложена кварцевым песком, встречаются и исключения вроде этого. (Фотография Туристического бюро шт. Нью-Мексико.)

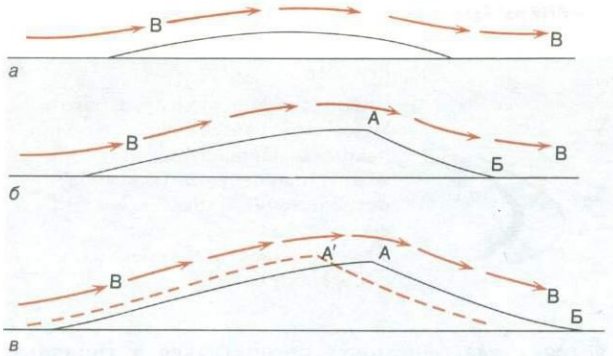
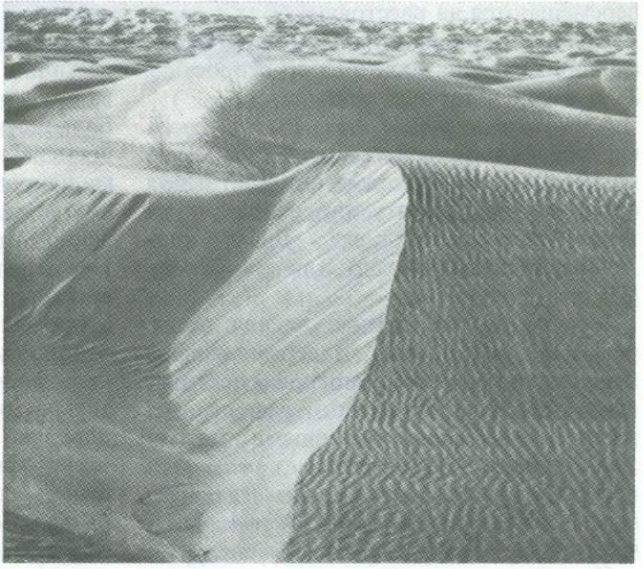


РИС. 16.12

а – продольный разрез дюны на ранней стадии формирования. Дюна имеет обтекаемую по отношению к ветру (В) форму, но не приобрела еще характерных очертаний; *б* – продольный разрез песчаной дюны с отчетливо выраженным гребнем (А) и поверхностью скатывания (от А к Б) в ветровой тени; *в* – продольный разрез песчаной дюны, мигрирующей под влиянием ветра (В) из положения А′ в положение А в результате переноса песка с наветренной на подветренную сторону.

РИС. 16.13

Песчаные дюны на восточной стороне долины Империал-Валли, шт. Калифорния. В основном это барханы с хорошо выраженным гребнем. Обратите внимание на покрытый рябью, пологий наветренный склон и более крутую поверхность скатывания на подветренной стороне. (Фотография компании «Фрэшерз».)



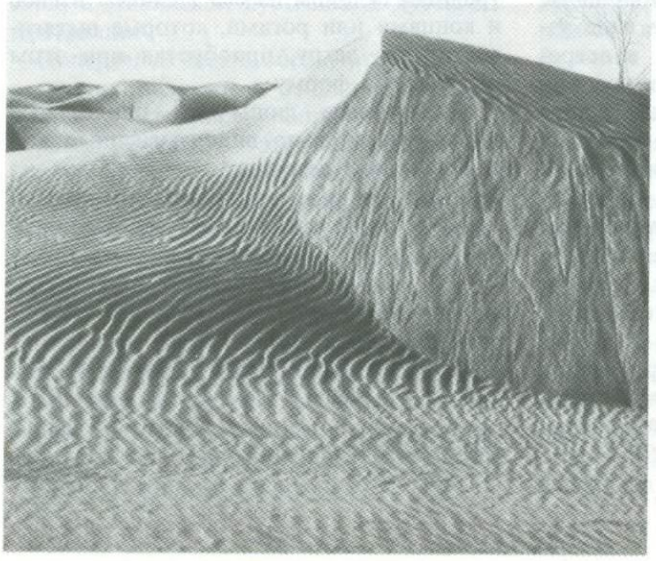


РИС. 16.14

Песчаные дюны с хорошо выраженными знаками ряби в долине Империал-Валли, шт. Калифорния. Для относительно крутого движущегося фронта дюн характерно соскальзывание песка по поверхности скатывания (на снимке справа). (Фотография компании «Фрэшерз».)



РИС. 16.15
Схематическая зарисовка барханов Нубийской (Аравийской) пустыни; показано направление ветра (В, а) и эшелонированное (кулисное) расположение барханов.
а-б – наветренный склон;
б-в – поверхность скатывания;
г – рога бархана.

за 70 лет. В областях с сильными ветрами отдельные небольшие дюны, лежащие на коренных породах, проделывают за год путь в сотни метров. Изолированные дюны в Азии в особенно ветреные дни перемещаются на расстояние 20 м в день. В долине Империал-Валли в шт. Калифорния миграция дюн шла со скоростью 27 м в год в течение семи лет.

б. Высота и форма дюн. Высота дюн, как правило, колеблется от 1 м и менее до 10 м и более. Местами они достигают сотен метров в высоту, как, например, на территории заповедника Грейт-Сэнд-Дьюнс в шт. Колорадо или в пустыне Сахаре.

В зависимости от поступления песка, рельефа местности, задерживающего влияния растительного покрова, постоянства направления ветров развиваются разные типы дюн. Основными типами дюн являются *подветренные дюны* или песчаные наносы, *другие разновидности продольных дюн, барханы, копьевидные, поперечные* и *сложные дюны.*

Подветренные дюны – это продольные дюны, которые формируются в виде узких длинных песчаных гребней в ветровой тени позади скальных выступов или за островками кустарника, а также в виде наклонных насыпей песка за уступами. Все подветренные дюны постоянно находятся на одном и том же месте, но в случае добавления большего количества песка они могут превратиться в типичные мигрирующие дюны, отодвигающиеся от своих хвостовых частей.

Некоторые продольные дюны вытягиваются в направлении основных ветров в том случае, когда сильные ветры дуют на местности со скудными скоплениями песка или когда им приходится преодолевать удерживающее влияние травы и небольшого кустарника. Ветры, дующие временами под острым углом к основному направлению, способствуют сгруживанию песка в гряды. Такие дюны постепенно переходят в дюны иной формы. Некоторые из них выдуваются ветром вверх по склонам долин.

Барханы (рис. 16.15) формируются на открытых площадях, не ограниченных какими-либо орографическими или растительными барьерами, где выдерживается довольно постоянное направление ветра, а снабжение песком лимитировано, особенно при наличии основания из коренных пород. Типичные барханы имеют форму полумесяца с пологим наветренным склоном на его внешнем изгибе и концами или рогами, которые вытягиваются по ветру, приобретая при этом обтекаемую форму.

Копьевидные дюны – это продольные дюны, значительно видоизмененные под воздействием сезонных ветров. Одна из простых их разновидностей по очертаниям в плане напоминает арабскую са-

РИС. 16.16
Схематическая зарисовка копьевидных дюн Ливийской пустыни; показано направление господствующего ветра (сплошная стрелка) и сильных сезонных ветров (пунктирная стрелка); у небольших дюн проявляется тенденция объединяться в вытянутые гребни.





РИС. 16.17
Песчаные дюны вокруг ирригационного канала Олл-Американ, округ Импириал, шт. Калифорния. Наблюдаются все формы от простых барханов (слева на переднем плане) до тесно скученных масс песка. (Фотография компании «Спенс эйр фотос».)

блю (рис. 16.16). Копьевидные дюны встречаются вместе с барханами, причем имеются сведения о превращении барханов в копьевидные дюны и наоборот. Другая разновидность представляет собой, в сущности, подветренную дюну с ножевидным гребнем между закругленной подветренной стороной и более крутой поверхностью скатывания на наветренной стороне. Третья разновидность – *это огромные гряды песка в Сахаре* с остроконечными волнистыми гребнями. При отклонении ветра от своего основного направления часто меняется форма копьевидных дюн, в особенности их гребней. Копьевидные дюны наиболее широко развиты в Сахаре, Нубийской (Аравийской) и Ливийской пустынях, в пустынях Австралии.

Поперечные дюны образуются там, где песок поставляется в изобилии и сохраняется постоянное направление суховейных ветров, как это наблюдается на многих морских побережьях. Большие объемы песка в таких условиях группируются в гряды или серии гряд, расположенные перпендикулярно направлению ветра. Их гребни обычно извилисты и неровны, что частично объясняется неравномерным накоплением песка, частично тем, что между выступающими верхушками гребней ветром выдуваются ложбины. Большие скопления поперечных дюн, по-видимому, продвигаются вперед многочисленными рядами.

Сложные дюны, не имеющие четко очерченной формы, возникают в местностях с изменчивыми ветрами, там, где много песка и возможно влияние растительности. Барханы, копьевидные дюны и поперечные дюны местами теснят друг друга, накладываясь друг на друга и теряя свои характерные индивидуальные черты в сумбурной путанице разных форм (рис. 16.17).

В Саудовской Аравии с ее огромными пространствами, покрытыми мощными песками, дюны занимают почти треть территории, или 2 500 000 км^2. Здесь преобладают северо-восточные пассаты, но отмечаются также сезонные муссоны и другие типы ветров. Некоторые из них достигают ураганной скорости. Образующимся в результате дюнам присуще большое разнообразие форм, с трудом поддающееся классификации.

в. Другие особенности дюн. Здесь мы рассмотрим *котловины выдувания, эоловую текстуру* и *знаки ряби.* Котловина выдувания – это вырытая ветром выемка в песчаной дюне. Котловины выдувания обычно имеют форму ложки или лошадиного следа, открытых против ветра. Выдуваемый песок скапливается вокруг края выемки. Исходя из этой вновь возникшей формы, такие видоизмененные дюны иногда описываются под названием параболических. Образование котловин выдувания в неподвижных дюнах может начаться с нарушения дернового

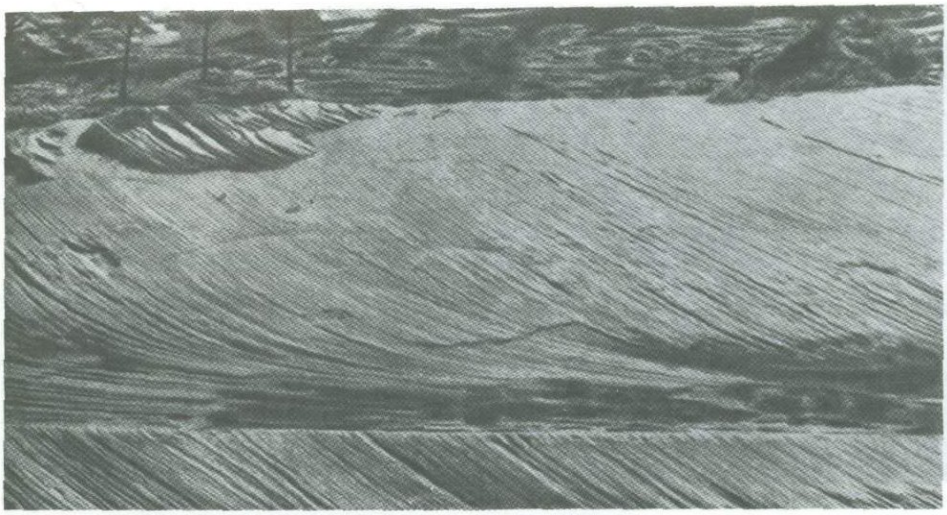


РИС. 16.18
Песчаники с эоловой косой слоистостью. (Фотография Ли, Геологическая служба США.)

покрытия или удаления растительного покрова в связи с пожаром или уменьшением количества атмосферных осадков.

Внутренняя текстура дюн характеризуется косой слоистостью. Косая слоистость образуется при меняющемся наклоне поверхности, на которую ложатся осадки. Косослоистая толща состоит из различно ориентированных тонких слойков крупного и тонкого песка в клиновидных или изогнутых пластах, отражающих изменения в направлении и интенсивности ветра. Если миграция дюн идет все время в одном направлении, бóльшая часть слойков располагается согласно с продвигающейся вперед поверхностью скатывания и наклонена в одну сторону. Напротив, создание и последующее заполнение котловин выдувания, рост холмов песка вверх или изменение ориентировки поверхностей скатывания в соответствии с изменением направления ветра приводят к сложному несимметричному расположению вогнутых и выпуклых пластов. Эоловая косая слоистость любого типа является настолько характерной, что по ней уверенно определяется эоловое (дюнное) происхождение определенной категории песчаников (рис. 16.18).

Знаки ряби – формы, общие для дюн (рис. 16.11, 16.13, 16.14) и для других песчаных поверхностей, ассоциирующихся с дюнами. Их размер и расстояние между ними контролируются размером зерен и скоростью ветра. Они образуются на поверхности взаимодействия между ветром и песком под влиянием сортирующего механизма поверхностного течения песка. Наиболее крупные зерна скапливаются на гребнях, наиболее тонкие – в ложбинах между ними. Эоловые знаки ряби несимметричны и похожи на крошечные дюны. Под влиянием изменения интенсивности ветра они видоизменяются, непрерывно приспосабливая форму своих гребней. Сильный ветер может уничтожить их полностью.

КОНТРОЛЬ НАД ДЮНАМИ

Для защиты разнообразных сооружений иногда требуется контроль за разносимым ветром песком. Песок вторгается на шоссейные и железные дороги, аэродромы, пашни, проникает в здания. Используется несколько методов контроля.

Полотно шоссейных дорог может быть построено выше уровня окружающей земной поверхности, вследствие чего песок будет быстрее сдуваться с дороги, чем накапливаться на ней. Перекапывая песок бульдозерами, можно на время приостановить его движение. Широко практикуется посадка растущих на песчаной почве трав, кустарников и деревьев. Какое-то время могут помогать сооружения из проволоки и решетки, подобные снегозащитным изгородям. Покрытие песчаной почвы асфальтом или жидкой нефтью и засыпание песка слоем щебня, шлака, раздробленных камней или другим грубым материалом также приостанавливают дальнейшее продвижение песка. Конкретные меры борьбы и материал для их реализации обычно определяются в зависимости от их рентабельности.

Изредка, с целью сохранить особенности естественного ландшафта, развитие дюн поощряется. Так, в 1930-х годах поддерживалась аккумуляция песка для защиты и стабилизации обстановки в районе Аутер-Бэнкс в шт. Северная Каролина. Задача заключалась в создании барьера из дюн, который бы сдерживал активность волн и предотвращал размыв и образование оврагов; однако это предприятие оказалось не столько успешным, сколько убыточным.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ

Ветер разрушает (эродирует), переносит и откладывает материал. Эрозия происходит путем выдувания (дефляции) и истирания (абразии), в результате чего образуются котловины выдувания, остаточный гравий, полированные поверхности, столообразные скалы, неглубокие гроты, трехгранники (*драйкантеры*), песчаные зерна с матовой (шероховатой) поверхностью, ярданги.

Ветер переносит во взвешенном состоянии пыль (чему способствует турбулентность воздуха); песок передвигается путем сальтации и поверхностного перетекания. Эти тонкозернистые частицы попадают в сферу действия ветра с поверхностей выдувания (дефляционных поверхностей), речных пойм, песчаных баров и пляжей, песчаных наносов на равнинах ледниковых областей, дна высохших озер, а также в результате разрушения песчаников и вулканических извержений. Ветер переносит взвешенную пыль на тысячи километров, песок же редко перемещается вдоль земной поверхности дальше чем на несколько километров. Удивительно большой груз материала переносится пылевыми бурями.

Ветер откладывает свой груз при ослаблении, т. е. при уменьшении скорости, при выпадении дождя или снега, при наличии препятствий. Ветром переносится и откладывается материал для широко распространенных в холодном и теплом сухом климате толщ лёсса вроде тех, которые развиты в долине Миссисипи, районе Пелоус-Хиллс и в Китае. Ветер создает песчаные дюны разного вида: подветренные дюны, продольные дюны, барханы, копьевидные, поперечные и сложные дюны; та или иная разновидность образуется в зависимости от количества песка, местоположения района, типа растительности и характера ветров. Выемки выдувания придают некоторым дюнам параболическую форму. Дюны обычно медленно перемещаются в результате переноса песка с наветренной стороны на поверхность скатывания, расположенную на подветренной стороне.

На поверхности песчаных дюн, как правило, имеются многочисленные знаки ряби, а сами дюны состоят из клиновидных или искривленных косослоистых пачек.

Песчаные дюны, вторгающиеся в пределы сооружений, можно сдерживать с помощью произрастающих на песке растений или создавая искусственные преграды и разного типа покрытия.

ВОПРОСЫ

1. При каких условиях ветер становится *важным геологическим фактором*?
2. Каким образом климат и местонахождение района способствуют превращению ветра в важный геологический фактор?
3. Определите термин «выдувание» («дефляция»).
4. *Материал разного размера различным* образом передвигается под влиянием ветра. Объясните почему.
5. Сравните способы транспортировки материала ветром и реками.
6. Перечислите разновидности песчаных дюн. Какие факторы влияют на их образование?
7. Как дюны передвигаются? Какие меры могут применяться для контроля над их миграцией?
8. *Кратко опишите типы осадков*, образующихся с помощью ветра.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Bagnold R. A., 1965, The Physics of Blown Sand and Desert Dunes, Methuen and Co., Ltd., London.

Blackwelder E., 1931, The lowering of playas by deflation, Amer. Jour. Sci., 5th Series, vol. 21, pp. 140–144.

Blackwelder E., 1934, Yardangs, Geol. Soc. Amer. Bull., vol. 45, pp. 159–166.

Bryan K., 1931, Wind-worn Stones or Ventifacts–A Discussion and Bibliography, pp. 29–50, National Research Council Reprint and Circular Series 98, Report of the Committee on Sedimentation, Washington, D.C.

Frye J. C., 1950, The origin of Kansas Great Plains depressions, pp. 1–20, Kansas Geol. Surv. Bull. 86, part 1.

Long J. T., Sharp R. P., 1964, Barchan-dune movement in Imperial Valley, California, Geol. Soc. Amer. Bull., vol. 75, pp. 149–156.

Lugn A. L., 1962, The Origin and Sources of Loess, Univ. of Nebraska Studies, New Series No. 26, Lincoln, Neb.

Sears P. B., 1947, Deserts on the March, 2d ed., Univ. of Oklahoma Press, Norman, Okla.

Sharp R. P., 1949, Pleistocene ventifacts east of the Bighorn Mountains, Wyoming, Jour. Geology, vol. 57, pp. 175–195.

Thorp J., Smith H. T. U. et al., 1952, Pleistocene Eolian Deposits of the United States, Alaska, and Parts of Canada (map scale 1 : 2,500,000), Geological Society of America, Boulder, Colo.



17 ДЕФОРМАЦИЯ И СТРУКТУРЫ ГОРНЫХ ПОРОД

Обычно мы считаем породы земной коры бесконечно прочными и устойчивыми, но это далеко не так. В действительности земная кора находится в непрестанном движении, масштаб которого может меняться от 1 мм до сотен километров, и это движение, не прекращающееся в течение длительных периодов геологического времени, приводит к огромным изменениям. В большинстве случаев движения земной коры развиваются очень медленно, но иногда они бывают и быстрыми. В этой главе мы рассмотрим, как происходит деформация пород в недрах Земли под действием глубинных движений, и опишем многочисленные и разнообразные проявления этой деформации. Изменения горных пород, связанные с поверхностным выветриванием, в этой главе не рассматриваются.

ДЕФОРМАЦИЯ ГОРНЫХ ПОРОД

Основные понятия механики горных пород. Благодаря движению коровых плит и никогда не прекращающемуся воздействию силы тяжести горные породы непрерывно находятся в поле сил переменной величины. Эти силы создают в породах напряжения, которые ведут к упругим и неупругим деформациям. *Напряжение* – это измеримая внешняя сила, действующая на единицу площади, а *деформация* – из-

менение формы и размеров под действием напряжения. Возникновению деформации противостоят жесткость и прочность горных пород. *Жесткость* твердого вещества – это начальное сопротивление изменению формы, а *прочность* – способность материала в течение длительного времени сопротивляться деформирующим силам.

Величина деформации определяется прочностью материала на сжатие и растяжение. *Прочность на сжатие* – это сила на единицу площади, необходимая для того, чтобы деформировать или разрушить тело. *Прочность на растяжение* – сила, необходимая для того, чтобы разорвать тело. Прочность гранитов на сжатие составляет 3500–4500 кг/см^2, но их прочность на разрыв, как и у других твердых пород, низкая: она составляет всего лишь 100–180 кг/см^2.

Основное различие между жидкостью и твердым телом состоит в том, что жидкость не обладает прочностью и поэтому всегда поддается малейшей нагрузке или напряжению. Магмы и лавы – это породы в жидком состоянии. Вязкая жидкость, такая, как деготь, не имеет прочности; любое тяжелое тело, помещенное на ее поверхность, в конце концов погружается в нее, как это часто можно видеть на асфальтовых дорожных покрытиях. Твердое тело в отличие от жидкости не поддается нагрузке или давлению, пока они не превышают его предел прочности на сжатие, и только после этого в нем возникают трещины или проявляется ползучесть.

Будет ли развиваться в породе при данном напряжении хрупкое дробление или ползучесть, зависит от температуры, давления и других факторов. Все твердые вещества при высокой температуре менее прочны, чем при низкой. Высокая температура, существующая в недрах Земли на глубинах 5–10 км, приводит к тому, что под действием дифференцированных напряжений породы в подавляющем большинстве случаев могут деформироваться там путем пластического течения точно так же, как горячая сталь легко прокатывается в листы или растягивается в проволоку. Кроме того, пластичность пород заметно возрастает при повышении всестороннего давления; соответственно и в этом случае деформация может происходить без сколов. Цилиндрический кусок мрамора, помещенный в прочный стальной кожух, под нагрузкой может стать выпуклым, как деревянный бочонок, но не разрушиться. Воздействие температуры и давления на ползучесть пород, залегающих на значительной глубине, играет ведущую роль при изменении прочности земной коры.

Деформация любого материала может быть упругой, пластической или хрупкой. *Упругость*, или модуль упругости, – это мера сопротивления вещества непрерывной деформации. В понятиях механики это отношение величины напряжения, возникающего как сопротивление деформации, к величине самой деформации. Главные проявления упругости можно показать, нажимая пальцем на детский воздушный шарик. Если палец убрать, то поверхность шарика мгновенно примет прежнюю форму. То же происходит и со стальным шариком при кратковременном местном давлении, приложенном к его поверхности. Даже при высокой жесткости стального шарика он все-таки немного поддается сжатию, не разрушаясь, если давление не слишком велико. Когда это умеренное давление снимается, шарик сразу же принимает свою первоначальную сферическую форму. Следовательно, брошенный на твердый пол стальной шарик должен упруго подпрыгнуть. Галька горных пород также обладает упругостью. Упругость пород имеет большое значение для передачи сейсмических волн внутри Земли.

При сильном и резком повышении давления стальной шарик (или горная порода) быстро достигает предела упругости и материал разрушается путем *хрупкого дробления*. Однако под действием большой, постепенно возрастающей, непрерывной нагрузки связи между атомами в стали или в горной породе нарушаются, атомы смещаются относительно друг друга и вещество становится текучим, хотя скорость течения бывает очень невелика. Возникающие при этом внутренние смещения необратимы: например, мед-

ленно деформируемый стальной шарик не вернется к своей первоначальной форме. Это уже не упругая, а *пластическая деформация*. Обычно для нее требуется длительное время. Поскольку породы обладают и упругостью, и пластичностью, в них проявляется и дробление, и ползучесть. Хотя горные породы на поверхности земли хрупкие, на глубине они становятся пластичными под влиянием медленного возрастания напряжений в условиях высокой температуры, большого всестороннего давления и, возможно, в присутствии воды. Реакция на эти условия зависит также от типа породы.

Движения земной коры. В течение всего геологического прошлого Земли и даже в историческое время земная кора непрерывно изгибалась, наклонялась, поднималась и опускалась. В результате этого изменялось относительное положение горных пород. Все такие движения объединяются понятием *тектонические движения*, или *диастрофизм*. Они могут иметь любое направление: вверх, вниз, быть наклонными или горизонтальными. Они могут протекать чрезвычайно медленно и постепенно, но могут быть внезапными и резкими.

Проявление подвижности земной коры. Эффект поднятия суши относительно моря можно наблюдать на многих участках берегов. Поднятые морские террасы и связанные с ними береговые уступы, гроты и столбовидные скалы располагаются теперь в разных районах мира далеко на суше, на расстоянии многих километров от современных берегов. Некоторые из них возникли вследствие понижения уровня моря, но многие другие оказались там в результате поднятия. Это особенно хорошо видно на западном побережье США.

Почти плоские береговые равнины побережья Атлантического океана и Мексиканского залива, простирающиеся от Нью-Джерси до Техаса, также указывают на то, что там либо произошло поднятие суши, либо опустилось море. Если бы это было связано только с отступанием моря, то его прежняя береговая линия должна была бы везде находиться на одних и тех же или на закономерно меняющихся уровнях позади современной береговой линии, но такого единообразия не существует. Кроме того, уровень террас упомянутых районов не согласуется с уровнем террас на других континентах. Древние береговые линии как здесь, так и в других местах располагаются на одних участках выше, чем на других. Отсюда следует, что разные участки берегов испытали неоднородное поднятие, были изогнуты или наклонены.

Береговые линии неправильных очертаний, такие, как изрезанные берега Новой Англии с ее многочисленными островами, мелями и затопленными долинами, доказывают, что происходили и поднятия, и опускания. Подводные каньоны протягиваются через атлантический шельф более чем на 150 км. Ясно, что когда-то шельф располагался выше, чем сейчас. Однако лоскутные морские отложения на побережье шт. Мэн содержат раковины нескольких видов, обитающих в настоящее время в море. Очевидно, последним по времени движением земной коры в этом районе было поднятие, но оно было значительно меньшим, чем предшествовавшее опускание.

Прямые свидетельства изменения высоты местности можно видеть и далеко на материке, где породы, содержащие морские окаменелости, обнажаются значительно выше уровня моря (рис. 17.1). В Гималаях морские отложения подняты более чем до 8500 м над уровнем моря. Такие же осадочные морские отложения с ископаемыми остатками широко распространены в центральных районах США. Они же слагают высокие плато, обрамляющие Большой каньон реки Колорадо на высотах более 2000 м. Смятые в складки породы такого же происхождения имеются в Аппалачах, в горах Уошито и в Скалистых горах. Эти породы отлагались в море в виде, по существу, горизонтальных слоев. Там, где эти породы в настоящее время залегают на больших высотах, наклонены или смяты в складки, они испытали как общее поднятие, так и деформацию.

Классическим примером движений, происходивших в историческое время, служит опускание и поднятие древнерим-

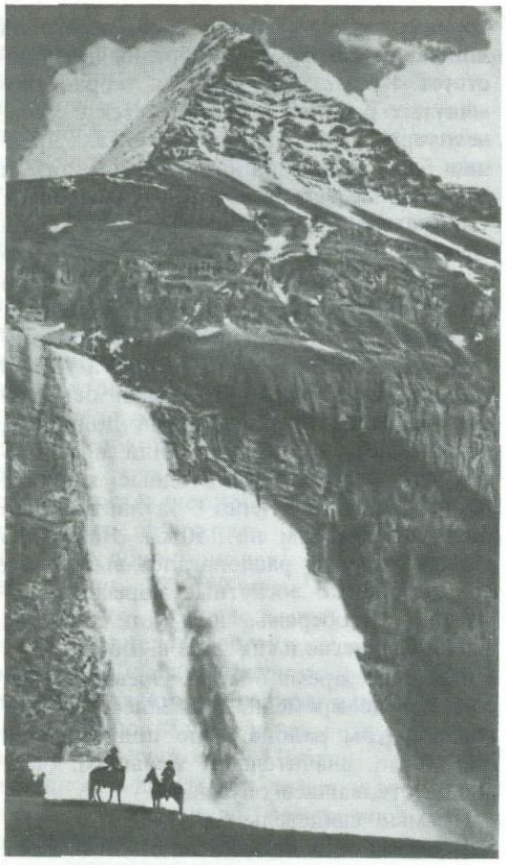


РИС. 17.1
Гора Робсон и водопад Эмперор в Британской Колумбии. Эта гора, высота которой составляет 3955 м, образовалась в результате эрозии тысячеметровой толщи морских осадков, испытавших поднятие и изогнутых в широкие складки. (Фотография компании «Канадиан нейшнел рейлуэйс».)

ской площади общественных собраний, известной как храм Юпитера Сераписа и расположенной на побережье недалеко от Неаполя. Колонны храма на высоте 6 м от его подножия испещрены ходами, просверленными пелециподами *Lithophagus*. Этот построенный римлянами храм впоследствии был затоплен морем (и в этот период сверлильщики-пелециподы оставили на нем следы своей жизнедеятельности), а затем снова поднялся из моря.

Еще одно свидетельство опускания обнаружено на угольной шахте в Иллинойсе, где в дельтовых осадках в 300 м ниже земной поверхности и в 200 м ниже уровня моря были обнаружены окаменелые стволы деревьев вместе с корнями, сохранившиеся в нормальном положении роста.

Скорость тектонических движений. Не все движения, деформирующие горные породы, протекают медленно. Смещения земной поверхности во время землетрясения в Сан-Франциско в 1906 г. достигали 7 м. После сильнейшего землетрясения на Аляске в 1899 г. было обнаружено, что берег залива Якутат поднялся на 14 м. Прежний морской пляж с галькой и морскими раковинами оказался осушен и поднят выше уровня, достигаемого самыми высокими волнами. Такие же изменения высоты берегов (около 16 м) сопровождали Аляскинское землетрясение 1964 г. Упомянутые изменения – самые крупные из когда-либо наблюдавшихся.

Типы тектонических движений. Тектонические движения бывают двух видов: *эпейрогенические* (колебательные) и *орогенические*. Третий тип движений, к которому относится разрастание морского дна и другие движения, описываемые тектоникой плит, будет рассмотрен в гл. 20. Эпейрогенические движения (поднятия и опускания) захватывают массы горных пород размера континентов и сопровождаются только малыми внутренними деформациями. Одни участки земной поверхности воздымаются над уровнем моря, и там преобладают процессы денудации, другие участки опускаются, и там преобладает накопление осадков. Так эпейрогенические движения влияют на общее развитие геологических событий. Примеры таких вертикальных движений уже приводились. В результате орогенических движений образуются горы. Эти движения создают огромные горные хребты, причем происходит как поднятие, так и сжатие. Складки в породах возникают в результате смятия при столкновении между плитами коры (гл. 20).

ЗАЛЕГАНИЕ ДЕФОРМИРОВАННЫХ ПОРОД

Падение и простирание. Для того чтобы определить положение любой наклонной плоскости, такой, как плоскость напластования в осадочных породах, необходимо произвести два рода наблюдений: 1) измерить угол наклона, т.е. степень отклонения данной плоскости от горизонтали, и 2) определить азимут (угол, отсчитываемый от направления на север) линии пересечения данной плоскости с горизонтальной плоскостью. Угол наклона пласта геологи называют *падением*. Угол падения измеряется вниз от горизонтальной плоскости; измерение производится с помощью инструмента, называемого инклинометром (или эклиметром). Направление (азимут) падения измеряется по линии самого крутого наклона пласта и определяется по компасу. Направление на север считается нулевым. Таким образом, пласт может падать, допустим, под углом 30° по азимуту СВ 20°.

Простирание пласта – это направление линии пересечения пласта с горизонтальной плоскостью. Направление (азимут) простирания, как и азимут падения, определяется по компасу с градусным лимбом. Азимут простирания всегда составляет прямой угол с направлением падения, и наоборот (рис. 17.2). Если, например, линия пересечения пласта с горизонтальной плоскостью (рис. 17.3) идет под углом 70° к западу от линии меридиана, то простирание записывается так: СЗ 290°, поскольку 360° – 70° = 290°. (Ответьте на вопрос: какое направление падения и простирания будет у горизонтального пласта?).

Вместе углы падения и простирания описывают положение, или залегание на-

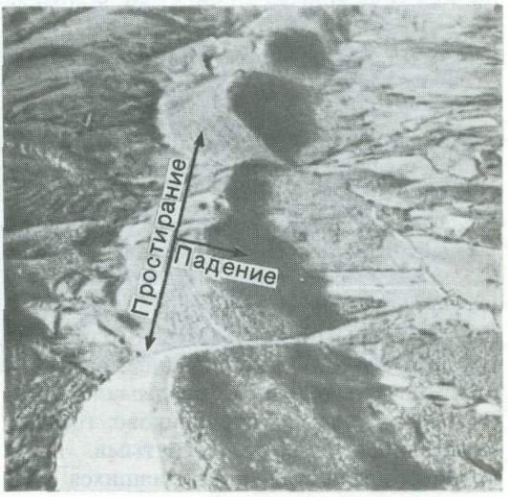


РИС. 17.2
Аэрофотоснимок эродированных надвинутых слоев в Северных Аппалачах. Показаны направления простирания и падения. (Фотография Джона Рича.)

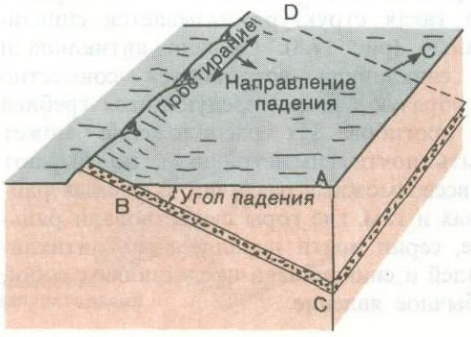


РИС. 17.3
Схема, показывающая падение и простирание наклонного пласта. Угол ABC – угол падения, BD – горизональная линия, соответствующая направлению простирания. Направление падения перпендикулярно направлению простирания.



РИС. 17.4

Горный компас Брантона, используемый для измерения падения и простирания слоев.

клонного или смятого в складки пласта в данном месте. Прибор, используемый при геологическом картировании, содержит инклинометр либо в виде отвеса, либо в виде уровня, как, например, в компасе Брантона (рис. 17.4). Этот прибор применяется как для измерения простирания слоев, так и для определения угла падения.

СТРУКТУРЫ, ОБРАЗУЮЩИЕСЯ В РЕЗУЛЬТАТЕ ДЕФОРМАЦИИ

Среди структур, возникающих под действием деформирующих сил, можно выделить слабый *наклон* и *изгиб* слоев, *складки*, *трещины* и *разрывы*.

Слабый наклон и изгиб слоев. В большинстве случаев осадочные породы, покрывающие обширные площади, первоначально были отложены в виде горизонтальных слоев. Если основание, на котором они отложились, воздымалось на различных участках неодинаково, то слои оказывались полого изогнутыми. Края крупных структур, образовавшихся при таких деформациях, обычно осложнены местными (локальными) поднятиями и опусканиями, в результате чего слои приобретают наклонное или волнистое залегание. Одинаково наклоненные слои горных пород называются моноклинальными.

Складки. Когда породы подвергаются давлению, превышающему их предел упругости, они, как установлено, начинают пластически изгибаться, образуя серии складок, подобных тем, какие возникают на покрывале, если его сдвигать по краю. Основные типы возникающих при этом структур – *флексуры, антиклинали, синклинали, купола* и структурные *впадины*.

Флексура представляет собой перегиб между участками горизонтальных или полого наклоненных слоев, расположенных выше и ниже этого перегиба (рис. 17.5, *а*). Изогнутые кверху слои (с древними породами посередине) образуют антиклиналь (рис. 17.6, 17.7). Если слои прогнуты вниз в виде корыта, в котором залегают более молодые породы, то такая структура называется синклиналью (рис. 17.8). Обычно антиклинали и синклинали встречаются совместно и образуют ряды чередующихся гребней и прогибов. Их расположение может быть почти симметричным, но бывают и всевозможные различия. В горных районах и там, где горы существовали раньше, серии почти параллельных антиклиналей и синклиналей представляют собой обычное явление.

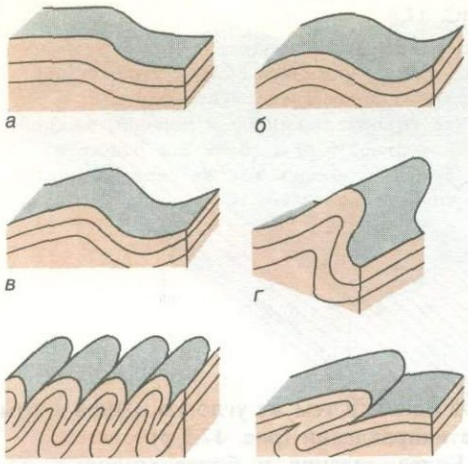


РИС. 17.5

Схемы различных типов удлиненных складок: *а* – флексура; *б* – симметричные антиклиналь и синклиналь; *в* – асимметричные антиклиналь и синклиналь; *г* – опрокинутая антиклиналь; *д* – изоклинальные складки; *е* – лежачая складка.

РИС. 17.6

Фотоснимок антиклинали. (Фотография Ли, Геологическая служба США.)

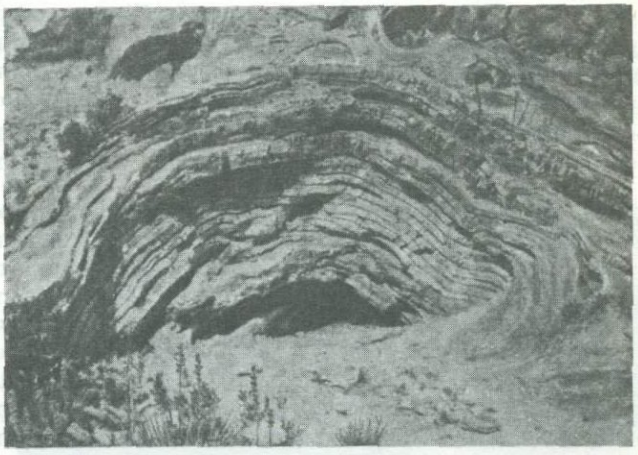




РИС. 17.7

Трехмерная схема, показывающая симметрию складки. Осевая плоскость складки – воображаемая плоскость, делящая складку на две симметричные части.

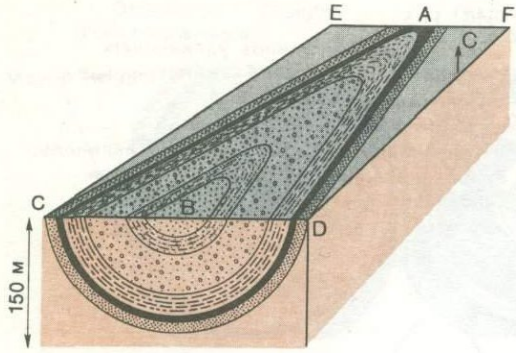


РИС. 17.8
Блок-диаграмма складки, погружающейся на юго-запад. Плоскость ECDF соответствует горизонтальной дневной поверхности. В точке A слой, показанный черным, выходит на поверхность, а в точке B вследствие погружения складки тот же слой находится на глубине более 100 м.

Осевая плоскость складки – это плоскость, которая проходит через середину складки и делит ее пополам (рис. 17.7). Линия пересечения осевой плоскости с плоскостью напластования слоя, изогнутого в складку, называется шарниром складки. Если шарнир складки наклонен, то такая складка называется *ныряющей складкой* или *складкой с наклонным шарниром* (рис. 17.8). Две стороны складки называются *крыльями*. Если осевая плоскость складки вертикальна и крылья наклонены к ней примерно под одинаковым углом, то складка будет *симметричной* (рис. 17.5, *б*); если одно крыло падает круче другого, а осевая плоскость наклонена, это *асимметричная* складка (рис. 17.5, *в*, *г*). У *опрокинутой* складки одно крыло переходит через вертикаль и оказывается перевернутым «вверх ногами» (рис. 17.5, *г*). *Лежачей* складкой называют опрокинутую складку, у которой оба крыла практически горизонтальны и одно из них находится в перевернутом залегании (рис. 17.5, *е*). *Изоклинальной* называют складку, крылья которой падают под одним и тем же углом в одном и том же направлении (рис. 17.5, *д*).

Более древние и более молодые породы находятся в складке в определенном геометрическом соотношении, зависящем от типа складки. Поскольку в антиклиналях в поднятие вовлечены более глубокие и соответственно более древние породы, размыв приводит к тому, что в центре каждой такой складки обнажаются более древние породы, а на флангах – более молодые (рис. 17.9, *а*, *б*). В центре же синклинали при эрозии обнажаются молодые породы, окруженные более древними (рис. 17.9, *в*, *г*).

Антиклиналь часто совпадает с хребтом, а синклиналь – с долиной. Однако в результате эрозии антиклиналь может оказаться под долиной, а стойкие к выветриванию породы, слагающие крылья синклиналей, могут образовать хребты, так что рельеф не обязательно совпадает со структурой (рис. 17.10, 17.11).

Многие структурные элементы имеют такие размеры, что их можно охватить взглядом. В засушливых горных районах

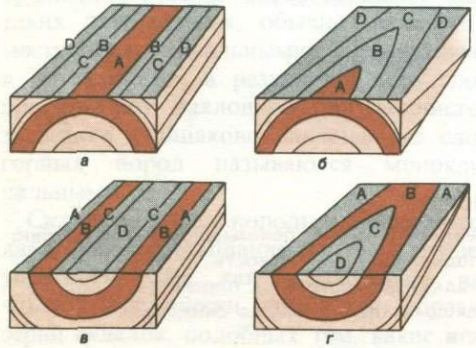


РИС. 17.9
Схемы, показывающие в плане и в поперечном разрезе относительный возраст и структурные соотношения слоев в простых складках. A – древнейший слой, выходящий на поверхность; D – наиболее молодой слой.
а – симметричная антиклиналь;
б – антиклиналь с наклонным шарниром;
в – симметричная синклиналь; *г* – синклиналь с наклонным шарниром.

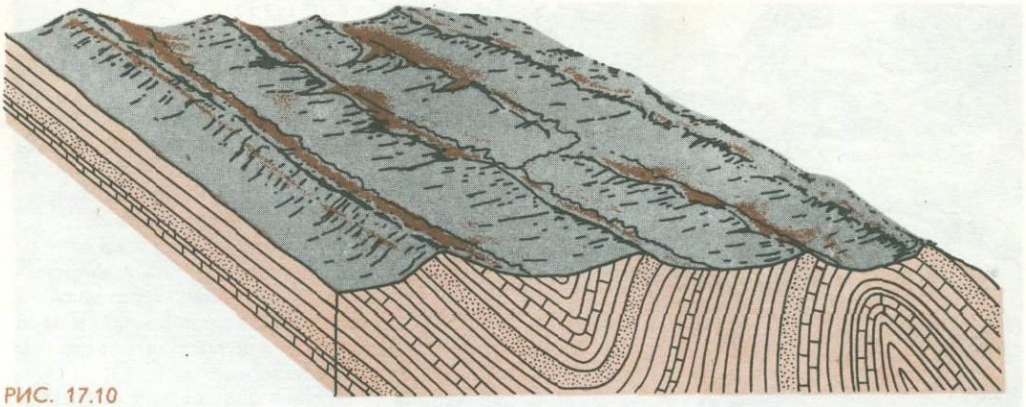


РИС. 17.10

Эрозионные горные хребты аппалачского типа, образовавшиеся в результате дифференцированной эрозии складчатых осадочных пород. (По Меттьюзу, 1930.)

со скудной растительностью даже крупные структуры распознаются без большого труда, особенно с воздуха (рис. 17.12). Однако в большинстве случаев крупные структуры устанавливаются при картировании площади (рис. 17.9).

Купола. Структурный купол – это грубо симметричная выпуклая складка, в которой слои наклонены во все стороны от центра (рис. 17.13). Круглые симметричные купола встречаются редко, чаще они имеют продолговатую овальную форму. Существуют купола всех переходных форм: от круглых до овальных. Некоторые купола представляют собой двойные наклонные вздутия на антиклиналях. Многие купола встречаются вместе с другими складками, однако в неко-

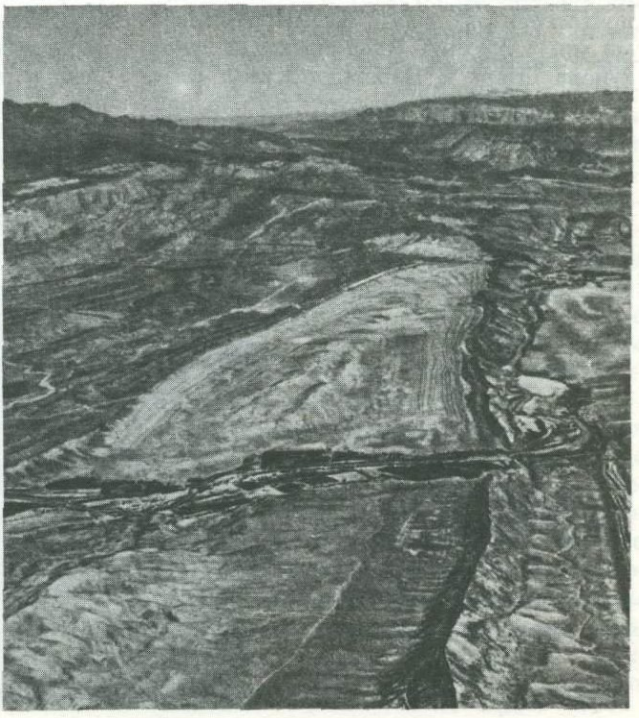


РИС. 17.11

Аэрофотоснимок асимметричной антиклинали Верджин в шт. Юта. Заметьте, что долина протягивается вдоль ядра складки и обрамляется справа грядами устойчивых к размыву пород. (Фотография Р. К. Фрамптона.)

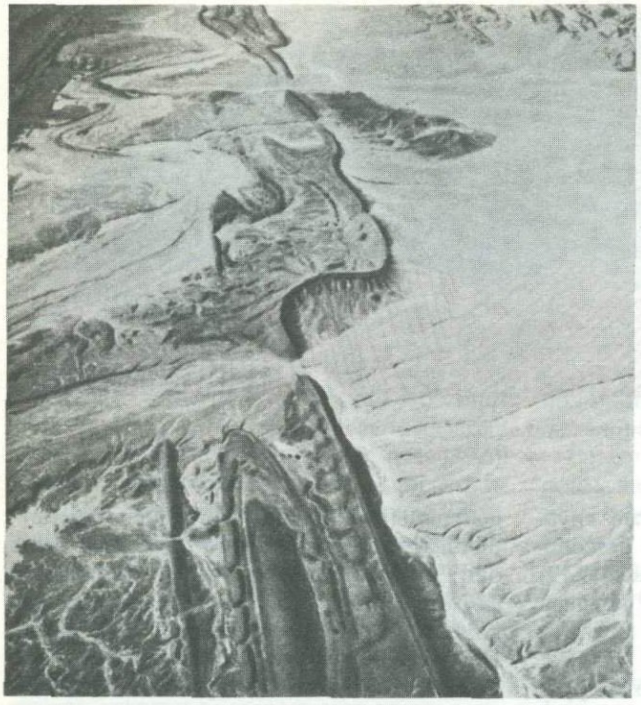


РИС. 17.12
Аэрофотоснимок размытой складки с наклонным шарниром в Северной Африке. Антиклиналь в середине нижней части снимка имеет в плане форму каноэ и погружается в направлении к верхней части снимка. Извилистые хребты за ее пределами – смятые в складки пласты, стойкие к размыву. Структура хорошо видна из-за отсутствия растительности. (Фотоснимок Военно-воздушных сил США.)

торых районах они представляют собой изолированные структуры, осложняющие почти горизонтальные пласты. Примерами могут служить Адирондакский купол, купола Озарк и Нашвилл. Купол Блэк-Хилс в Южной Дакоте – это крупная овальная структура, возвышающаяся над Великими равнинами (например, гора Харни-Пик имеет высоту 2208 м). Приподнятое ядро купола сложено докембрийскими гранитами (скалы в национальном заповеднике Маунт-Рашмор) и кристаллическими сланцами, которые несогласно перекрываются осадочными породами. Купол глубоко рассечен эрозией, и поэтому его структура доступна для обозрения. Некоторые другие купола выдавливаются вверх штоками или лакколитами (рис. 17.14).

Особый класс куполов – соляные купола побережья Мексиканского залива. Они имеют несколько километров в диаметре

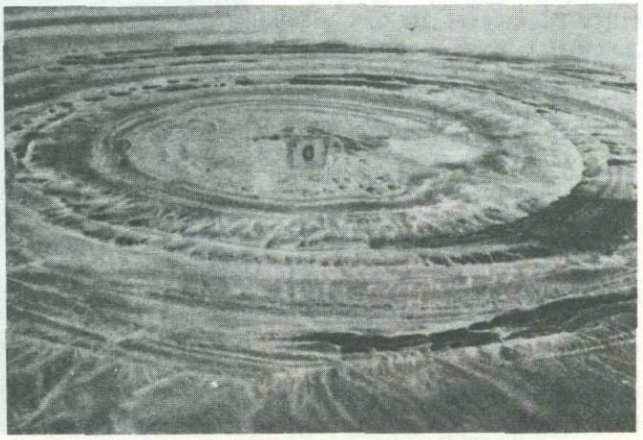


РИС. 17.13
Аэрофотоснимок эродированного купола в Северной Америке. Слои падают во всех направлениях от центра купола (отмечен буквой С). В средней части этой круглой структуры залегают наиболее древние породы. (Фотоснимок Военно-воздушных сил США.)



РИС. 17.14
Аэрофотоснимок залесенной горы Грин-Маунтин в округе Кук, шт. Вайоминг. Это не обнажившийся пока лакколит, расположенный вблизи гор Блэк-Хилс. На поверхности залегают осадочные породы: эрозия еще не достигла магматического ядра купола. (Из стереоскопических аэрофотоснимков Университета шт. Иллинойс.)

и возникли при внедрении тел влажной пластичной соли, выжимаемой из глубоких соляных пластов, в верхние горизонты осадочных пород. Слои, расположенные над соляными столбами, выдавливаются наверх и растрескиваются, а по бокам изгибаются (рис. 17.15, 17.16). Эти купола представляют интерес как источники нефти, природного газа, самородной серы и соли.

Впадины. Структурная впадина – структура, противоположная куполу. Во впадинах слои изогнуты таким образом, что вогнутость обращена вверх; слои со всех сторон падают к центру. Они похожи на стопку тарелок, каждая из которых по размеру меньше, чем лежащая ниже.

Одна из таких структур – Мичиганская впадина (рис. 17.17). Название «впадина» используется также в географии для обозначения эрозионных понижений, которые не обязательно являются структурными впадинами.

Складки дифференцированного уплотнения. Некоторые небольшие складки образуются при дифференцированном проседании осадков над погребенной эрозионной поверхностью. На рис. 17.18 показана толща сланцев и песчаников, залегающая над жестким погребенным выступом. Если под давлением вышележащих пород из глинистых сланцев будет вытесняться вода и эти сланцы уменьшатся в объеме на 10–20%, то пласты, находящиеся прямо над выступом, просядут до его кровли, а слои, расположенные в стороне от вершины погребенного холма, просядут глубже, так как сланцы имеют там бóльшую мощность. Все нефтеносные песчаники в осадочных толщах будут, следовательно, наклонены в стороны от центра холма в виде купола или антиклинали; так же поведут себя и сланцы. Некоторые нефтеносные купола Канзаса и Оклахомы образовались путем такого дифференцированного уплотнения.

Складчатые системы. Для многих горных областей характерны складчатые пояса шириной в десятки и сотни километров (рис. 17.19) и длиной в сотни километров. Оси крупных складок горного хребта обычно располагаются кулисообразно, и такие структуры осложнены на флангах мелкими складками с наклонными шарнирами. В крупных межгорных впадинах породы обычно падают

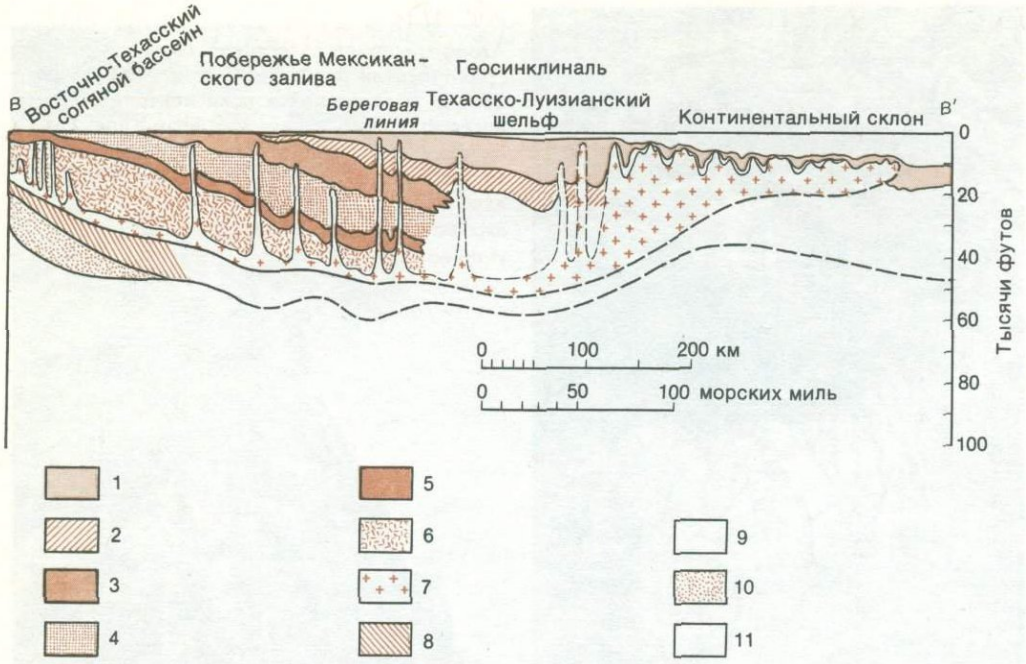


РИС. 17.15

Схематический разрез через северное побережье Мексиканского залива. На разрезе показаны геосинклинальный прогиб и корни соляных куполов, расположенные в глубоко залегающих соляных отложениях. *1*–плиоцен–плейстоцен; *2*–миоцен; *3*–олигоцен; *4*–палеоцен–эоцен; *5*–верхний мел; *6*–юра–нижний мел; *7*–триасовая (?)–юрская соль; *8*–пенсильваний–триас (?); *9*–пенсильваний (ярус Атока и более древние породы); *10*–фации Уошито (крапом показаны метаморфизованные породы); *11*–кембрий–ордовик. (По Спенсеру, 1977; по Мартину и Кейсу, 1975.)

в сторону от одного горного хребта и восстают навстречу другому. Оси мелких складок вблизи краев впадины, как правило, параллельны главным структурам, так что, возможно, эти мелкие складки образовались в то же самое время и под действием тех же сил. Небольшие складки такого типа в шт. Вайоминг оказались важным источником нефти.

Трещины. Трещины – это нарушения сплошности, по которым не наблюдается заметного смещения, параллельного данному нарушению, хотя сами трещины могут быть открытыми кверху или зия-

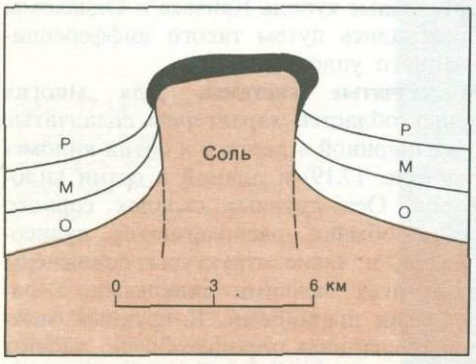


РИС. 17.16

Схема глубинной структуры одного из соляных куполов Техасского побережья Мексиканского залива. Черным показан «кэпрок» – соляная шляпа. О–олигоцен; М–миоцен; Р–плиоцен и плейстоцен. Из пород, залегающих на крыльях и в кровле многих таких куполов, добывают нефть.

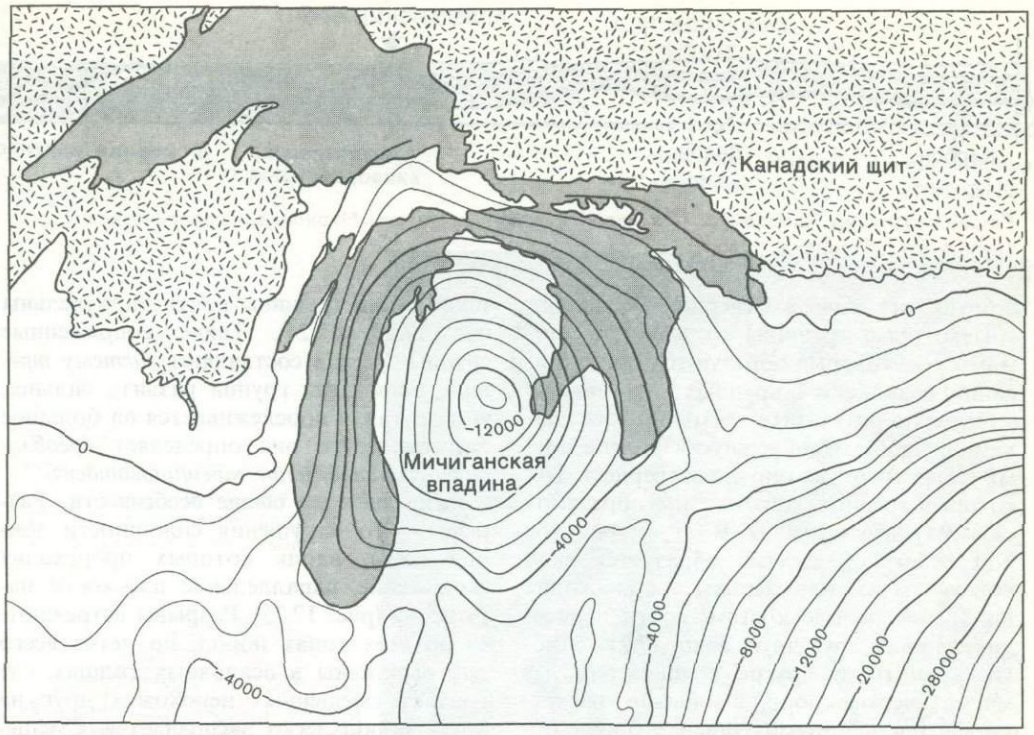


РИС. 17.17

Мичиганская платформенная впадина. Изолиниями показана глубина (в футах) докембрийского фундамента. (По Тектонической карте Северной Америки, Геологическая служба США, 1969.)

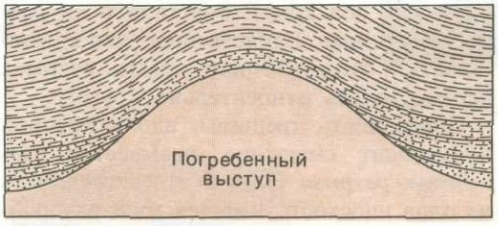


РИС. 17.18

Складка уплотнения над погребенным выступом.

ющими. *Трещины – проявление хрупкой* реакции вещества на приложенные силы растяжения, сжатия или изгиба. Трещины растяжения широко распространены во всей земной коре. Некоторые нарушения возникают, несомненно, в результате коробления и скручивания, которым подвергаются породы при тектонических движениях.

Вдоль гребней антиклиналей под действием происходящего там растяжения образуются многочисленные трещины растяжения (рис. 17.20). Трещины возни-*кают также при сокращении* объема остывающих некков, даек, силлов и лавовых потоков. Под прямым углом к остывающей поверхности формируется столбчатая отдельность с размером столбов от нескольких сантиметров до метра и более в поперечнике; особенно часто она встречается в крупных пластовых телах (рис. 6.26). Среди наиболее известных и впечатляющих примеров столбчатой отдельности можно назвать «Чертов палец» в Калифорнии (рис. 6.26), «Башню дьявола» в Вайоминге (рис. 6.33) и «Мо-



РИС. 17.19

Разрезы структур Аппалачей. (По Геологической карте шт. Мэриленд, Геологическая служба шт. Мэриленд, 1968.)

стовую гигантов» в Северной Ирландии.

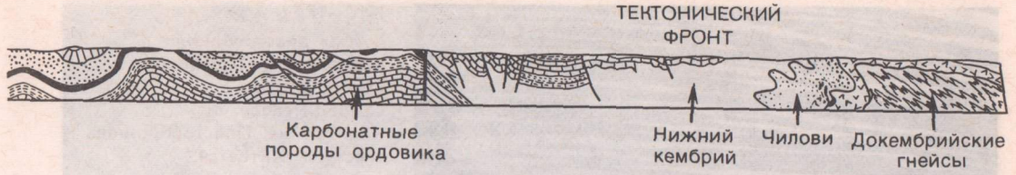
Некоторые трещины отдельности (помимо тех, которые образуются при остывании) возникают в крупных интрузивных массивах в результате тектонических движений, происходящих спустя долгое время после того, как порода затвердеет. Некоторые трещины такого типа образуются в результате сжатия. В блоке гранитов под действием сжатия образуется скол под углом 45° или меньше и происходит дробление по плоскостям, почти перпендикулярным друг другу (рис. 17.21). Многие граниты и другие крупнозернистые магматические породы обычно растрескиваются на прямоугольные блоки более или менее правильной кубической формы или на вытянутые призмы. Наличие таких трещин не только облегчает их открытую разработку и позволяет выбрать соответствующую технологию горных работ, но и определяет размер добываемых блоков. Только в отдельных местах трещины располагаются настолько редко, что удается добыть блоки, пригодные для получения совершенных монолитов длиной до 20–30 м. Кроме того, в гранитах существует и другая отдельность – трещины разгрузки. Они образуются при эрозионном снятии нагрузки, т.е. при размыве мощной толщи перекрывающих пород. Трещины разгрузки разделяют плоские или изогнутые пластины толщиной, как правило, несколько метров. Примеры таких трещин можно найти в Джорджии (Стоун-Маунтин) или в горах Сьерра-Невады (хребет Чикита; см. рис. 17.22).

Когда трещин много – будь то в осадочных, магматических или метаморфических породах, – они обычно группируются в серии, пересекающиеся под достаточно большими углами. В каждой такой серии трещины почти параллельны (рис. 17.23, 17.24). Такие сопряженные группы трещин составляют *систему трещин*. Если одна группа развита сильнее, чем другая, и прослеживается на большое расстояние, то она определяет *преобладающее направление трещиноватости*.

Разрывы и их общие особенности. Разрывы – это нарушения сплошности земной коры, вдоль которых происходит скольжение, параллельное плоскости нарушения (рис. 17.25). Разрывы встречаются во всех типах пород, но четче всего они выражены в осадочных толщах, где контакт смещенных непохожих друг на друга пород легко распознается. Смещение может составлять не больше 1 мм, но может достигать и многих километров. Ни в том, ни в другом случае нельзя определить, осталось ли одно крыло разрыва неподвижным, когда другое двигалось, или оба крыла сместились на разное расстояние. Единственное, что можно сказать, – это что одно крыло разрыва переместилось относительно другого.

Поверхность трещины, вдоль которой происходит смещение, называется *плоскостью разрыва*. Однако это может быть не одна плоскость, а целая зона раздробленных пород, и даже если она тонкая и плоская, то редко бывает гладкой на сколько-нибудь значительном расстоянии. Когда разрыв можно проследить на всю его длину, то обнаруживается, что он к обоим концам затухает (рис. 17.26). Величина смещения обычно оказывается наибольшей в середине и постепенно уменьшается к краям.

На некоторых участках разрывы группируются в зоны, где смещение распределялось по целому ряду близко расположенных нарушений, а не происходило вдоль какой-то одной плоскости. В дру-



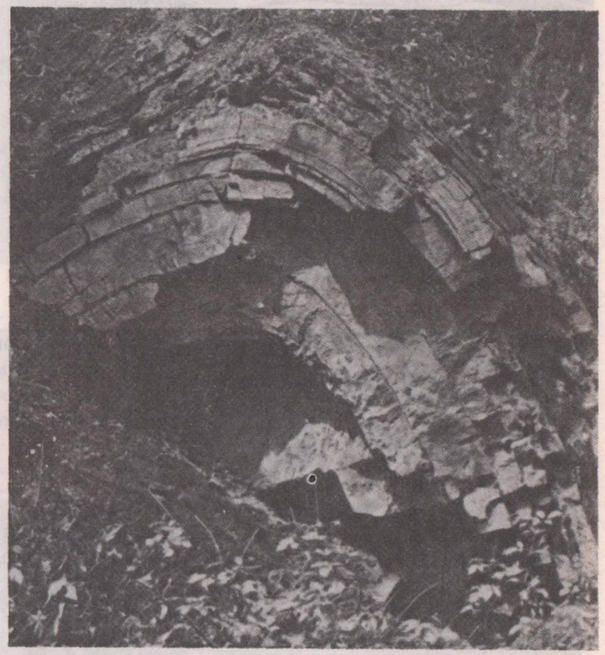
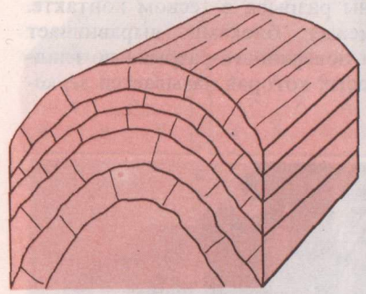


РИС. 17.20

Схема и фотоснимок простой антиклинали с трещинами отдельности, возникающими при растяжении в сводовой части складки.



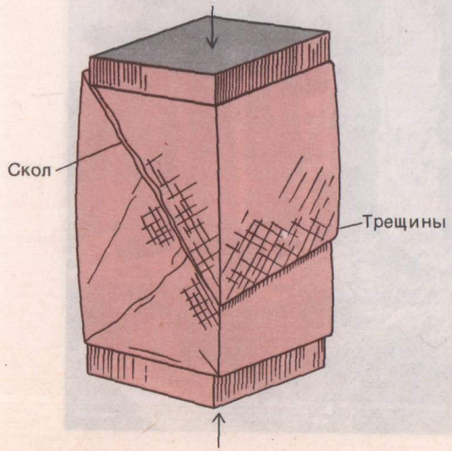


РИС. 17.21

Блок породы, нарушенный сколами и трещинами в результате давления, приложенного к его краям. (По Добре́.)



РИС. 17.22
Грубая пластообразная отдельность в гранитах, хребет Чикита в Сьерра-Неваде, шт. Калифорния. Пластообразная *текстура считается* результатом расширения, которое стало возможным после уменьшения статической нагрузки при эрозионном удалении вышележащих пород. Фигура человека (слева от центра снимка) позволяет судить о масштабе явления. (Фотография У. Бредли.)

гих зонах разрывы располагаются кулисообразно.

Там, где разрывы рассекают массивы горных пород большого веса и размера, огромное давление удерживает блоки по обе стороны разрыва в тесном контакте. Трение между блоками выравнивает и полирует поверхность разрыва до гладкой плоскости, которая называется *зерка-*



РИС. 17.23
Вертикальная отдельность в горизонтально залегающих алевролитах (район озера Кейюга, шт. Нью-Йорк). Трещины отдельности образуют две системы, расположенные под прямым углом друг к другу. (Фотография Кайндла, Геологическая служба США.)

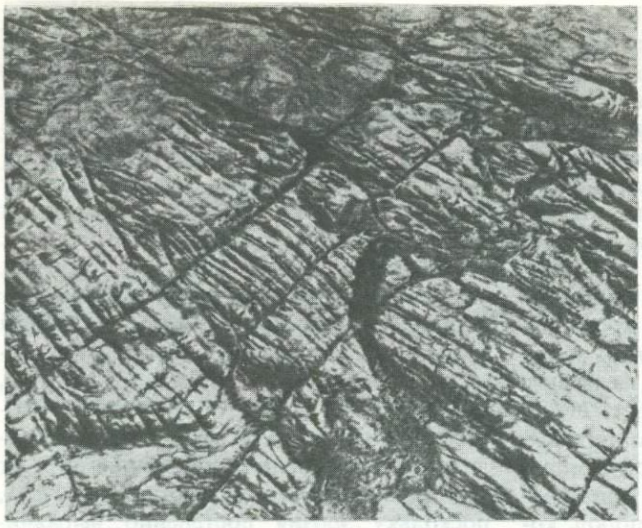
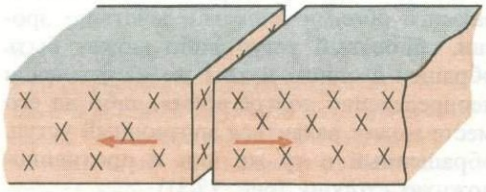


РИС. 17.24
Пересекающиеся системы трещин в северной Австралии при взгляде с воздуха. Под действием выветривания и эрозии трещины увеличились и превратились в овраги. (Фотоснимок Военно-воздушных сил США.)



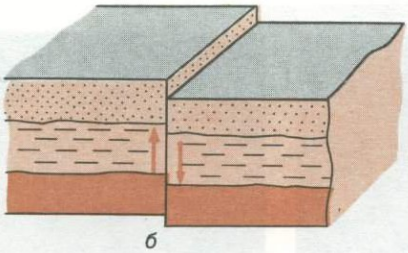




РИС. 17.25
Различие между трещиной и разрывом. *а* – трещина разделяет блок породы так, что движение происходит только перпендикулярно поверхности трещины, *б*–*в* – в случае разрыва движение направлено параллельно поверхности разрыва.

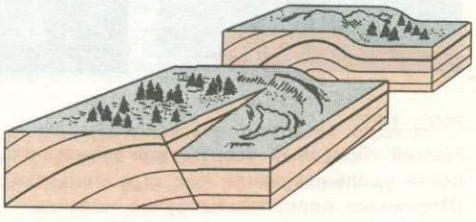


РИС. 17.26
Схема, показывающая переход антиклинали в разрыв.

лом скольжения (рис. 17.27). Некоторые зеркала скольжения имеют глазурованную пришлифованную поверхность. В результате истирающего действия твердых частиц породы или минералов на стенках остаются *штрихи* и *бороздки*. Бывает, что две системы штрихов, наблюдаемых на стенках разрыва, пересекаются между собой, указывая на то, что в разное время происходили движения разных направлений. При отсутствии гладкой поверхности породы на стенках разрыва крошатся и перетираются. Грубообломочный материал такого происхождения называют *тектонической брекчией* (рис. 17.28), а тонкий порошкообразный материал – *глинкой трения*. Обломки, встречающиеся вдоль поверхности разрыва, образовались при разрушении всех тех пород, которые пересечены данным разрывом, так что в тектонической брекчии могут быть перемешаны разные виды пород.

Некоторые тектонические нарушения располагаются вертикально, но большинство разрывов наклонные, так что одно крыло нависает над другим. Породы, залегающие над разрывом, образуют *висячее крыло*, а породы, залегающие под разрывом, – *лежачее крыло*. Сходные термины применяются в горном деле как для разрывов, так и для жил. Лежачий бок (подошва жилы) – это порода, на которой горняк стоит, когда разрабатывает жилу, а висячий бок – это порода над его головой (рис. 17.29). Блок, который кажется смещенным вверх, будет *поднятым* крылом разрыва, а блок, смещенный вниз, – *опущенным* крылом.

Сбросовые уступы. Многие разрывы, нарушая глубинные породы, затрагивают и земную поверхность. Когда с одной стороны разрыва поверхность приподнимается, образуется обрывистая стенка, или *сбросовый уступ*. Современная высота такого уступа зависит не только от величины вертикального смещения, но и от его геологического возраста (рис. 17.30), поскольку эрозия постепенно выравнивает обе стороны уступа. В зависимости от относительного сопротивления, оказываемого обоими блоками действию эрозии, сбросовый уступ либо может быть обращен в одном и том же направлении неопределенно долгое время, либо на его месте может развиться эрозионный уступ, обращенный в ту же или в противоположную сторону (рис. 17.31).

Восточные хребты Сьерра-Невады

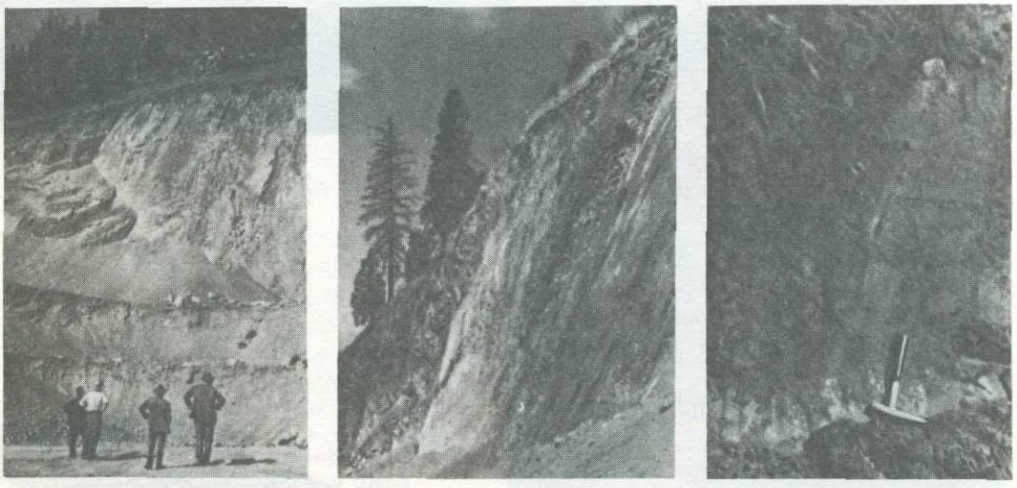


РИС. 17.27

Низкий сбросовый уступ с зеркалами скольжения на поверхности разрыва, обнажившейся после удаления осыпи при строительстве дороги (бассейн Кламат на юге шт. Орегон). Штриховка параллельна ручке молотка.

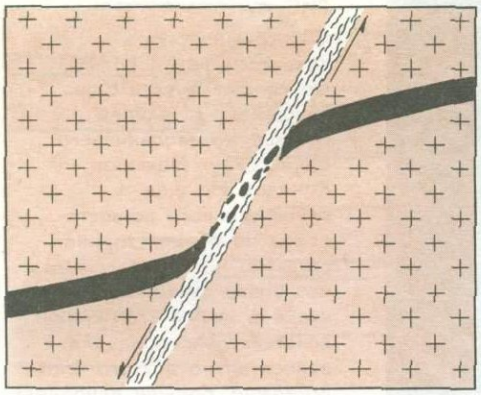


РИС. 17.28

Тектоническая брекчия. Жила вблизи сброса изгибается, а по самому разрыву обломки жилы растащены между ее отрезками. Кроме того, тектоническая брекчия может включать обломки всех пород, слагающих стенки разрыва.

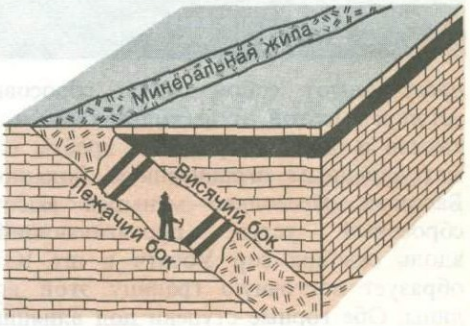


РИС. 17.29

Схема взаимного расположения висячего бока (кровли) и лежачего бока (подошвы) жилы, образовавшейся вдоль разрыва. Шахтер стоит на «подошве» разрыва, а кровля жилы «висит» над его головой.

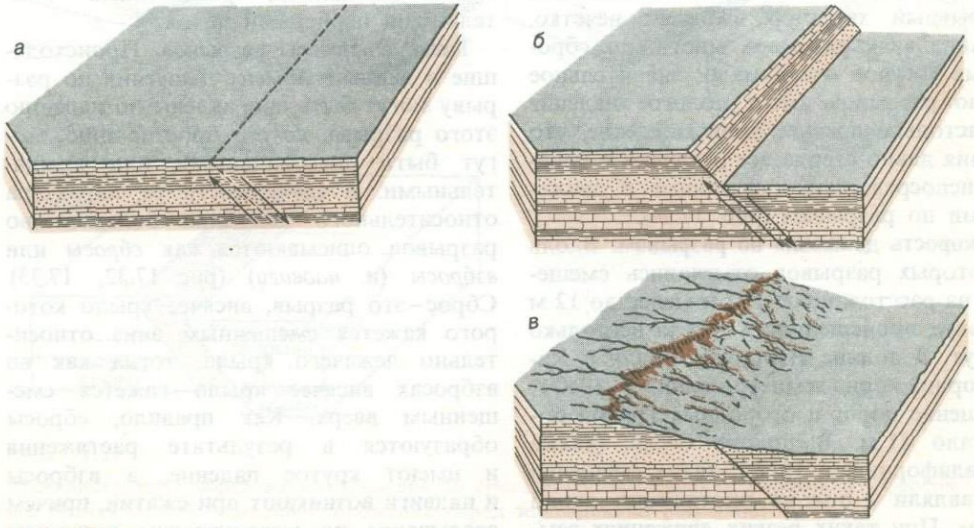


РИС. 17.30

Образование уступа вдоль сбросовой линии. Ненарушенный блок *а* рассекается сбросом, который создает первоначальный сбросовый уступ *б*. Размыв приподнятого блока, покрытого стойкими породами, отодвигает откос от линии разрыва, но в целом сбросовый уступ сохраняется.

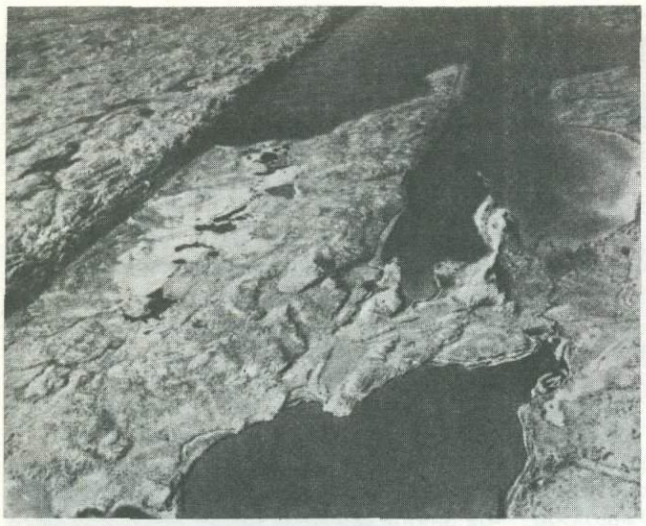


РИС. 17.31
Сбросовый уступ в докембрийских породах, слагающих берега озера Макдоналд (в районе Большого Невольничьего озера, округ Маккензи, Канада). Не зная относительного возраста пород по обеим сторонам разрыва, нельзя утверждать, что блок, занимающий верхний левый угол снимка, действительно приподнят относительно другого блока. Возможно, больше приподнят был правый блок, но затем он был сильнее срезан эрозией.

представляют собой серию сбросовых уступов высотой от нескольких сотен до тысячи и более метров; эти хребты служат западным ограничением Большого Бассейна. Несколько меньшей высоты сбросовый уступ, протягивающийся вдоль склонов гор Уосатч в шт. Юта, образует восточную границу этой впадины. Обе горные ступени под влиянием эрозии приобрели настолько изрезанную форму, что в некоторых местах их разрывный характер выражен нечетко. В Аппалачах разрывов много, но сбросовых уступов очень мало; значительное число разрывов имеет пологое падение и настолько древнее происхождение, что эрозия давно стерла все различия в уровне, непосредственно связанные с движениями по разрывам (рис. 17.34).

Скорость движения по разрывам. Вдоль некоторых разрывов отмечались смещения на расстояние от 1 м и менее до 12 м и более, происшедшие всего за несколько минут. В долине Империал-Валли в Калифорнии при землетрясении в 1940 г. смещение дорог и огородных грядок достигало 11 м. В долине Оуэнс (также в Калифорнии) в 1872 г. такие смещения составляли 2–6 м на протяжении около 60 км. При таких резких движениях земной коры почти всегда происходят землетрясения. Однако в некоторых шахтах и вдоль отдельных отрезков разлома Сан-Андреас, шт. Калифорния, наблюдались непрерывные подвижки по разрывам, но они развивались медленно, в ходе процесса, называемого ползучестью или *крипом*.

Если в большинстве случаев движения по разрывам происходят медленно, то разрыв со смещением в тысячи метров должен был бы быть активным в течение очень длительного времени. Общее смещение могло накопиться за счет сотен мелких подвижек, разделенных длительными периодами покоя.

Типы и примеры разрывов. Происходящие в данный момент движения по разрыву могут быть направлены по падению этого разрыва, по его простиранию, могут быть диагональными или вращательными. В зависимости от характера относительного движения большинство разрывов описываются как *сбросы* или *взбросы* (и *надвиги*) (рис. 17.32, 17.33). Сброс – это разрыв, висячее крыло которого кажется смещенным вниз относительно лежачего крыла, тогда как во взбросах висячее крыло кажется смещенным вверх. Как правило, сбросы образуются в результате растяжения и имеют крутое падение, а взбросы и надвиги возникают при сжатии, причем скалывание по механическим причинам часто происходит под углом меньше 45°. (Различие между взбросами и надвигами состоит именно в крутизне наклона поверхности разрыва: взброс переходит

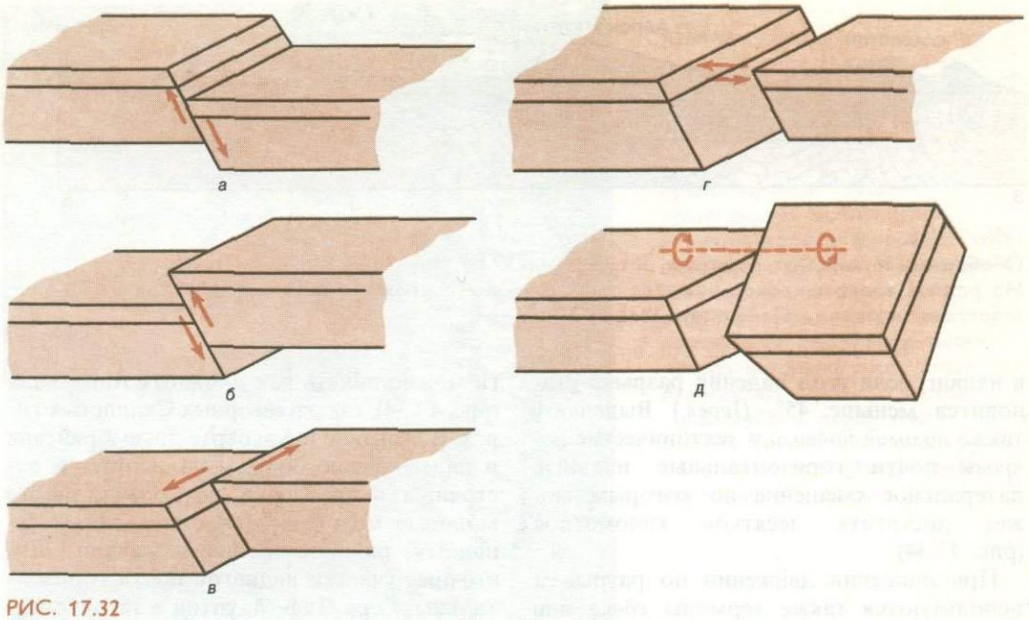


РИС. 17.32

Типы разрывов. Названия разрывов соответствуют направлению относительного смещения блоков: *а* – сброс; *б* – взброс или надвиг; *в* – сдвиг; *г* – сбросо-сдвиг; *д* – разрыв с вращением блоков, при котором меняется простирание и падение слоев.

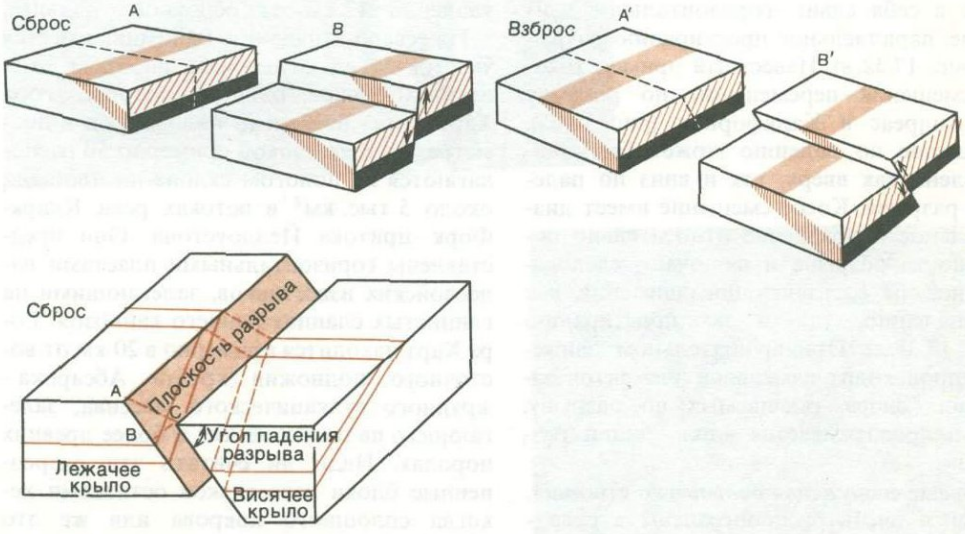


РИС. 17.33

Блок-диаграммы образования разрывов со смещением по падению: сбросов и взбросов. На схемах A и A′ показано положение перед зарождением разрывов; будущие плоскости разрывов обозначены штриховыми линиями. Схемы B и B′ показывают положение сразу же после образования разрывов; направление относительного смещения обозначено стрелками. Термины, используемые при описании геометрии разрывов, приведены на схеме в левом нижнем углу. AB – смещение по падению; BC – смещение по простиранию; AC – общее смещение.



РИС. 17.34

Обобщенный разрез от Бристоля, шт. Виргиния, до Маунтин-Сити, шт. Теннесси. На разрезе видно широкое развитие тектонических покровов с движением материала с востока на запад. (По Баттсу, 1933.)

в надвиг, если угол падения разрыва становится меньше 45°.– *Перев.*) Выделяют также *пологие надвиги* и тектонические *покровы* – почти горизонтальные надвиги, латеральное смещение по которым может достигать десятков километров (рис. 17.34).

При описании движений по разрывам используются также термины *сдвиг* или *смещение по простиранию, смещение по падению, косое смещение* или *сбросо-* и *взбросо-сдвиг* и *вращение*, или поворот, блоков. Смещения по простиранию включают в себя сдвиг – горизонтальное движение, параллельное простиранию разрыва (рис. 17.32, *в*). Известный пример такого смещения – перемещение по разрыву Сан-Андреас в Калифорнии (рис. 17.35). Смещение по падению может быть направлено как вверх, так и вниз по падению разрыва. Косое смещение имеет диагональное направление относительно поверхности разрыва и включает, следовательно, обе составляющие движения, как по падению, так и по простиранию (рис. 17.32, *г*). При вращательном движении происходит изменение элементов залегания слоев, смещаемых по разрыву, что и прослеживается вдоль линии разрыва.

Горные сооружения покровного строения. Надвиги очень распространены в складчатых горных сооружениях, где они срезают складки приблизительно параллельно простиранию. Серию надвинутых одна на другую пластин представляют собой Альпы. Подобное же нагромождение чешуйчатых надвигов, в настоящее время глубоко эродированных, образуют Шотландские нагорья. В США крупные надвиги можно видеть как в южных Аппалачах (рис. 17.34), так и в северных Скалистых горах. В Монтане и Альберте докембрийские и палеозойские породы надвинуты в восточном направлении на гораздо более молодые меловые глинистые сланцы западных районов Великих равнин. Восточные участки надвигов почти горизонтальны. Гора Чиф-Маунтин в шт. Монтана (рис. 17.36) – это эрозионный останец надвинутого блока, представляющий собой крупный блок докембрийских пород, одиноко лежащий на меловых сланцах на удалении 12 км от основного надвига.

На северо-западе шт. Вайоминг имеется участок с удивительным набором смещенных блоков, один из которых – гора Харт имеет несколько километров в диаметре. Из всех блоков примерно 50 располагаются на пологом склоне на площади около 5 тыс. км^2 в истоках реки Кларк-Форк – притока Йеллоустона. Они представлены горизонтальными пластами палеозойских известняков, залегающими на глинистых сланцах раннего кайнозоя. Гора Харт находится примерно в 20 км от восточного подножия хребта Абсарока – крупного вулканического массива, залегающего на палеозойских и более древних породах. Надо ли считать эти разрозненные блоки известняков остатками некогда сплошного покрова или же это обломки, сместившиеся под действием силы тяжести? Вероятно, более правильным является второе предположение, т. е. можно считать, что эти блоки оторвались (и соскользнули по плоскостям напластования) от полого наклоненных известняковых слоев, скрытых в настоящее время под хребтом Абсарока. Однако если

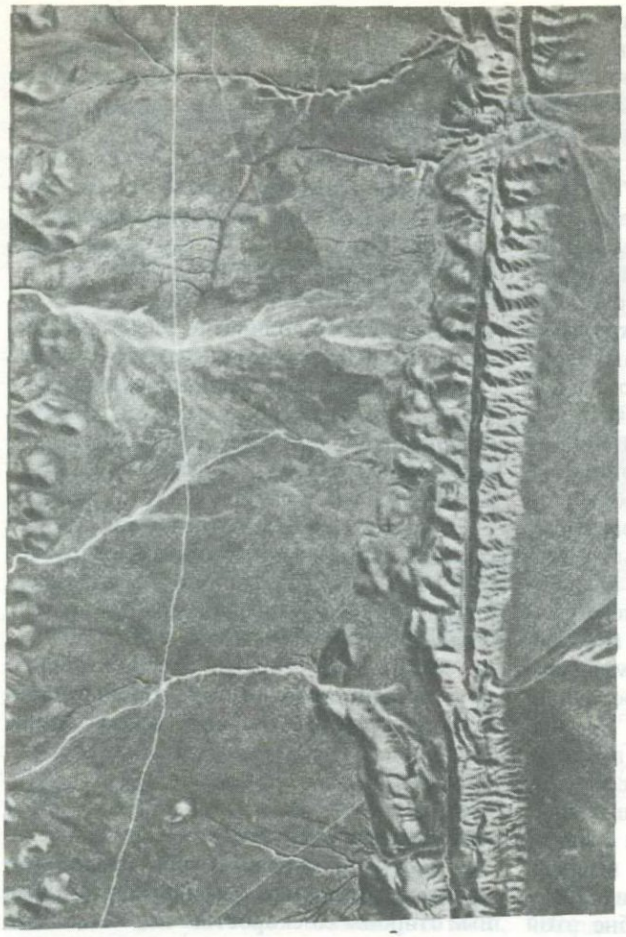


РИС. 17.35
Аэрофотоснимок (вертикальная съемка) зоны разлома Сан-Андреас в районе Индио, шт. Калифорния. Положение разрыва прослеживается по прямолинейной трещине, разделяющей холмы (слева) и днище долины (справа). Русла некоторых ручьев, стекающих с этих холмов, следуют вдоль рифтовой зоны разлома на протяжении нескольких тысяч метров и только после этого пересекают разлом. Участок, показанный в левой части снимка, движется в направлении к верху снимка. (Фотография компании «Спенс эйр фотос».)

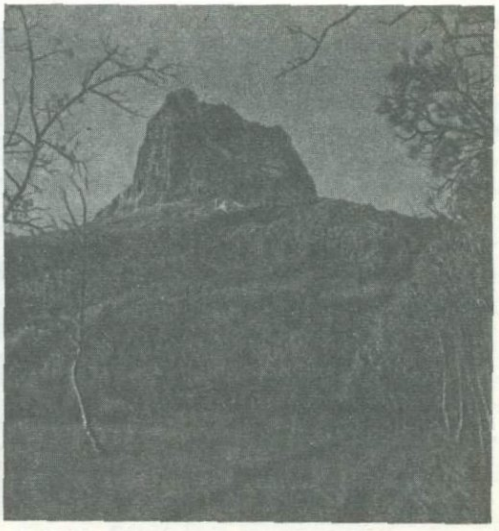


РИС. 17.36
Гора Чиф-Маунтин (в шт. Монтана) – эрозионный останец тектонического покрова Льюис в северных Скалистых горах. Этот блок, сложенный докембрийскими породами, лежит на сравнительно молодых меловых глинистых сланцах.

это даже и образования оползневого характера, их все-таки можно считать своего рода результатом разрывной тектоники.

Глыбовые горы. Самые многочисленные и наглядные примеры глыбовых гор, имеющихся в США, представлены в Большом Бассейне – между хребтом Уосатч и горным сооружением Сьерра-Невады. Эта впадина, простирающаяся с севера на юг примерно на 800 км и достигающая в ширину 700 км, не имеет внешнего стока. Наклоненные блоки, ограниченные крутыми разрывами, образуют там в целом меридиональные цепочки гор, разделяющие довольно широкие долины, днища которых сложены аллювиальными и озерными отложениями. Склоны гор обычно имеют углы 20–30°. Некоторые горы образуют крутые обрывы, для других характерны развитые у подножия аллювиальные (делювиальные) конусы (рис. 17.37). Возникновение Большого Бассейна в целом и находящихся внутри его глыбовых гор косвенно связано с надвиганием Американской литосферной плиты на восточную часть Тихоокеанской плиты.

Сама Сьерра-Невада также представляет собой гигантское глыбовое сооружение длиной около 600 км и шириной 120 км, полого наклоненное к западу (рис. 17.38). Гора Уитни – самая высокая вершина на основной территории США – расположена на восточном гребне этой горной системы и имеет высоту 4419,2 м над уровнем моря. Остальная часть этого гребня обычно на 1500–2000 м ниже.

Горсты и грабены. Блок, опущенный по двум ограничивающим его разрывам, называется *грабеном* (рис. 17.39, *а*), а поднятый блок, заключенный между двумя разрывами, – *горстом* (рис. 17.39, *б*). Разрывы могут возникать одновременно с наклоном находящихся между ними глыб, что приводит к образованию параллельных хребтов или «пилообразных» гор, чередующихся с долинами. Глыбовые дислокации, захватывающие крупные блоки земной коры, наглядно проявляются в Провинции бассейнов и хребтов, охватывающей районы Аризоны, Невады, восточной Калифорнии, южного Орегона, южного Айдахо и западной части шт. Юта.

Горсты и грабены встречаются во всех областях со сложной системой разрывов. Много таких образований в Долине Смерти (рис. 17.40) в Калифорнии. Горные массивы Вогезы (во Франции) и Шварцвальд (в ФРГ) – два горста, расположенные друг против друга по обе стороны широкого и глубокого грабена долины Рейна. Выдающиеся примеры крупных грабенов – структуры, образующие Великую рифтовую долину в Восточной Африке. Этот рифт интерпретируется как начальная стадия развития спредингового срединного хребта, где плиты коры расходятся в разные стороны со скоростью несколько сантиметров в год. Африканский рифт со-

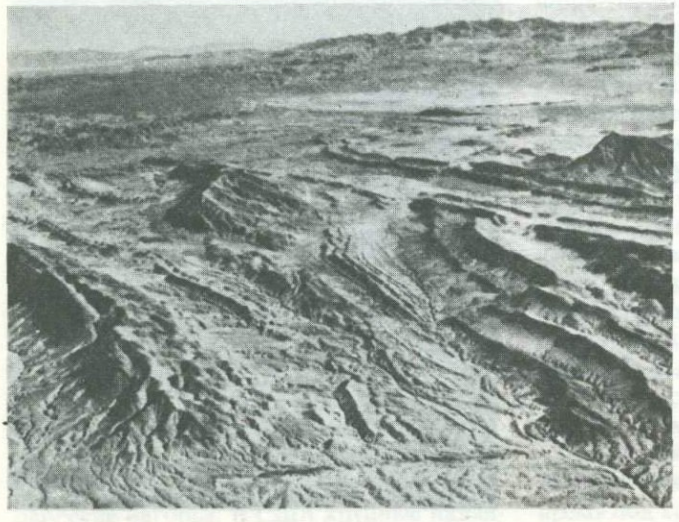


РИС. 17.37
Характерный рельеф впадин («бассейнов») и хребтов Южной Невады, несколько сглаженный эрозией. См. также рис. 13.36, 16.10 и 17.40 (Фотография компании «Ферчайлд эриел сервис».)

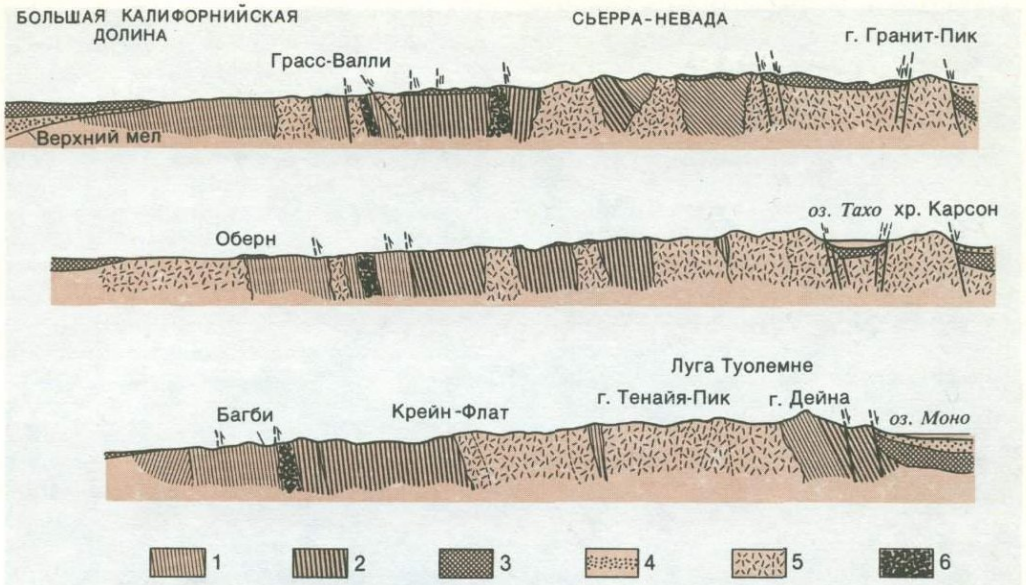


РИС. 17.38

Структурные разрезы через Сьерра-Неваду. Верхний разрез – от горы Гранит-Пик (шт. Невада) до Большой Калифорнийской долины; средний разрез – от хребта Карсон (шт. Невада) до Большой долины; нижний разрез – от озера Моно (шт. Калифорния) до Большой долины. *1* – палеозой; *2* – мезозой; *3* – третичные отложения; *4* – четвертичные отложения; *5* – граниты; *6* – серпентиниты. (По Ф. Кингу: *Philip B. King*, The evolution of North America, Prinston University Press, 1959, fig. 82, p. 146.)

стоит из серии опущенных по разрывам блоков, ограниченных возвышенностями, над которыми воздымается несколько вулканов. Часть площади опущенных блоков в настоящее время занимают озера, в том числе Танганьика, Мобуту-Сесе-Секо (Альберт) и Ньяса. Глубина озера Танганьика составляет 1418 м, его дно находится на 620 м ниже уровня моря. Самый глубокий грабен в мире – озеро Байкал на востоке Сибири с глубиной 1713 м. Байкал также, возможно, является проявлением ранней стадии разделения плит. Долина реки Иордан и Мертвое море образованы узким грабеном. На большом протяжении эта долина располагается ниже уровня Мирового океана: поверхность мелководного Мертвого моря имеет высотную отметку 430 м ниже уровня океана. Этот глубокий прогиб, как и районы Красного моря и Аденского залива, возник, когда Аравийская плита отошла от Африки в северо-северо-восточном направлении.

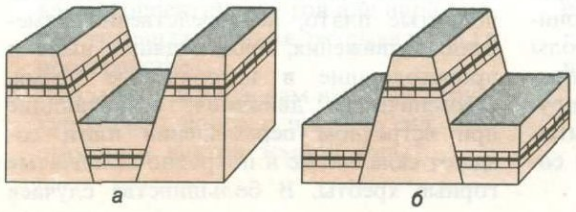


РИС. 17.39

Схемы строения грабена и горста: *а* – грабен – опущенный блок между двумя сбросами; *б* – горст – поднятый блок между двумя сбросами.

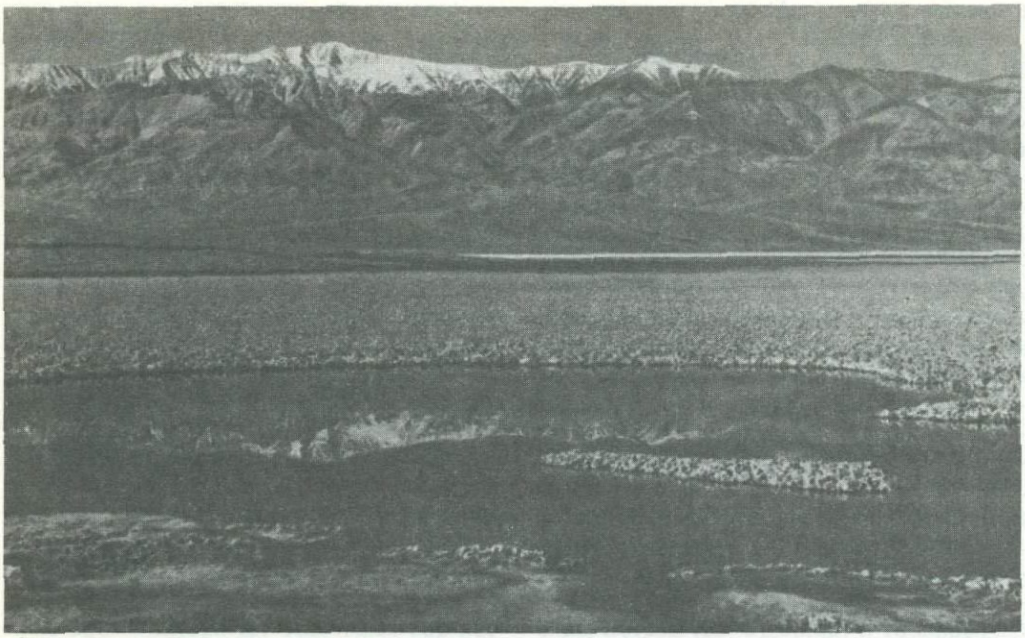


РИС. 17.40

Глыбовый рельеф восточной Калифорнии. Озеро Бед-Уотер («Плохая вода»), горько-соленый реликт бывшего пресноводного озера, располагается на 94,5 м ниже уровня моря в наиболее прогнутой части Долины Смерти. Почти плоский участок, занимающий среднюю часть снимка, сложен различными солями, осажденными при испарении минерализованной воды. На заднем плане – глыбовая гора Телескоп. (Фотография компании «Фрэшерз».)

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ

Хотя твердые горные породы обладают прочностью и жесткостью, все же они поддаются дроблению и пластическому течению. Среди факторов, определяющих поведение пород,– величина и скорость изменения напряжений, прочность пород на растяжение и сжатие, модуль и предел упругости пород, температура, всестороннее давление, тип горной породы и содержание воды. Во внешней части земной коры породы подвергаются хрупкому дроблению с образованием трещин и тектонических разрывов. На всех глубинах породы могут упруго деформироваться при напряжениях, не превышающих их предел упругости. На больших глубинах они испытывают пластическое течение в твердом состоянии и сминаются в складки.

Вертикальные – эпейрогенические – движения геологического прошлого проявляются в поднятии и изгибе морских и озерных террас, в том, что морские отложения, содержащие органические остатки, залегают теперь на больших высотах, в частности на Эвересте, и в том, что на колоннах храма Юпитера Сераписа имеются следы деятельности морских организмов. Среди других проявлений – опущенные дельтовые участки, погребенные долины, поднятые плато, непосредственно измеренные движения, происходящие ныне и происходившие в историческое время. Орогенические движения, возникающие при встречном перемещении плит, создают складчатые и покровно-складчатые горные хребты. В большинстве случаев

тектонические движения происходят медленно, но наблюдались и резкие подвижки по разрывам с амплитудой в несколько метров.

Положение деформированных слоев горных пород описывается их простиранием и падением.

Главные структуры пластической деформации – это моноклинальные наклоны и изгибы, флексуры, антиклинали, синклинали, купола, структурные впадины, складки уплотнения и сложные системы складок.

При деформации хрупких пород возникают трещины и разрывы. Практически все породы разбиты трещинами, образование которых связано главным образом с растяжением. В лавовых потоках и дайках отлично проявляется столбчатая отдельность; в крупных интрузивных массивах имеются трещины отдельности, возникшие под действием растяжения, сжатия и расширения (при снятии нагрузки).

Разрывы отличаются от трещин тем, что параллельно их поверхности происходит движение горных пород. Это движение может иметь любое направление вдоль плоскости разрыва. По характеру относительного смещения пород разрывы делятся на сбросы, взбросы, сдвиги. Кроме того, имеются разрывы с диагональным направлением движения, с поворотом блоков, с образованием рифтовых структур. По своей ориентировке разрывы могут быть вертикальными, горизонтальными или наклонными. Смещение может происходить по падению, по простиранию или косо. Во многих случаях на поверхностях разрывов видны зеркала скольжения, штрихи и бороздки, а между смещенными блоками обнаруживается тектоническая брекчия или тонкообломочная глинка трения.

С интенсивно деформированными складчатыми горными хребтами связаны крупные пологие надвиги и покровы (шарьяжи). Молодые крутые разрывы с большой амплитудой смещения пород служат причиной образования высоких сбросовых уступов на поверхности. Поднятый блок, ограниченный разрывами, называется горстом, прогиб между двумя разрывами – грабеном. Глыбовые структуры, образованные относительным смещением блоков горных пород по разрывам, преобладают в Провинции бассейнов и хребтов, в Рейнской области и в ряде других мест. Рифтовые долины Восточной Африки и озеро Байкал считаются проявлениями начальной стадии раздвижения (спрединга) земной коры.

ВОПРОСЫ

1. Деформация материала может происходить тремя способами. Назовите их и укажите роль каждого из них.
2. Какой из перечисленных вами видов деформации связан с непрерывным изменением вещества?
3. Какие виды наблюдений используются для установления характера тектонических движений и деформаций?
4. Укажите название и дайте определения для двух углов, измеряемых при установлении ориентировки той или иной плоскости (напластования, разрыва и т. д.) в пространстве.
5. Что может сказать нам изучение структур горных пород о природе сил, действующих внутри земной коры?
6. Перечислите наиболее распространенные виды структур, возникающих при деформации в горных породах, и расскажите о причинах их возникновения.
7. С какой скоростью развиваются различные типы деформации?
8. В гл. 4, 5, 7 и 8 понятие «структура» применялось для описания особенностей минералов и пород. Сравните использование этого термина в указанных главах с тем, как он употребляется в настоящей главе. В чем заключается различие в применении данного термина?

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Billings M. P., 1972, Structural Geology, 3d ed., Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs, N. J.

De Jong K. A., Scholten R., 1973, Gravity and Tectonics, John Wiley and Sons, Inc., New York. [Имеется перевод: *Де Джонг, К. А., Шолтен Р.*, Сила тяжести и тектоника. – М.: Мир, 1976.]

Dennis J. G., 1972, Structural Geology, The Ronald Press Company, New York.

Griggs D. T., Handin J. (eds.), 1960, Rock deformation – A symposium, Geol. Soc. Amer. Memoir 79.

Hobbs B. E., Means W. D., Williams P. F., 1976, An Outline of Structural Geology, John Wiley and Sons, Inc., New York.

Lahee F. H., 1961, Field Geology, 6th ed., McGraw-Hill Book Company, New York. [Имеется перевод: *Лахи Ф.*, Полевая геология. – М.: Мир, 1966.]

Spencer E. W., 1977, Introduction to the Structure of the Earth, 2d ed., McGraw-Hill Book Company, New York.



18 ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯ

Землетрясение – это, по сути дела, прохождение серии колебаний через породы Земли. Люди знали о землетрясениях и боялись их с древних времен, так как они стоят в ряду самых разрушительных явлений природы, угрожающих жизни и имуществу человека. Иногда землетрясения бывают даже более ужасающими, чем вулканические извержения, возможно, потому, что сейсмические толчки сотрясают поверхность Земли, которую большинство людей привыкли считать незыблемой.

Сейсмические волны, зародившись в земных недрах, расходятся во все стороны точно так же, как звуковая волна от взрыва распространяется в воздухе. Путь упругой волны меняется с изменением свойств вещества, через которое она проходит, а устойчивость колебаний пропорциональна их начальной энергии. Некоторые сейсмические волны обходят всю Землю или пересекают ее насквозь, другие же – более слабые – затухают на небольшом расстоянии. Интенсивные сейсмические волны, даже когда они, пройдя большой путь, ослабевают, можно обнаружить и записать с помощью соответствующего сейсмографа.

ПРИЧИНЫ И РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ

Земля представляет собой упругую среду, способную передавать упругие колебания внутри себя и по поверхности. Такие колебания возникают в любом возмущенном упругом веществе. Упругим называется такое вещество, которое можно деформировать, но которое возвращается к своей начальной форме, если действие деформирующих сил прекращается.

Первичная причина землетрясений связана с выделением тепла в недрах Земли. Более непосредственными причинами служат 1) образование тектонических разрывов, 2) вулканизм и 3) искусственное возбуждение и суммарное воздействие различных факторов. При возникновении тектонических разрывов происходит дробление и смещение прилегающих к разрыву пород. Как начальное дробление, так и последующее трение и брекчирование вдоль разрыва вызывают землетрясения. Дробление может быть связано с тремя главными видами движения в теле Земли: сжатием, растяжением и горизонтальными сколами. При детальном изучении района, нарушенного разрывами, в нем можно найти следы всех трех видов движений, но в крупном масштабе мы легко можем выделить на поверхности нашей планеты особые области, где какой-то один из этих трех видов движения преобладает.

РЕЖИМЫ

Режимы сжатия. Наиболее многочисленные и наиболее мощные землетрясения происходят вдоль побережий Тихого океана и приуроченных к нему островных дуг и океанических глубоководных желобов (рис. 18.1). Многие землетрясения возникают вдоль зон глубинных сколов, которые косо уходят вниз под материки и

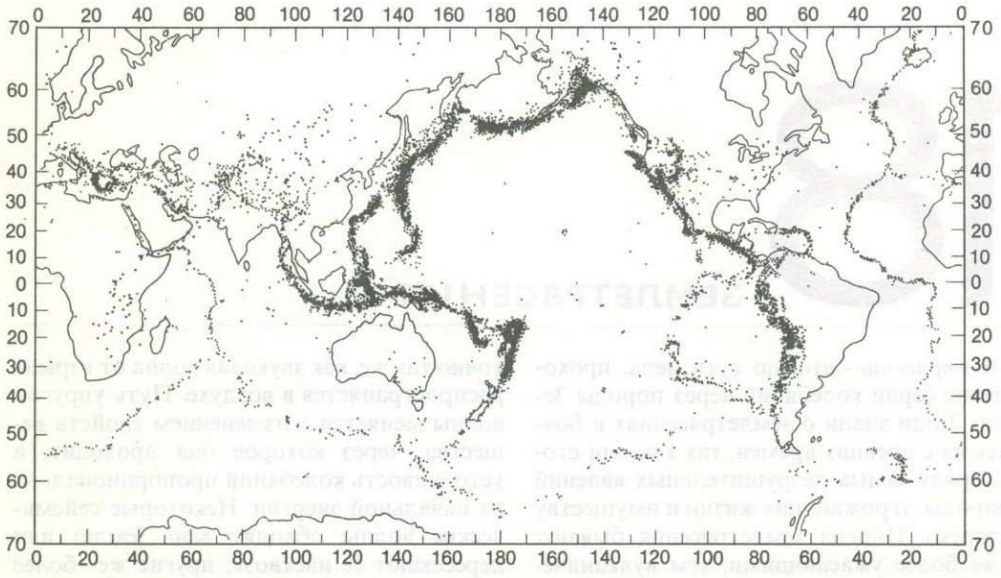


РИС. 18.1

Распределение землетрясений, 1961–1967 гг. Обратите внимание на их сгущение вдоль границ коровых плит: вокруг Тихого океана и вдоль срединно-океанических хребтов. Глубины от 0 до 700 км. (По М. Баразанги и Дж. Дорману: *M. Barazangi, J. Dorman,* World seismicity map of ESSA Coast and Geodetic Survey epicenter data for 1961–1967, Bull. Seism. Soc. Amer., vol. 369, 1969.)



РИС. 18.2

Разрез через район Курильских островов от Японского желоба до Азиатского материка. (По Б. Гутенбергу и Ч. Рихтеру: *B. Gutenberg, C. Richter*, Seismicity of the Earth, Princeton Univ. Press, 1949; по А. Н. Штралеру: *A. N. Strahler*, The Earth Sciences, 2d 2ed., Harper and Row, Publ., 1971.)

островные дуги (рис. 18.2). На кольцевой Тихоокеанский пояс приходится 80–90% *общего числа подземных толчков.*

Этот пояс протягивается на десятки тысяч километров вдоль полосы, где Тихоокеанская плита и несколько подчиненных плит медленно погружаются в зонах субдукции под континентальные окраины и островные дуги. В холодных хрупких погружающихся плитах в процессе их движения вниз от желобов неоднократно возникают разрывы, что вызывает многочисленные неглубокие (не глубже 60 км) землетрясения, более редкие толчки промежуточной глубины и все глубокие землетрясения (более 300 км), происходящие на нашей планете. То, что подземные толчки возникают вдоль некоторой наклонной плоскости, обнаружил В. Г. Беньофф. Именно это его открытие привело к возникновению понятия субдукции, и в его *честь зоны субдукции теперь обычно называют зонами Беньоффа.*

Возникновению глубоких землетрясений, вероятно, способствуют также искажение формы испытывающих субдукцию пород и уменьшение их объема на глубине под влиянием давления, что вызывает фазовые изменения минералов от менее плотных к более плотным (несмотря на их разогрев).

Режимы растяжения. Около 5% землетрясений, из которых все имеют неглубокое происхождение (объясните почему), происходят вдоль обширной системы подводных хребтов или поднятий и смещающих *их зон разрывов (см. ниже)* в Северном Ледовитом океане, в Атлантическом океане, в восточной и южной частях Тихого океана и в Индийском океане (рис. 18.1). Срединно-океанические хребты – это места подъема базальтовой магмы, которая периодически раскалывает океаническую кору и вызывает в системе хребтов образование продольных разрывов. Преобладают процессы расширения горных пород и растяжения. В срединно-океанических хребтах и начинается разрастание океанического дна, или спрединг.

Излияния больших объемов лавы в Исландии в историческое время и извержение вулкана Суртсэй в 1963 г. и вулкана Хельгафьедль в 1973 г. (все три вулканических очага «сидят» на северном отрезке Срединно-Атлантического хребта) сопровождались *множеством небольших* землетрясений. Такие же землетрясения происходят в определенных районах некоторых материков. Они обычно относятся к категории мелкофокусных и менее многочисленны, чем землетрясения, возникающие вдоль системы срединно-океанических хребтов. Участки сгущения разрывов, связанные с растяжением на континентах, будут рассмотрены более подробно позже.

Режимы горизонтальных сколов. Важное значение имеют те сейсмоактивные разрывы, которые Дж. Тузо Уилсон назвал

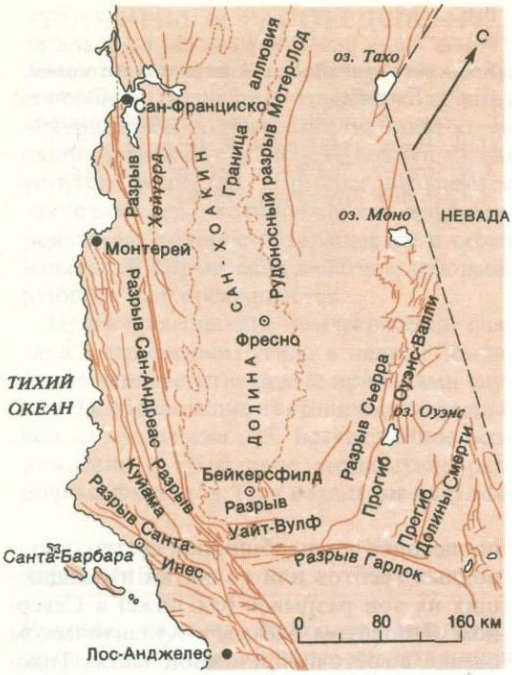


РИС. 18.3
Карта, на которой показан разрыв Сан-Андреас и некоторые другие разрывы в Калифорнии.

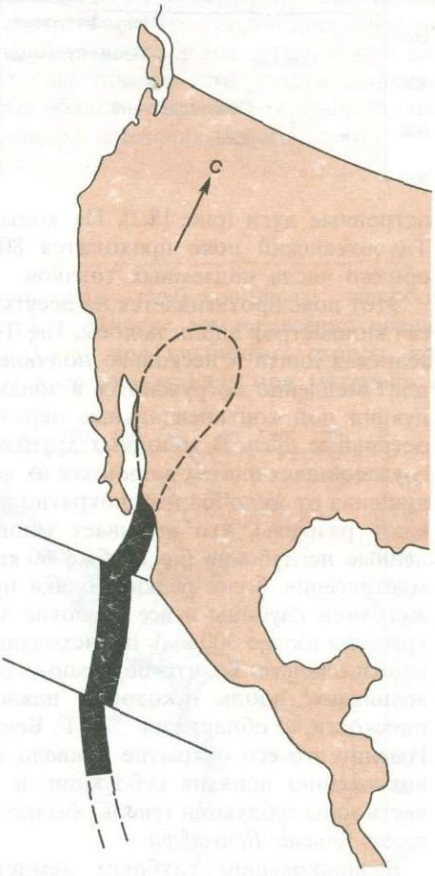


РИС. 18.4
Карта, на которой показано положение Восточно-Тихоокеанского поднятия – подводного хребта, от которого происходит спрединг океанического дна. Это поднятие упирается в территорию Мексики; его продолжение перекрыто надвинутой континентальной плитой в юго-западной части США. (По Менарду, 1964.)

трансформными разломами. В ходе спрединга они рассекают срединно-океанические хребты поперек и постепенно смещают участки морского дна на различные расстояния по латерали. По-видимому, Срединно-Атлантический хребет нарушен множеством таких коротких трансформных разломов.

Замечательным примером сейсмогенерирующего трансформного разрыва служит разлом Сан-Андреас в Калифорнии (рис. 18.3). Его связь со срединно-океаническим хребтом и спредингом океанического дна не столь очевидна, так как северный конец Восточно-Тихоокеанского поднятия упирается в территорию Мексики (рис. 18.4), а его северное продолжение, по-видимому, находится под движущейся на

запад Северо-Американской плитой. Общее смещение по разлому Сан-Андреас составляет по меньшей мере 290, а возможно, и 580 км.

Прямая связь некоторых землетрясений с известными разрывами надежно установлена в США, Японии и Китае. При нескольких мощных толчках по этим разрывам отмечались вертикальные или горизонтальные подвижки. Амплитуда смещения колебалась от 1 м и менее до нескольких десятков метров, а смещение прослеживалось по простиранию разрыва на сотни километров. Максимальное горизонтальное смещение по разрыву Сан-Андреас при Калифорнийском землетрясении 1906 г. достигало 7 м. Во многих других случаях смещений по разрывам непосредственно на поверхности не отмечалось, но можно предполагать, что все-таки они происходили.

Геологам известны тысячи разрывов, но только небольшое их число представляется в настоящее время активными источниками землетрясений; другие же неактивны, по крайней мере временно. Землетрясение в долине Сан-Фернандо (Калифорния) в феврале 1971 г. возникло в результате подвижки по боковому ответвлению крупной зоны разрывов Сьерра-Мадре (рис. 18.3). Участок, на котором произошел разрыв, ранее многими геологами считался неактивным.

Связь между землетрясениями и движением по разрывам находит объяснение в теории упругой отдачи, разработанной Г. Ф. Ридом (1910) и другими исследователями после изучения Калифорнийского землетрясения 1906 г. Согласно этой теории, блоки горных пород, залегающие по разные стороны разрыва, находясь в тесном контакте, способны накапливать упругую деформацию, постепенно меняя свою форму, пока не достигается их предел упругости. После этого происходит резкий скол, и значительная часть накопленной упругой энергии высвобождается в виде сейсмических волн. Блоки пород возвращаются к первоначальной форме, но они оказываются нарушенными и смещенными относительно друг друга по разные стороны возникшего разрыва.

Процесс упругой отдачи схематически показан на рис. 18.5. Точка О лежит на разрыве, точки А и В – на противоположных концах отрезка, пересекающего разрыв в точке О. На стадии 1, до того, как началось накопление деформации, отрезок АОВ представляет собой прямую. На стадии 2, когда деформация накопилась, а землетрясения еще не произошло, точки А и В смещены в противоположных направлениях, а линия АОВ становится изогнутой. Картина аналогична изгибу упругой стальной пластинки. На стадии 3, после землетрясения, точки, ранее примыкавшие к точке О, оказываются смещенными в положение О′ и О″, возникает скол, отрезки АО′ и О″В представляют собой прямые, и высвобождается энергия упругой деформации.

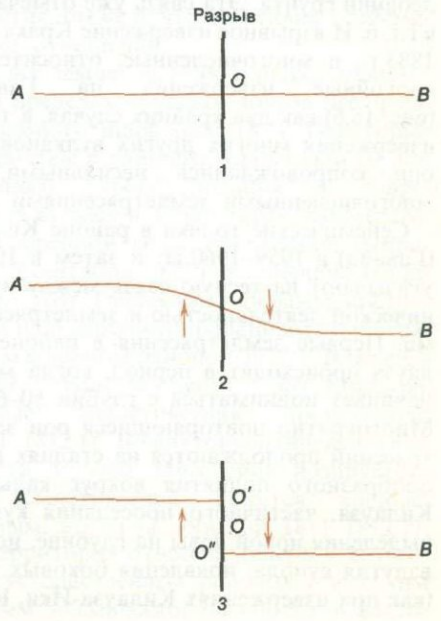


РИС. 18.5

Упругая отдача: *1* – до накопления упругой деформации; *2* – после накопления деформации, но до землетрясения; *3* – после землетрясения, когда энергия упругой деформации высвободилась. (По Риду, 1910.)



РИС. 18.6
Изменение частоты землетрясений на вулканическом острове Гавайи в период с января 1943 г. по сентябрь 1949 г. Среднее число землетрясений в месяц измерялось десятками и достигало максимального значения около 90. Неспокойная сейсмическая обстановка сохранялась и между извержениями. (По Макдоналду и Орру, 1950.)

Детальные геодезические измерения, выполненные за много лет до Калифорнийского землетрясения 1906 г. и сразу же после него, показали, что пункты на северо-восточном борту разрыва Сан-Андреас сместились на юго-восток на 1–2 м (амплитуда смещения зависела от близости к разрыву), а пункты на юго-западном борту – на северо-запад на 2–3 м. При последующих съемках обнаружилось, что дифференциальное смещение такого же характера продолжается и ныне путем ползучести – крипа при скорости до 4 см/год. В настоящее время эти движения тщательно изучаются.

Вулканизм. Вулканизм – причина многих локальных и преимущественно слабых колебаний грунта. Эта связь уже отмечалась в гл. 6. И взрывное извержение Кракатау в 1883 г., и многочисленные, относительно спокойные извержения на Гавайях (рис. 18.6) как два крайних случая, а также извержения многих других вулканов – все они сопровождались несильными, но многочисленными землетрясениями.

Сейсмические толчки в районе Килауэа (Гавайи) в 1959–1960 гг. и затем в 1977 г. указывают на тесную связь между вулканической деятельностью и землетрясениями. Первые землетрясения в районе Килауэа происходят в период, когда магма начинает подниматься с глубин 50–65 км. Многократно повторяющиеся рои землетрясений продолжаются на стадиях куполообразного поднятия вокруг кальдеры Килауэа, частичного проседания купола, выделения новой лавы на глубине, нового вздутия купола, появления боковых жерл (как при извержениях Килауэа-Ики, Капохо, Мауна-Улу) и проседания купола Килауэа.

Искусственно вызванные и другие землетрясения. В результате деятельности человека также могут происходить землетрясения, сила которых меняется от небольших колебаний грунта, связанных с движением машин и поездов, до заметных сотрясений при артиллерийских залпах, взрывах динамита и подземных ядерных испытаниях. В ряде случаев многочисленные слабые землетрясения вызывались нагрузкой воды при наполнении водохранилищ, например озера Мид, подпруженного плотиной Гувер.

Закачка воды, зараженной радиоактивными отходами, в глубокие скважины, пробуренные для этой цели в 1962–1970 гг. близ военного завода «Роки-Маунтин» (в районе Денвера, шт. Колорадо), вызвала более 700 небольших землетрясений, происходивших вокруг скважин. Возросшее давление флюидов у забоя скважин облегчало, по-видимому, подвижки по трещинам в местных сильно трещиноватых породах. Частота землетрясений хорошо соответствовала объему и давлению закачиваемой воды. Когда закачку воды остановили, колебание земли прекратилось. Этот опыт в шт. Колорадо позволил выдвинуть предположение о том, что с помощью искусственно вызванных землетрясений можно ослабить упругие деформации вдоль активных разрывов, способствуя развитию смещений по ним, и тем самым уменьшить опасность очень мощного толчка.

В областях развития дельт также происходят небольшие землетрясения, свя-

занные с увеличением нагрузки на земную кору при накоплении большого количества осадков. Землетрясения отмечаются и в областях недавнего материкового оледенения, вероятно, потому, что снятие нагрузки ледникового покрова приводит к вертикальному поднятию таких областей.

Исходная причина. Субдукция, развитие срединно-океанических хребтов, образование трансформных разломов и вулканизм – это, по-видимому, наиболее важные непосредственные причины землетрясений, но первичная причина кроется в более глубоких недрах Земли. Развитие океанических хребтов, вулканизм, спрединг океанического дна и, в конечном счете, субдукция океанической плиты происходят под воздействием тепла. Возникновение отдельных разрывов можно считать просто побочным проявлением этого воздействия.

Неоднородное накопление тепла под земной корой может, вероятно, быть причиной несильных местных толчков. Разумно предположить, что тепловые неоднородности должны приводить к какой-то перестройке в недрах планеты, поскольку тепло, как и фазовые изменения минералов, происходящие при высоком давлении, вызывает непосредственное изменение объема. Изменение же объема – будь то расширение или сжатие – почти определенно должно приводить к подвижкам, которые могут сопровождаться образованием разрывов. Некоторые сейсмологи считают, что глубокофокусные землетрясения частично обусловлены изменением объема при перекристаллизации под возросшим давлением без образования каких-либо разрывов.

Географическое распределение. Хотя сейсмические волны проходят через всю Землю, возникают они только в определенных местах. Большинство их очагов приурочено к двум главным поясам (рис. 18.1): 1) Циркумтихоокеанскому поясу, который протягивается от Чили к Центральной Америке, образует петлю в Карибско-Антильской области, проходит через Мексику, Калифорнию, острова Королевы Шарлотты и Алеутские, через островные дуги – Камчатскую, Японскую, Курильскую, Бонин, Марианскую и Палау, через Филиппины, Индонезию и Новую Зеландию, и 2) Альпийскому Средиземноморско – Трансазиатскому поясу, который включает районы Северной Африки, Испании, Италии, Югославии, Греции, Турции, Ирана, северной Индии, Бирмы и Китая. То обстоятельство, что эти два пояса Земли совпадают как с поясами вулканизма, так и с молодыми горными системами, позволяет предположить, что оба пояса связаны с одной общей причиной – движением плит коры.

Помимо тех землетрясений, которые возникают на окраинах плит и в вулканических поясах, сейсмические толчки отмечаются в зонах разрывов Восточной Африки и Восточной Сибири. Возможно, в этих областях зарождаются новые центры спрединга. В отличие от районов, расположенных вдоль границ плит, внутренние области геологически древних континентальных платформ и щитов – восточная часть средней Канады, Бразилия, Скандинавия, часть территории Сибири, бóльшая часть территории Африки, южная Индия и западная Австралия – сравнительно асейсмичны; исключение составляют лишь зоны разрывов. Центральная часть Тихоокеанского бассейна, кроме Гавайских островов, зон трансформных разрывов и гористого Восточно-Тихоокеанского поднятия, также почти неактивна в сейсмическом отношении.

Не все землетрясения, однако, происходят в пределах крупных поясов деформации земного шара (рис. 18.1). Некоторые приурочены к районам, удаленным от зон недавнего горообразования и современных вулканов. Одно такое землетрясение умеренной силы произошло, например, 15 сентября 1972 г. в северном Иллинойсе. Этот толчок был первым инструментально зарегистрированным землетрясением в данном районе с 1912 г. Южнее, в районе Нью-Мадрида, шт. Миссури, сильные землетрясения происходили в 1811–1812 гг. Во внутриконтинентальной области долины Миссисипи возникновение землетрясений кажется маловероятным, но из-за событий 1811–1812 гг. эта территория отнесена теперь к категории густонаселенных районов с высоким уровнем сейсмической опасности. К восто-

ку от Миссисипи, по данным Геологической службы США, начиная с 1700 г. было отмечено свыше тысячи землетрясений, большинство из которых не имело каких-либо значительных последствий. Наиболее примечательным было землетрясение 1886 г. в Чарлстоне, шт. Южная Каролина.

ЧАСТОТА ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ

В среднем в год происходит около 15–20 *сильных и разрушительных землетрясений*, но сравнительно безвредных, небольших толчков в год бывает до миллиона. В это число входит множество слабых толчков, связанных с вулканической деятельностью, например тех, которые отмечаются на Гавайских островах (рис. 18.6). Небольшие землетрясения настолько многочисленны, что чуть ли не каждую минуту *где-то на Земле происходят сотрясения*. Можно сказать, что Земля находится в *состоянии постоянной дрожи*. Перестройка земной коры и более глубоких оболочек идет почти непрерывно, поэтому землетрясения – обычное и частое явление. Многие из них так слабы, что не заслуживают внимания.

ПОВТОРЯЕМОСТЬ И ПРОГНОЗ

Землетрясения повторяются в одних и тех же местах, но, очевидно, не подчиняются какой-либо закономерности. В северной части разрыва Сан-Андреас упругая деформация накапливается с 1906 г., а на южном отрезке – с 1857 г. До сих пор это приводило к малозначительным эпизодам локального сбрасывания напряжений и медленному крипу вдоль разрыва. Некоторые геологи из Геологической службы США считают, что в ближайшем будущем в данной области должно произойти сильное землетрясение.

Предпринимались попытки найти «*спусковой механизм*» *землетрясений*, и эта роль приписывалась фазам Луны, *высоким приливам*, *сильным ливням*, *резкому* изменению атмосферного давления и *особенно влиянию других землетрясений*, происходящих где-то поблизости. Сейсмологи, однако, считают, что такие поиски коррелятивных связей имеют сомнительную ценность.

Стремясь получить сведения для надежного предсказания землетрясений, геологи и геофизики используют ряд приборов, таких, как деформографы, наклономеры, гравиметры, лазерные устройства и магнитометры. Среди объектов исследования – местные изменения магнитного поля Земли, электропроводность, временное изменение скорости сейсмических волн, первые вступления сейсмических колебаний, геодезические данные, аномалии наклона земной поверхности, флуктуации уровня воды в скважинах, содержание радона в грунтовых водах, аномальное поведение животных и длительная сейсмическая история. Например, за 10 ч до небольшого толчка на разрыве Сан-Андреас магнитометры зарегистрировали местное *изменение геомагнитного поля*.

Исследования по прогнозу землетрясе*ний проводятся в настоящее время в* Калифорнии, СССР, Японии и Китае. В США было успешно предсказано – без точного указания времени – несколько слабых землетрясений. Сообщалось о точном предсказании двух сильных землетрясений в Китае (в феврале 1975 г. и в мае 1976 г.), но предупреждение о землетрясении, ожидавшемся в июле 1976 г., не было опубликовано заранее, и этот толчок имел катастрофические последствия.

Участок, расположенный вдоль разрыва Сан-Андреас севернее Лос-Анджелеса, известный как поднятие Палмдейл, привлекает особое внимание подразделений Геологической службы США, изучающих землетрясения. Этот участок длиной 190 км и площадью 12 тыс. км^2 испытывает вертикальные движения, отмечаемые при всех геодезических съемках после 1897 г. За период с 1959 по 1974 г. земная поверхность поднялась близ Палмдейла на 5,5 см, а затем опустилась примерно на половину этой величины. Поднятие Палмдейл представляет собой центр гораздо более обширной неспокойной области, простирающейся от Бейкерсфилда до Лос-Анджелеса и от Тихого океана до границы между шт. Калифорния и Аризона. Нынешние опасения усугубляются тем, что, как было выяснено, землетрясению 1971 г. в долине Сан-Фернандо предшествовало небольшое поднятие.

В настоящее время в Калифорнии есть специальная комиссия – Совет по оценке прогноза землетрясений – из девяти членов (сейсмологов, геофизиков и геологов), которые должны давать заключение о надежности будущих прогнозов. Прежде то и дело возникали всевозможные дикие слухи; например, в 1969 г. прошел слух, что Калифорния вот-вот обрушится в Тихий океан. В 1976 г. была начата государственная регистрация прогнозов с помощью ЭВМ.

ПОСЛЕДСТВИЯ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ

Различные виды воздействия, оказываемого землетрясениями, можно разбить на две категории (табл. 18.1): повреждение построек (рис. 18.7–18.9) и эффекты геологического характера (рис. 18.10). Из всего разнообразия геологических последствий, перечисленных в табл. 18.1, подавляющее преимущество имеют процессы гравитационного перемещения материала: оползни, обвалы, лавины и т. д. Помимо своей разрушительной силы землетрясения примечательны еще и тем, что они связаны с выделением гигантской энергии. С точки зрения геологической науки землетрясения имеют важное значение как источник ценных сведений о строении внутренних зон Земли (гл. 19).

ИНТЕНСИВНОСТЬ

Интенсивность (сила) землетрясения определяется по его воздействию на людей, по степени повреждения зданий и других построек и по изменениям, которые подземный толчок производит в горных породах и в почвенном слое на земной поверхности. Для таких оценок используется шкала интенсивности землетрясений, разработанная Меркалли и модифицированная в 1931 г. Вудом и Нойманом (табл. 18.2)[1]. Эта шкала разбита на ступени (баллы) от I до XII в порядке интенсивности. Применение шкалы включает комплексный учет данных о реакции людей, о строительных стандартах, о качестве строительных материалов (от саманных хижин до железобетона) и об уровне культуры. Оценка интенсивности может меняться не только от места к месту, но и внутри одного населенного пункта вследствие различной прочности основания построек и разных способов строительства. Степень повреждений, производимых землетрясением, зависит также от особенностей поверхности грунта, от размера и формы построек, от их конструкции, качества кладки и строительных материалов. Важное значение имеют и характеристики сейсмических

[1] Используемый в СССР и других странах Восточной Европы вариант 12-балльной сейсмической шкалы (разработанный в 1960-х годах учеными социалистических стран) в главных своих частях не отличается от модифицированной шкалы Меркалли, но полнее учитывает региональные особенности проявления землетрясений. – *Прим. перев.*

Таблица 18.1

Последствия землетрясений

Повреждение построек
Трескаются, рассыпаются или опрокидываются дымовые трубы
Трескаются стены; сырцовые и другие кирпичные стены теряют прочность и падают
Обрушиваются крыши
Падают выступающие части зданий (карнизы, парапеты)
Падают внутренние полки и шкафы, содержимое вываливается
Здания раскалываются на части и падают
Падают и разрушаются водонапорные башни и нефтехранилища
Обрушиваются мосты, колонны и эстакады
Становятся неровными, изгибаются и разрушаются шоссейные и железные дороги
Рвутся телефонные провода и кабели; выходят из строя линии электропередач
Начинаются пожары
Разрываются водопроводные трубы, нефте- и газопроводы, трубы канализационной системы
Геологические последствия
На грунте появляются трещины, иногда зияющие
Возникают воздушные, водяные, грязевые или песчаные фонтаны; при этом образуются скопления глины или груды песка
Прекращают или изменяют свое действие некоторые родники и гейзеры; возникают новые
Грунтовые воды становятся мутными (взбаламучиваются)
Возникают оползни, грязевые и обломочные потоки, обвалы; происходит разжижение почвы и песчано-глинистых пород
Происходит подводное оползание и образуются мутьевые (турбидитные) потоки
Обрушиваются береговые утесы, берега рек, насыпные участки
Возникают сейсмические морские волны (цунами)
Срываются снежные лавины; от шельфовых ледников отрываются айсберги
Образуются зоны нарушений рифтового характера с внутренними грядами и подпруженными озерами
Грунт становится неровным с участками просадки и вспучивания
На озерах возникают сейши (стоячие волны и взбалтывание волн у берегов); нарушается режим приливов и отливов
Активизируются вулканические явления (?)



РИС. 18.7
Повреждение торговых помещений (нижний этаж) и общественного зала собраний (верхний этаж здания) в результате землетрясения в районе Бейкерсфилда, шт. Калифорния, 21 июля 1952 г. (Фотография Национального ведомства США по океанам и атмосфере.)

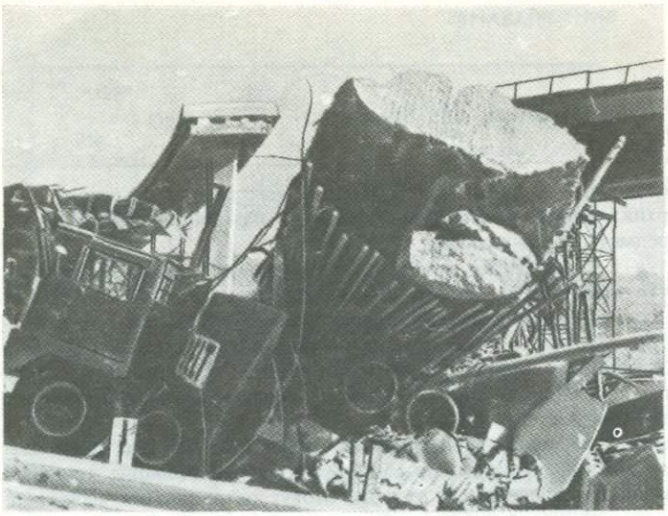


РИС. 18.8

Разрушенный пролет эстакады Голден-Стейт, упавший при землетрясении Сан-Фернандо (Калифорния) 9 февраля 1971 г. На переднем плане — автокран, раздавленный при падении 50-метровой бетонной опоры эстакады. (Фотография Дж. Р. Ивенса, Управление горных работ и геологии шт. Калифорния.)



РИС. 18.9

Трещина в аллювиальных отложениях, возникшая при землетрясении 21 июля 1952 г. в районе Арвина, шт. Калифорния. Дом был сдвинут с фундамента и поврежден.(Фотография Управления горных работ и геологии шт. Калифорния.)

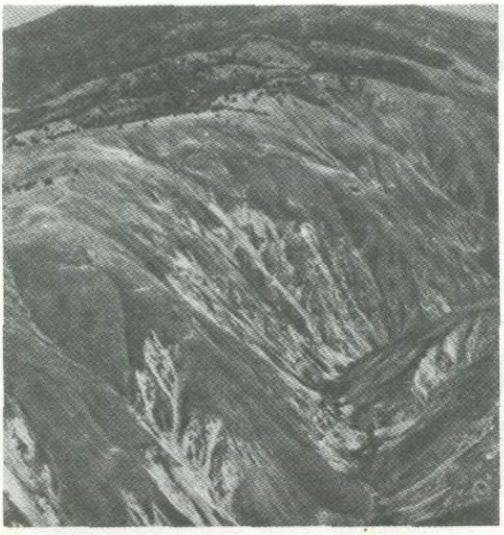


РИС. 18.10

Следы оползней в каньоне Сикамор, округ Кент, Калифорния, возникших при землетрясении 21 июля 1952 г. Зона разрыва Уайт-Вулф, вдоль которой произошла подвижка, возбудившая землетрясение, располагается в нескольких сотнях метров слева (т. е. на северо-запад) от каньона. (Фотография Р. К. Фрамптона.)

Таблица 18.2

Сокращенный вариант шкалы Вуда–Ноймана для оценки интенсивности землетрясений

I.	Ощущается только очень немногими людьми при благоприятных обстоятельствах
II.	Ощущается только на верхних этажах немногими людьми, находящимися в покое. Некоторые подвешенные предметы покачиваются
III.	Вполне отчетливо ощущается в помещении, особенно на верхних этажах, но многие люди еще не понимают, что происходит землетрясение; стоящие автомобили иногда покачиваются. Ощущаются сотрясения, как от проходящего мимо грузовика
IV.	Днем ощущается в помещении многими, а вне помещения – немногими людьми. Ночью некоторые просыпаются. Сдвигается с места посуда, открываются и закрываются окна и двери; трещат стены. Стоящие машины иногда заметно подскакивают. Впечатление, будто тяжелый грузовик ударился в стену дома
V.	Ощущается почти всеми, многие их спящих просыпаются. Некоторые хрупкие предметы трескаются, неустойчивые предметы опрокидываются. Образуются небольшие трещины в штукатурке. Заметно раскачиваются деревья и столбы. Могут остановиться маятниковые часы
VI.	Ощущается всеми; многие в испуге выбегают из домов. Небольшие повреждения в домах. Сдвигается тяжелая мебель. Обваливается штукатурка
VII.	Почти все выбегают из домов. В хорошо построенных обычных зданиях повреждения небольшие и умеренные, в зданиях прочной конструкции – незначительные, в плохо построенных – значительные. Некоторые дымовые трубы разрушаются. Замечается людьми, ведущими автомашины
VIII.	В зданиях хорошей постройки повреждения небольшие, в обычных прочных зданиях – значительные с частичным обрушением, в плохо построенных – очень сильные. Панельные стены отрываются от каркаса. Падают дымовые трубы, памятники, фабричные трубы. Опрокидывается тяжелая мебель. Выбросы песка и грязи. Изменяется уровень воды в колодцах. Люди, ведущие машины, чувствуют сотрясения
IX.	Значительные повреждения даже в зданиях хорошей конструкции. Каркасные постройки перекашиваются. Прочные здания из обычных материалов сильно повреждаются, сдвигаются с фундамента, частично обрушиваются. Хорошо идны трещины в грунте. Разрывы подземных трубопроводов
X.	Разрушаются деревянные сооружения хорошей постройки, большинство каменных и каркасных строений разрушается или сбрасывается с фундамента. Искривляются железнодорожные рельсы. Грунт изборожден трещинами. Оползни с крутых склонов и речных берегов. Вода выплескивается из ведер и из рек
XI.	Не обрушиваются только единичные каменные строения. Мосты разрушаются. Подземные трубопроводы полностью выходят из строя. Сильно искривляются рельсы. В грунте широкие трещины. Обвалы и крупные оползни в слабых грунтах
XII.	Полное разрушение. Волны на поверхности грунта. Видимые изменения в ландшафте. Предметы подбрасываются в воздух

волн, такие, как ускорение, период, скорость и продолжительность (эти вопросы будут рассмотрены позже).

Интенсивность каждого отдельного землетрясения в разных пунктах оценивается опытными специалистами-сейсмологами на основе полевых наблюдений и путем анализа рассылаемых по почте вопросников. Величины интенсивности, определенные в каждом пункте, наносятся на карту, и по ним проводятся затем *изосейсты* – линии, разделяющие участки с разной интенсивностью (рис. 18.11). На карте изосейст показан район наибольших разрушений, окруженный более или менее концентрическими поясами постепенно ослабляющегося воздействия. Главная ценность карты состоит в том, что она привлекает внимание к районам с плохими грунтами основания и к ме-

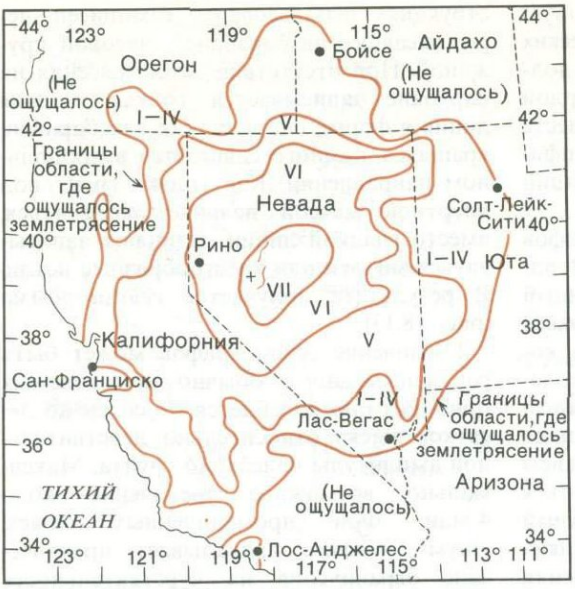


РИС. 18.11
Карта изосейст землетрясения, происшедшего 16 декабря 1954 г. в западной части средней Невады. Землетрясение ощущалось на площади около 520 тыс. км^2 в пяти штатах. Район максимальной интенсивности (отмечен крестиком) располагался вблизи очага, в котором вертикальное смещение по разрыву достигало 6 м, а горизонтальное – 4 м. (По материалам Национального ведомства США по океанам и атмосфере.)

стам с недостаточно прочными постройками. Лучшее планирование землепользования и более высокое качество построек, даже из сырцового кирпича, могут уменьшить разрушительное воздействие будущих землетрясений.

НАУЧНОЕ ИЗУЧЕНИЕ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ

Сейсмографы. Приборы, используемые для записи землетрясений, называются сейсмографами. Первый такой прибор был изготовлен в Китае во втором веке нашей эры. Несколько остроумных конструкций было предложено в Западной Европе в XVIII и начале XIX в., но действительно эффективные записывающие приборы были изобретены только 50–100 лет назад, а в последние десятилетия они были значительно усовершенствованы.

Сейсмограф представляет собой просто

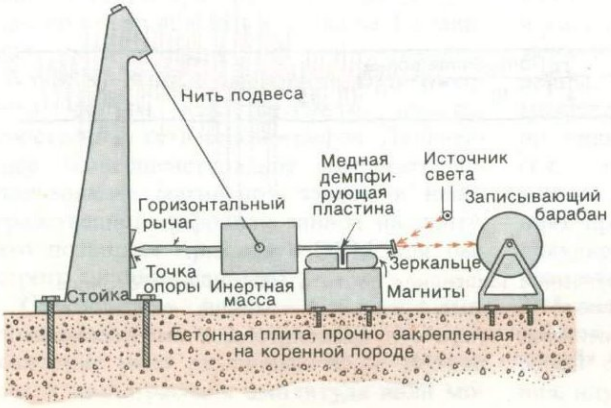


РИС. 18.12
Схема устройства сейсмографа с горизонтальным маятником. Подвеска инертной массы напоминает подвеску качающейся в обе стороны двери и может двигаться горизонтально вместе с грунтом. Движения маятника демпфируются магнитом, маятник возвращается в начальное положение под действием силы тяжести. Колебания зеркальца, прикрепленного на конце рычага, записываются фотографически на вращающемся барабане. В этой схеме возможны различные изменения и приспособления.

колебательную систему, предназначенную для измерения и записи сейсмических движений. Колеблющийся элемент должен быть прочно прикреплен к твердой породе, так чтобы он двигался вместе с грунтом. Обычно этот элемент демпфируется (т.е. амплитуда его колебаний ограничивается и гасится).

Конструкции разных сейсмографов в значительной мере различаются. В одних используется маятник, закрепленный горизонтально, так что инертная масса может качаться как подвешенная на косой веревке дверь. Такой маятник колеблется горизонтально в фиксированном направлении: с севера на юг или с запада на восток (рис. 18.12), но под действием силы тяжести он стремится вернуться в первоначальное положение. Обратный маятник, установленный на пружинках вертикально, используется для измерения вертикальных колебаний. Поскольку инертная масса маятника может быть очень тяжелой или очень легкой, демпфированной или недемпфированной, период собственных колебаний маятника, чувствительность и увеличение в таких приборах могут меняться в очень широких пределах.

В записывающем устройстве используются механические, оптические, электромагнитные элементы или их комбинации. Их назначение – передать колебания на тепло- или светочувствительную бумагу, намотанную на вращающийся барабан, который приводится в движение синхронным мотором. В ранних конструкциях использовался самописец – перо, писавшее на барабане с часовой пружиной. При отсутствии землетрясения на барабане записывается тонкая гладкая линия в форме спирали, так как барабан, вращаясь, немного сдвигается в продольном направлении. Как только грунт под инертной массой начинает колебаться, вместо гладкой линии начинают записываться зигзаги или крестообразные петли. В результате получается *сейсмограмма* (рис. 18.13).

Увеличение сейсмографов может быть различным, но в обычно применяемых приборах оно колеблется от сотен до десятков тысяч относительно действительной амплитуды колебаний грунта. Максимально возможное увеличение – около 4 млн. Фон промышленных помех, «шум», обычно накладывает практические ограничения на чувствительность сейсмографов, не позволяя давать увеличение более чем в 100 тыс. раз.

Очень важна точная, до долей секунды, регистрация времени; поэтому на сейсмографах записываются также сигналы времени, передаваемые, например, по радио из обсерватории Военно-морского флота США.

Универсальных сейсмографов не существует. В зависимости от надобности и места установки используются разные приборы. Например, акселерометры – измерители сильных движений – включаются только при колебаниях, имеющих большую (заданную заранее) амплитуду. Они действуют после включения только

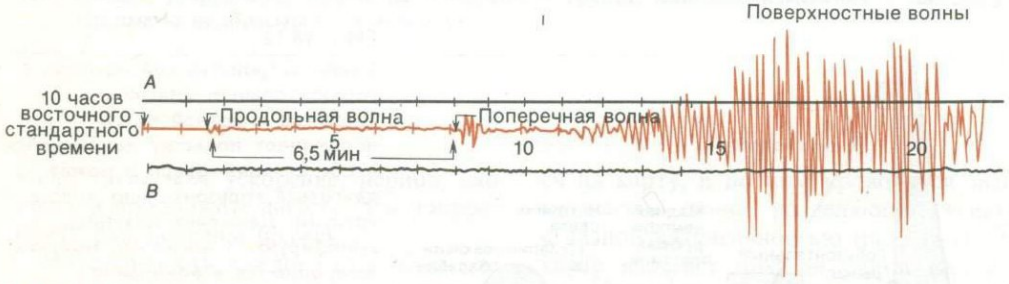


РИС. 18.13

Сейсмограмма (цветная линия) землетрясения, записанная почти в 5000 км от его очага. Верхняя линия A показывает спокойное состояние за 1 ч до землетрясения, нижняя B – запись незначительных колебаний, все еще продолжавшихся спустя 1 ч после главного толчка. (По материалам издательства «Гарвард юниверсити пресс».)

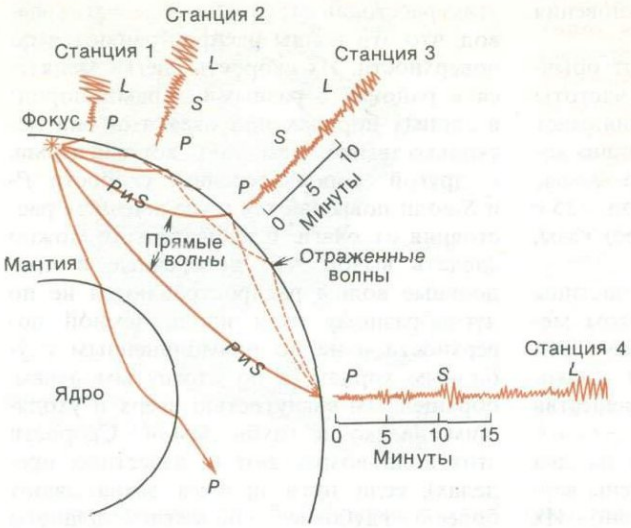


РИС. 18.14
Разрез через сегмент Земли, на котором показаны пути распространения некоторых из множества сейсмических волн и записи, которые они оставляют на сейсмограммах четырех станций. Обратите внимание на различие между прямыми и отраженными волнами. (По Гиллули: *Gilluly*, 1963.)

определенное время, около 60–70 с, если только сильные колебания не продлятся дольше. Назначение этих приборов – дать запись колебаний в области сильного землетрясения, так как другие, более «нежные», сейсмографы, как правило, выходят из строя после первого же мощного толчка.

В последние годы аппаратура меняется очень быстро. Чувствительные лазерные приборы, устанавливаемые в брошенных туннелях, представляют собой чрезвычайно сложные системы. Лазерные устройства закрепляются также на противоположных сторонах крупных зон разрывов с тем, чтобы обнаружить малейший крип или подвижку. Среди других разработок – установка сетей стандартизированных сейсмографов, таких, как созданная под эгидой США и Канады Всемирная сеть стандартных сейсмографов (WWSSN). В шт. Калифорния, подверженном частым землетрясениям, имеется собственная сеть сейсмографов. Дальнейшее усовершенствование включает использование магнитной записи и непосредственной цифровой записи на ленту, что позволяет применять ЭВМ для быстрого анализа данных.

Сейсмические волны. Сейсмограммы показывают, что землетрясение – это прохождение ряда различных волн. Вблизи очага землетрясения амплитуда волн может быть большой, но с удалением она настолько ослабевает, что для регистрации волн требуется их усиление. В Эль-Сентро, шт. Калифорния, при землетрясении Империал-Валли, происшедшем 18 мая 1940 г., максимальные записанные горизонтальные колебания имели амплитуду около 37 см и продолжались несколько меньше 3,5 с, а максимальные вертикальные движения составили 10 см и продолжались 2,5 с, что представляет собой исключительно большой размах колебаний.

Характер колебаний, записываемых на сейсмографах (рис. 18.14), показывает, что сейсмические волны делятся на три главных типа. 1) *P*-волны (т. е. первичные – primary) – *продольные* волны; передаются переменным увеличением и уменьшением объема, сжатием и разрежением в направлении распространения волны. Пример такого типа движения можно показать на действии популярной пружинной игрушки «ползун». 2) *S*-волны (т. е. вторичные – secondary) – *поперечные* волны; движение частиц в этих колебаниях происходит в направлении, перпендикулярном пути волны, как на веревке, которую вздергивают с одного конца. 3) *L*-волны (т. е. длинные – long) – *поверхностные* волны, которые представляют собой сложные синусоидальные колебания, идущие вдоль или около земной по-

верхности. Глубина проникновения *L*-волн зависит от их частоты.

Продольные волны напоминают обычные звуковые волны, но их частоты много ниже тех, которые воспринимает слух. В большинстве таких волн одно колебание происходит за 2–3 с, а самые длинные волны имеют период 25 с и больше. *P*-волны проходят через газы, жидкости и твердые тела.

Поперечные волны сдвигают частицы твердого вещества Земли, при этом меняется только форма, но не объем. Эти волны не проходят через газы и жидкости, так как только твердые вещества обладают прочностью на сдвиг.

Поверхностные волны делятся на два вида: в одних колебания направлены вертикально, в других – горизонтально. Их периоды колеблются, как правило, от нескольких секунд до нескольких минут, но у некоторых волн период во много раз длиннее.

P-волны распространяются со скоростью от 5,0 до 13,8 км/с, возрастающей с глубиной, скорость *S*-волн равна 3,2–7,3 км/с, а скорость *L*-волн 2,0–4,5 км/с. Из-за различия скоростей и из-за того, что волны этих трех типов идут по разным путям, они приходят к сейсмической станции в разное время. На записи единичного землетрясения, возникшего на удалении от 1600 до 11 000 км, видны три серии сигналов, вполне различимые по времени (рис. 18.13, 18.14). В случае если происходит такое землетрясение, сейсмограф на станции вначале отметит время прибытия быстрой *P*-волны, затем приход более медленной *S*-волны и, наконец, приход *L*-волны, огибающей Землю по поверхности. Поскольку интервал между временами прихода *P*- и *S*-волн возрастает в зависимости от пройденного расстояния, величина этой задержки («*S* минус *P*») используется для расчета расстояния до источника волн (очага, или фокуса, землетрясения; см. рис. 18.13, 18.14). Сопоставляя времена пробега различных волн с расстояниями до очагов землетрясений, измеренными вдоль поверхности Земли, мы находим, что времена пробега *L*-волн почти точно прямо пропорциональны этим расстояниям; отсюда и делается вывод, что эти волны распространяются по поверхности. Их скорость слегка меняется в районах с разными типами пород; в горных породах под океанами она несколько выше, чем под континентами. С другой стороны, средние скорости *P*- и *S*-волн повышаются с увеличением расстояния от очага. Следовательно, можно сделать вывод, что поперечные и продольные волны распространяются не по дугообразному пути вдоль земной поверхности и не по прямолинейным глубинным хордам, а по изогнутым лучам, обращенным вогнутостью вверх и уходящим далеко в глубь Земли. Скорости этих волн возрастают (в известных пределах), если пути пробега захватывают более глубокие области планеты (рис. 18.14). С расстоянием поверхностные волны ослабевают, затухают. Сейсмограммы показывают, что путь волн внутри Земли сильно осложнен отражением, преломлением, дифракцией, дисперсией, что и создает на сейсмограммах очень сложную картину колебаний.

Фокус (очаг) и эпицентр. Точка возникновения землетрясения – это его фокус, или очаг (гипоцентр), а точка на поверхности, расположенная непосредственно над фокусом, – эпицентр землетрясения. По глубине фокуса землетрясения делятся на три категории: 1) неглубокие, мелкофокусные, или нормальные, с глубиной до 60 км от земной поверхности; 2) промежуточные с глубиной от 60 до 300 км; 3) глубокие, или глубокофокусные, с глубиной от 300 до 720 км; последнее значение – максимальная известная глубина. Почти все глубокофокусные землетрясения возникают в зонах субдукции, связанных с островными дугами, глубоководными желобами или с системами граница континента – желоб в Тихом океане. Поскольку сила (интенсивность) землетрясения затухает обратно пропорционально квадрату расстояния от очага, глубину фокуса можно рассчитать по записям интенсивности, сделанным в разных местах. По меньшей мере 80% всех землетрясений относятся к типу мелкофокусных. Глубина фокуса большинства из них менее 8 км.



РИС. 18.15

Карта, иллюстрирующая метод определения эпицентра землетрясения по трем *окружностям. Радиусы окружностей* вычисляются по сейсмограммам, полученным на трех станциях. Расстояния между источником сейсмических волн и принимающими станциями в Сан-Франциско, Сент-Луисе и Вашингтоне устанавливаются по промежуткам времени между приходом продольных (*P*) и поперечных (*S*) волн. Вокруг каждой станции проводят (желательно на глобусе) окружности с радиусами, равными вычисленным расстояниям, и по пересечению этих окружностей находят положение эпицентра (в данном случае у побережья Нижней Калифорнии).

Существование глубокофокусных землетрясений было обнаружено по раннему *приходу P-волн на противоположную* сторону Земли и по расхождениям во временах прихода *P*- и *S*-волн, в результате чего при вычислении эпицентральных расстояний появлялись неувязки, достигавшие сотен километров. Слабое проявление или отсутствие *L*-волн также указывают на большую глубину очага землетрясения. Волны от глубокофокусного источника колебаний идут не только прямо через Землю, но и к поверхности; отражаясь от нее, волны приходят затем к принимающей станции. Лишнее время (от нескольких секунд примерно до минуты), необходимое для пробега волны от очага до поверхности и обратно, может служить для измерения глубины фокуса. Возникновение землетрясений на больших глубинах показывает, что либо залегающие там породы весьма жесткие, могут испытывать упругую деформацию и последующий разрыв, либо там происходит перекристаллизация пород с образованием минералов, имеющих большую плотность.

Далекие эпицентры. Географическое положение отдаленных эпицентров можно определить методом трех точек (методом пересечений). Прежде всего на трех станциях по разности времен прихода продольных и поперечных волн вычисляются эпицентральные расстояния, затем вокруг каждой станции проводятся окружности (желательно на глобусе) с радиусами, соответствующими вычисленным расстояниям. Точка, в которой эти три окружности пересекаются, указывает место эпицентра (рис. 18.15).

Направление на источник можно найти и по одной станции, если запись достаточно ясная, чтобы на ней можно было увидеть первый импульс сжатия или растяжения от первой *P*-волны. Это направление, а также эпицентральное расстояние, получаемое по разности времен прихода продольной и поперечной волн («*S* минус *P*»), позволяют определить по меньшей мере приблизительно положение эпицентра.

Шкала магнитуд. Действительная энергия землетрясения, выделяющаяся в его очаге, оценивается по стандартной шкале магнитуд, предложенной Ч. Рихтером в 1935 г. Эта шкала основана на измерении максимальной амплитуды колебаний, записанных на сейсмограмме с помощью стандартного сейсмографа (имеющего определенный период свободных колебаний, определенное увеличение и демпфирование) на расстоянии 100 км от эпицентра. Очень редко сейсмограф нужного типа находится точно в 100 км от эпицентра, но по отношению к каждой полученной сейсмограмме можно провести соответствующие расчеты и найти необходимые поправки для измерений на другом расстоянии и с помощью другого сейсмографа. Такие расчеты, проводимые

для нескольких станций, обычно сверяются между собой и, следовательно, взаимно подтверждают получаемые результаты.

Эта система количественной оценки величины (магнитуды) землетрясения, очевидно, имеет большее научное значение, чем субъективные суждения, используемые в шкале интенсивности проявления землетрясений на земной поверхности.

Шкала Рихтера – экспоненциальная, так что она охватывает исключительно широкий диапазон магнитуд. Энергия землетрясения с магнитудой 4,0 больше энергии землетрясения с магнитудой 3,0 приблизительно в 30 раз, и так далее вверх по шкале. Выделяются и очень слабые толчки с магнитудой лишь немного выше 0, и сильнейшие с магнитудой 8,5 и выше: Ассамское землетрясение (Индия, 1950 г.) имело магнитуду 8,7, Колумбийское (Южная Америка, 1906 г.) – 8,6, Чилийское (1960 г.) – 8,5, Аляскинское (1964 г.) – 8,5. На поверхности можно ощутить землетрясение с магнитудой 2,5, толчок с магнитудой 4,5 может в некоторых случаях вызвать небольшие разрушения, а с магнитудой 6,0 причинить значительный ущерб.

Первый сильный толчок землетрясения в Чили 21 мая 1960 г. имел магнитуду 7,5, а магнитуда сильнейшего из пяти крупных толчков, происшедших в следующие сутки, достигала 8,5. Сотни афтершоков (последующих толчков) Чилийского землетрясения имели, как правило, низкую магнитуду, но у некоторых она достигала 7,5–8,0. Это была очень мощная серия. Среди афтершоков Аляскинского землетрясения 1964 г. (с магнитудой 8,5) десять толчков имели магнитуду выше 6,0.

Микросейсмы. На записях многих чувствительных сейсмографов с высоким увеличением обычно видны мелкие колебания от приходящих из земных недр волн небольшой амплитуды и неправильного характера. Эти волны называются микросейсмами. Они приходят и уходят, но их вереница тянется непрерывно часами или даже сутками. Их возникновение связывают с прибоем вдоль морских берегов, с водопадами, ураганами (тайфунами) и штормами, с сильными ветрами, с летними муссонными дождями, с пассатами, с подъемом лавы во время извержения (вулканическое дрожание). По микросейсмам, записанным на специально оборудованных станциях, Дж. Дж. Линч нашел способ следить за движением ураганов в море. В большинстве же случаев микросейсмы представляют для сейсмических исследований помеху.

ДОСТОПРИМЕЧАТЕЛЬНЫЕ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯ

Гватемала, 1976 г. Сильнейшее мелкофокусное землетрясение поразило центральные районы южной Гватемалы 4 февраля 1976 г. в 3 ч 03 мин утра, когда большинство людей спали. Его магнитуда составила 7,5, а продолжительность сильных колебаний главного толчка достигала 39 с. Тысячи домов превратились в развалины; по официальным данным, погибли 22 778 человек, серьезные увечья получили 76 504 человека. Сотни тысяч людей остались без крова. Большинство жертв находились в старых домах, сложенных из тяжелых (20–30 кг) сырцовых кирпичей без какого-либо укрепления. Более 300 деревень и пятая часть жилых домов и гостиниц в городе Гватемала были уничтожены. Однако хорошо построенные деловые здания и отели остались невредимы. Материальный ущерб оценивался в 1,1 млрд. долл. Максимальная интенсивность составила IX баллов. Последовали тысячи афтершоков; некоторые из них имели магнитуду свыше 5,0.

Землетрясение было вызвано горизонтальным смещением до 3,25 м по разрыву, который пересекает Гватемалу между Северо-Американской и Карибской плитами (рис. 18.16). Этот разрыв идет почти вертикально и имеет азимут СВ 65°. Он вскрылся на протяжении 240 км, что представляет собой наибольшую величину после Калифорнийского землетрясения 1906 г. Подвижка по разрыву вызва-

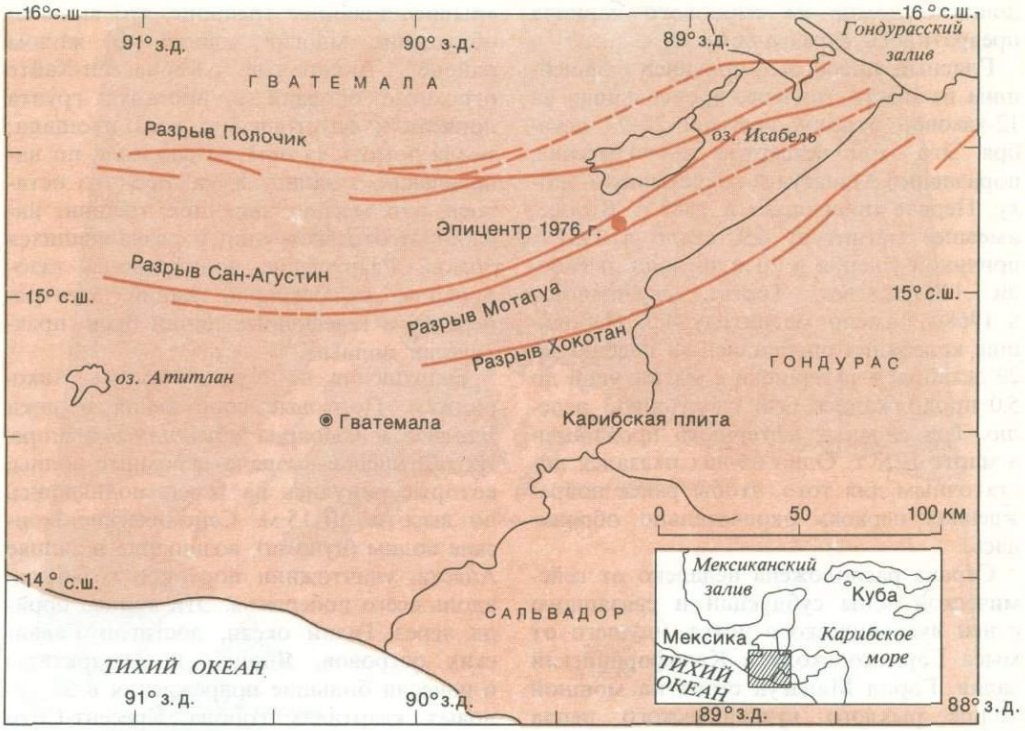


РИС. 18.16

Карта южной Гватемалы, показывающая эпицентр землетрясения 1976 г. на разрыве Мотагуа. Этот разрыв входит в систему разрывов, идущих по краю Карибской литосферной плиты, которая движется на восток. К северу расположена Северо-Американская плита. Южное крыло разрыва Мотагуа сместилось на восток по отношению к северному крылу в среднем на 1 м, а местами на 3,25 м. Движущаяся на северо-восток плита Кокос ныряет из Тихого океана под эту часть Центральной Америки под глубоководным желобом, вызывая другие землетрясения в Мексике и западной Гватемале. С этим же процессом связана цепь наземных вулканов. (Из специальной публикации 1002 Геологической службы США.)

ла тысячи оползней, которые перерезали шоссейные и железные дороги и линии связи. Это затруднило помощь пострадавшим, когда запасы пищи и питьевой воды иссякли. Эпицентр главного толчка располагался на 157 км к северо-востоку от города Гватемала. Различная степень повреждения зданий в этом городе дает наглядный урок сейсмостойкости разных построек. Деревянные дома и хорошо построенные стальные и бетонные здания пострадали мало. Они стояли как острова в море развалившихся домов из сырцового кирпича. Ни одно здание, построенное по правилам, отвечающим Строительному кодексу Калифорнии, не было разрушено.

Манагуа, Никарагуа, 1972–1973 гг. В Манагуа, столице Никарагуа, 23 декабря 1972 г. произошло землетрясение с магнитудой 6,25. Энергия его была эквивалентна взрыву 1 млн. т тротила. Город находился над эпицентром (или близ него), глубина очага составляла 14,5 км. Более 80% городских построек были уничтожены, число погибших оценивалось в 6000. Эффект подземного толчка описывался как «полное опустошение». Помимо убитых было 50 тыс. раненых, более 200 тыс. остались без крова. Боль-

шинство домов из сырцового кирпича превратилось в развалины.

Главный ущерб был причинен сильнейшим из шести толчков, происшедших за 12-часовой отрезок времени 22–23 декабря. Это было четвертое землетрясение, поразившее Манагуа в современную эпоху. Первое произошло в 1885 г. Второе, имевшее магнитуду 6,9, стало в 1931 г. причиной ущерба в 70 млн. долл. и гибели 1400 человек. Третье, случившееся в 1968 г., имело магнитуду 4,5. Небольшие колебания ощущались за неделю до 23 декабря, а афтершоки с магнитудой до 5,0 продолжались всю следующую неделю. Три сильных афтершока произошли в марте 1973 г. Один из них оказался достаточным для того, чтобы ранее поврежденная церковь окончательно обвалилась.

Страна расположена недалеко от сейсмической зоны субдукции и связанного с ней вулканического пояса, идущего от мыса Горн ко входу в Калифорнийский залив. Город Манагуа стоит на мощной толще рыхлого вулканического пепла и шлака, что заметно усиливает сейсмические сотрясения.

При землетрясении 1972 г. водопровод, электростанции и другие инженерные сооружения были полностью выведены из строя; десятки тысяч людей нуждались в пище, воде, в кровле над головой и в медицинской помощи. Безнаказанно творились грабежи; во всем городе свирепствовали пожары, которые нельзя было остановить. Более 20 стран прислали самолеты с продовольствием, спасательными командами, медикаментами и палатками. Хотя люди спрашивали, не стоит ли перенести город на новое место, многие решили восстановить дома на прежнем месте, но уже по правилам сейсмостойкого строительства.

Залив Принс-Вильям, Аляска, 1964 г. В самый оживленный час страстной пятницы 27 марта 1964 г., когда сгустились сумерки, на район Анкориджа обрушилось землетрясение огромной силы (магнитудой 8,5) (рис. 18.17). Начальные колебания продолжались 3–5 мин. Земля в Анкоридже раскачивалась, как волны на море, мощеные улицы коробились. Открылись зияющие трещины, что вызвало обрушение многих зданий. В жилом районе Анкориджа Тернагейн-Хайтс огромные оползни и просадка грунта привели к опустошению всей площади; земля ломоть за ломтем сползала по направлению к заливу Кука. Все, что осталось,– это месиво зияющих трещин, наклонных отрезков улиц и развалившихся домов. Разрушение водопровода, газопровода, канализации, линий электропередач и телефонных линий было практически полным.

Разрушения не ограничивались Анкориджем. Портовые сооружения и доки Валдиза и Сьюарда обвалились в море. Их обрушение вызвало огромные волны, которые ринулись на берег, поднявшись до высоты 10–15 м. Сейсмические морские волны (цунами), возникшие в заливе Аляска, уничтожили портовое хозяйство вдоль всего побережья. Эти волны, пройдя через Тихий океан, достигли Гавайских островов, Японии и Антарктиды и нанесли большие повреждения в 27 деловых кварталах города Кресент-Сити в Калифорнии.

Общий материальный ущерб от этого землетрясения превысил 300 млн. долл. Число погибших (главным образом утонувших) составило 114 на Аляске, 12 в Калифорнии и 4 в Орегоне.

Землетрясение возбудило колебания уровня грунтовых вод в колодцах и скважинах на значительной части территории Канады и США, взбаламутило воду в плавательных бассейнах Техаса; мареографы записали подъем воды в Мексиканском заливе. Эти примеры показывают, что большой сегмент Земли вибрировал тогда, как рогулька камертона.

Очаг начального землетрясения располагался на глубине 20–50 км у начала залива Принс-Вильям (рис. 18.17). За первым толчком в течение суток последовало 28 афтершоков, из них 10 были разрушительной силы. Десятки тысяч других афтершоков были отмечены в следующий двухмесячный период. Слабые колебания продолжались полтора года. Эти афтершоки исходили из области, протягивающейся на 730 км с северо-востока на юго-

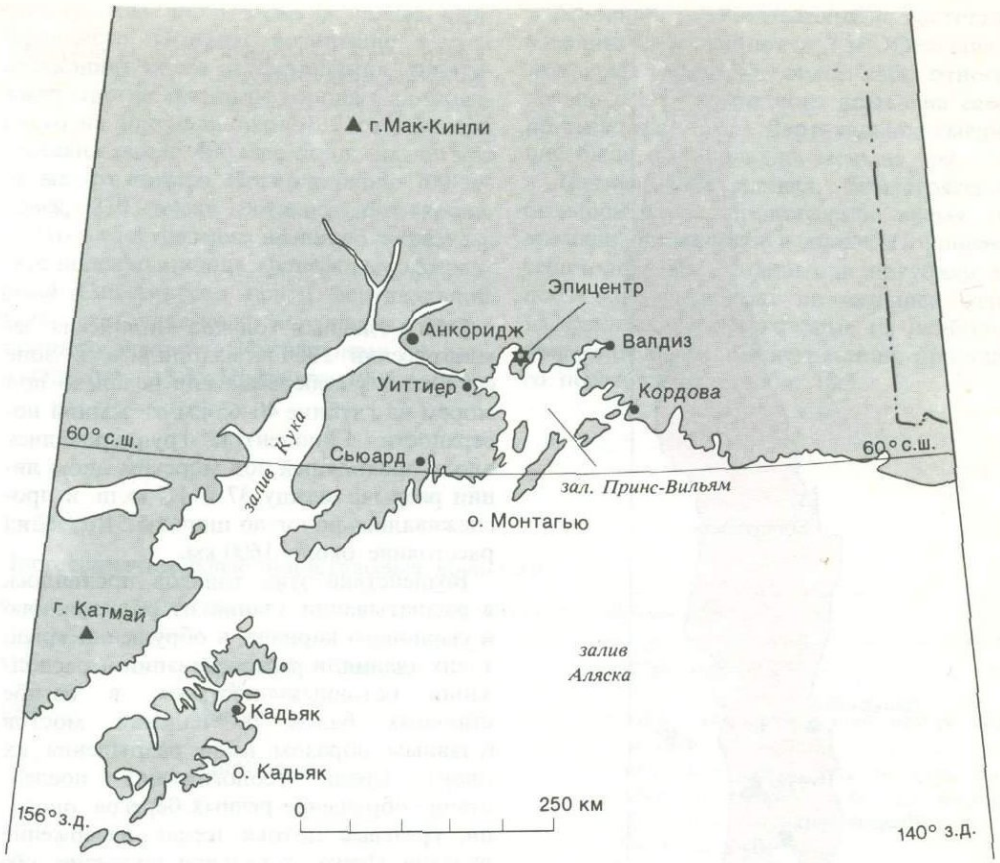


РИС. 18.17
Карта района Аляскинского землетрясения 1964 г.

запад: от залива Принс-Вильям до района острова Кадьяк. Разрыв, подвижка по которому была главной причиной землетрясения, прослеживается в глубь коры на 100–200 км. Надо ли говорить, что он находится в зоне Беньоффа! Обращенное к морю крыло этого разрыва продвинулось по направлению к континенту приблизительно на 8 м.

Землетрясение сопровождалось крупными изменениями высотных отметок. Полоса суши площадью 65–90 тыс. км^2 испытала поднятие, а район площадью около 100 тыс. км^2, расположенный к северо-западу от поднявшейся территории, опустился в среднем на 1 м. Максимальное поднятие морского дна оказалось больше 16 м – это наибольшее вертикальное смещение, отмеченное в историческое время. Этот подъем морского дна и вызвал волны цунами.

Чили, 1960 г. Длинная серия из нескольких сотен землетрясений началась в Чили (рис. 18.18) 21 мая 1960 г. и продолжалась несколько месяцев. При этих толчках погибли 2 тыс. человек, полмиллиона остались без крова, материальный ущерб оценивался в 500 млн. долл. За первым толчком, имевшим магнитуду 7,5–8,0, на следующий день последовали 5 сильных землетрясений сравнимой магнитуды. Вместе они представили относительно быстрое высвобождение огромной энергии.

Обычно на Земле происходит за несколько лет только небольшое число ис-



РИС. 18.18
Карта части территории Чили, затронутой землетрясением 1960 г.

ключительно сильных землетрясений, а на один год приходится совсем мало таких сверхмощных толчков. Например с 1904 по 1946 г. только 14 землетрясений относились к категории сильнейших (с магнитудой от 7,0 до 8,6). Однако среди Чилийских землетрясений, возникших в первые 10 дней, несколько десятков классифицировались как потенциально разрушительные (с магнитудой от 6,0 до 7,0) или как крупные (с магнитудой 7,0–7,7).

Очаги главных толчков Чилийских землетрясений 1960 г. находились в зоне субдукции у побережья или недалеко под морем на глубине 40–65 км от земной поверхности. Гипоцентры группировались вдоль проходящей под морским дном линии разрыва между 37 и 41° ю. ш. и прослеживались на юг до широты 51°, т. е. на расстояние около 1600 км.

Воздействие этих толчков проявилось в расшатывании зданий из обожженного и сырцового кирпича, в обрушении крыш таких зданий, в растрескивании и расползании бетонных построек, в изгибе стальных балок, в падении мостов (главным образом из-за разрушения их опор). Среди геологических последствий – обрушение речных берегов, оползни, грязевые потоки (сели), извержение вулкана Пуеуэ, локальное поднятие, общее опускание и затопление морем обрабатываемых земель между Вальдивией и Пуэрто-Монтом. Озеро Риньиуэ, подпруженное оползнями, поднялось выше обычного уровня на 33 м и создало на какое-то время угрозу затопления города Вальдивия, расположенного ниже этого озера.

Сильные Чилийские землетрясения 1960 г. возбудили колебания в объеме всей Земли, подобные гудению колокола, что привлекло особый интерес геофизиков, изучающих внутреннее строение нашей планеты.

Калифорния, 1906 г. 18 апреля 1906 г. в Калифорнии разразилось крупное землетрясение. Разваливались дома, трескались печные трубы, коробились мостовые, обрушивались пристани, лопались линии водопровода, со склонов холмов сходили оползни. Сильнее всего пострадали дома, построенные на насып-

ных грунтах вдоль берегов залива Сан-Франциско. Пожары, возникшие в этих развалинах после землетрясения, уничтожили многие кварталы города Сан-Франциско на площади около 12 км^2. Ущерб составил около 400 млн. долл., на четыре пятых – от пожара. Погибли около 700 человек, 250 тысяч остались без крова.

Это землетрясение возникло в результате подвижки вдоль трансформного разрыва Сан-Андреас – почти вертикальной зоны тектонического нарушения, рассекающего западную Калифорнию по диагонали (рис. 18.3). Подвижка 1906 г. была в основном горизонтальной и достигала у залива Томалес почти 7 м. Юго-западное крыло разрыва сместилось относительно северо-восточного крыла на северо-запад (рис. 18.3). Вертикальное смещение было, как правило, меньше 1 м.

Другие землетрясения. Землетрясения большой силы происходили время от времени во все века и эпохи. По оценке сейсмолога Дж. Милна, они погубили за последние 4 тыс. лет по меньшей мере 13 млн. человек. Некоторые из наиболее примечательных землетрясений прошлого перечислены в табл. 18.3.

Таблица 18.3

Достопримечательные землетрясения прошлого

Год	Место	Магнитуда	Примечания
1556	Провинция Шэньси (Китай)	—	830 000 убитых (оценка)
1731	Китай	—	Самое тяжелое в Китае между 1556 и 1976 гг.
1755	Португалия	—	Уничтожена треть Лиссабона; колебания ощущались даже на востоке Северной Америки; погибли 60 000 человек
1811–1812	Нью-Мадрид (шт. Миссури)	—	Вызвало изменение русла реки Миссисипи и ее поймы; ощущалось на площади 5 млн. км^2
1886	Чарлстон (шт. Юж. Каролина)	—	Ощущалось на всей восточной части США
1897	Ассам (Индия)	8,7	Область разрушений – 390 тыс. км^2, ощущалось на площади 2 млн. км^2
1923	Токио (Япония)	8,1	254 тыс. домов разрушено или повреждено; гигантский пожар; 140 тыс. погибших; 1100 афтершоков
1959	Хебген (шт. Монтана)	7,0	Повлияло на гейзеры Йеллоустона; много оползней; в результате образовалось новое озеро
1970	Чимботе (Перу)	7,8	Грязе-каменная лавина погребла два города; погибли 17 тыс. человек
1971	Сан-Фернандо (шт. Калифорния)	6,6	Интенсивность от VII до XI; ущерб более 1 млрд. долл.
1976	Таншань (Китай)	8,2	Разрушения на большой площади; стерты с лица земли город с миллионным населением и ближайшие поселки; волны на поверхности грунта; погибли 650 тыс. человек (оценка), ранено 700 тыс. человек

ЦУНАМИ

Сейсмические морские волны – *цунами*, иногда ошибочно называемые «приливными» волнами, часто сопровождают крупные землетрясения, происходящие в районах морского или океанического побережья. Они возникают тогда, когда энергия землетрясения передается как морскому дну, так и воде. Волны цунами характеризуются высокой скоростью и большой длиной, однако в открытом море их высота не бывает больше первых метров. С корабля в море редко можно заметить прохождение таких волн. Однако, когда эти волны выходят на мелководье, они могут стать весьма разрушительными. Высота каждой волны достигает там многих метров, потому что длина волны уменьшается из-за близости дна, как и в случае обычных волн. Соответственно энергия воды, имевшей большую глубину, концентрируется в коротком вертикальном интервале.

Много раз цунами приносили опустошение. Высокие волны образовались после Лиссабонского землетрясения в 1755 г.; сначала они осушили бухту, потом выплеснулись на берег примерно на километр, а потом смыли в море корабли, дома, мосты и людей. Сейсмическая морская волна, возникшая в районе Алеутских островов, уничтожила 1 апреля 1946 г. маяк на мысе Датч (Аляска), расположенный на 15 м выше уровня моря. Волна проделала путь 3800 км к Гавайским островам со средней скоростью 780 км/ч (рис. 18.19). В открытом море волны имели длину 150 км. У берега их высота достигала 3–6 м. На тесных участках они вздыблились до отметок 10–15 м над уровнем моря. Преобразившись в движущиеся стены воды, эти волны нанесли тяжелые повреждения домам, шоссейным и железным дорогам, мостам, пристаням, волнорезам, судам и были причиной гибели 159 человек. Общий материальный ущерб на Гавайях оценивался в 25 млн. долл. Вдоль побережья Калифорнии вода поднималась до 4 м. После этого была организована Международная система предупреждения о движении волн цунами, с тем чтобы сообщать в населенные пункты, расположенные вокруг Тихого океана, о грозящей им опасности.

Гигантские морские волны, возникшие у побережья Чили во время землетрясения 1960 г., достигли Гавайев, пройдя 11 000 км приблизительно за 15 ч. Мареограф в Хило попеременно отмечал подъем и падение уровня воды, происходившие примерно с 30-минутным интервалом. Несмотря на предупреждение, эти волны в Хило и других местах Гавайских островов стали причиной гибели 60 человек и нанесли ущерб в 75 млн. долл. Еще через 8 ч волны достигли Японии, в очередной раз разрушив там портовые сооружения; при этом погибли 180 человек. Жертвы и разрушения имелись также на Филиппинских островах, в Новой Зеландии и в других частях Тихоокеанского кольца.

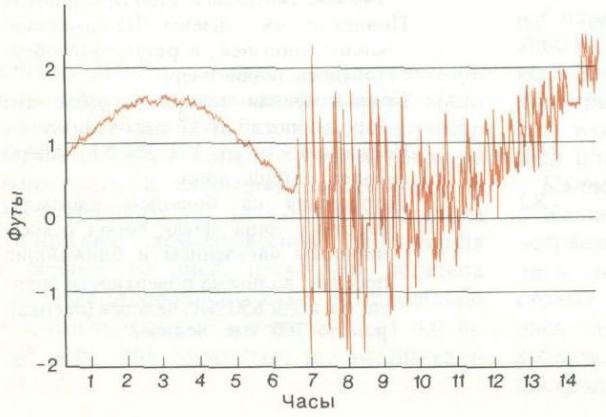


РИС. 18.19
Мареограмма сейсмических морских волн (цунами), записанная в гавани Гонолулу 1 апреля 1946 г. (По Макдоналду, Шепарду и Коксу, 1947.)

МЕРЫ ЗАЩИТЫ ОТ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ

Когда в густонаселенной местности происходит сильный подземный толчок, многие здания получают повреждения или разваливаются. Главная причина этого – низкое качество построек. Разрушительное воздействие землетрясений связано с неустойчивостью грунта, с использованием сырцового кирпича или непрочной каменной кладки, что приводит к падению крыш и печных труб, растрескиванию фундаментов и стен.

Потенциально опасны тяжелые выступающие части домов, стенки парапетов и ненужные лепные украшения. Старая известка, незакрепленная кровля и стропила, лишенные элементов жесткости лифтовые шахты и каркасы, неукрепленные лестничные колодцы и общие стены смежных домов разного размера – все это также представляет опасность. При дифференцированных движениях рвутся подземные трубопроводы всех видов.

Чтобы свести к минимуму возможные повреждения, строители должны учитывать все геологические факторы, определяющие устойчивость здания. Скальные породы – идеальное основание для крупных сооружений. Следует избегать строительства на слабых грунтах, крутых склонах, насыпных землях. Нежелательно также возводить здания на морских утесах, на обрывистых берегах рек, вблизи глубоких котлованов и на участках с высоким уровнем грунтовых вод в рыхлых осадочных породах.

При строительстве мостов и высоких зданий необходимо обращать особое внимание на их вес, устойчивость по отношению к горизонтальным силам и на внутреннюю уравновешенность. Доказано, что железобетонные здания сравнительно устойчивы, однако деревянные, стальные и укрепленные каменные дома также могут быть сейсмостойкими, если они хорошо сконструированы и хорошо построены. Для этого применяются соответствующие элементы жесткости и крепления: связывающие скобы, подпорки и стойки, анкерные болты. Наибо-



РИС. 18.20
Район массовой застройки вдоль разрыва Сан-Андреас в южной части Сан-Франциско, шт. Калифорния. Многие дома стоят прямо на линии тектонического нарушения, проходящего сверху вниз в средней части снимка. (Фотография Уоллеса, Геологическая служба США.)

лее безопасной конструкцией является та, которая будет гибкой и сможет двигаться как единое целое, т.е. так, чтобы отдельные ее части не ударялись друг о друга.

Обеспечение сейсмостойкости – обязательное требование при строительстве в сейсмоопасных районах. Необходимое увеличение стоимости составляет, по инженерной оценке, менее 10 %, если соответствующие проблемы решаются на стадии проектирования. На Тихоокеанском побережье США готовые архитектурные решения, направленные на уменьшение сейсмической опасности, имеются только для проектирования крупных зданий и сооружений.

Чтобы избежать катастрофических последствий в особо сейсмоопасных районах, таких, как южная часть Сан-Франциско (рис. 18.20), могут быть приняты некоторые административные меры. Для контроля землепользования и типов построек, разрешенных в зонах высокой сейсмоопасности, должны быть обязательны ограничения, налагаемые сейсмическим районированием. Это относится, например, к районам с неустойчивыми насыпными грунтами и к районам, где развиты оползни. Строительные нормы и правила должны определять стандарты различных зданий. Учет различного уровня риска в связи с особенностями геологической обстановки, выполняемый с помощью карты сейсмической опасности 1969 г. (составленной Национальным ведомством США по океанам и атмосфере), стал уже обычной практикой некоторых сраховых компаний. Все эти меры контроля – путем районирования, совершенствования строительных норм и классификации зданий по уязвимости – особенно необходимы для предотвращения человеческих жертв и катастрофических разрушений при будущих подземных толчках в районах, омываемых водами Тихого океана. Серьезная проблема состоит в том, как привести ныне существующие здания в соответствие со стандартами сейсмостойкости; другая проблема – подготовка планов мероприятий по смягчению последствий разрушительных подземных толчков.

ПРАКТИЧЕСКИЕ ПРИЛОЖЕНИЯ СЕЙСМОЛОГИИ

Сейсморазведка. *Небольшие искусственные землетрясения используются для выяснения структуры верхней части земной коры, особенно при поисках нефти и природного газа. Возбуждаемые сейсмические волны принимаются и записываются с помощью групп сейсмоприемников и регистрирующих устройств, расставленных по тщательно разработанной системе вдоль профиля наблюдений (рис. 18.21).*

Скорости распространения подземных

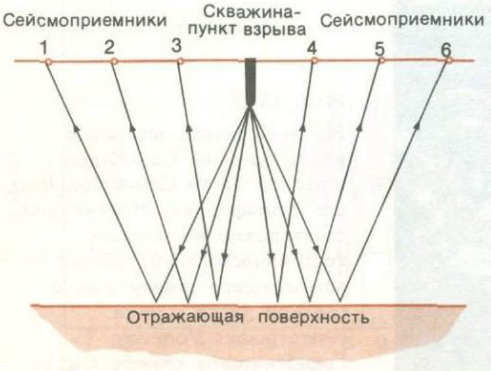


РИС. 18.21

Схема наблюдений по методу отраженных волн, применяемая в сейсморазведке. Волны, распространяющиеся от пункта взрыва, отражаются от некоторой поверхности на глубине (где скорость волн резко меняется) и возвращаются вверх к приемным устройствам, размещенных на дневной поверхности по строгой схеме. Сопоставление записей прямых, распространяющихся горизонтально волн и приходящих позднее отраженных волн, производимое путем построения кривых зависимости времени от расстояния, позволяет установить глубину и наклон (если он имеется) отражающей поверхности.

волн различны в породах разного типа, поэтому времена пробега этих волн позволяют судить об общем характере подстилающих пород. Главное внимание обращается на отражение и преломление волн. Изменения в направлении движения волн позволяют найти положение границ, по которым контактируют различные тела горных пород, в особенности слоистых. Проведя серию взрывов, можно вычислить глубину отражающего или преломляющего слоя в разных местах и таким образом установить структуру подстилающих пород.

Акустическое зондирование осадочного слоя. Для зондирования осадков на морском дне применяются в настоящее время звуковые волны. Это позволяет геологам и океанологам определять мощность осадочного слоя и характер осадков. При движении исследовательского судна по выбранному маршруту можно получить профиль, показывающий многочисленные отражения звуковых волн.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ

Землетрясения – это волновые колебания, распространяющиеся внутри и по поверхности Земли. Они вызываются главным образом субдукцией плит земной коры, процессами в срединно-океанических хребтах, образованием разрывов и вулканической деятельностью; иногда землетрясения можно возбудить искусственно. При движениях вдоль разрывов возникает упругая отдача, включающая медленное накопление упругой деформации и резкое ее высвобождение. Исходная причина движения плит и вулканической деятельности – тепло, выделяющееся в недрах Земли благодаря радиоактивности горных пород.

Большинство землетрясений возникает вдоль границ плит в Циркумтихоокеанском поясе, в Средиземноморско-Азиатском поясе, на срединно-океанических хребтах и связанных с ними трансформных разрывах. В некоторых местах они происходят почти постоянно.

Землетрясения повторяются нерегулярно. Пытаясь выработать надежные методы прогноза, геологи и геофизики в нескольких сейсмоопасных районах изучают признаки грядущих землетрясений.

Интенсивность землетрясений оценивается по их воздействию на людей, постройки, поверхностный грунт и коренные породы. Оценка производится по специальной шкале: от I до XII баллов.

Геологические последствия землетрясений – это в основном обвалы, оползни, возникновение цунами, а также другие явления на земной поверхности.

При научном исследовании землетрясений с помощью разного вида сейсмографов записываются продольные, поперечные и поверхностные волны, анализируются условия их отражения, преломления, дифракции и дисперсии. Поскольку различные волны распространяются с разной скоростью, их можно выделять на сейсмограммах. Разность времен прихода *P*- и *S*-волн используется как мера расстояния до очага.

Фокус или очаг (гипоцентр) землетрясения – это точка возникновения сейсмических волн. Фокус может быть мелким (неглубоким), промежуточным и глубоким. Наибольшая известная глубина – 720 км. Эпицентр – точка на поверхности над фокусом. Большинство землетрясений относится к типу мелкофокусных (нормальных). Глубокофокусные землетрясения возникают в зонах субдукции, связанных с системами океанический желоб – островная дуга и океанический желоб – граница континента.

Экспоненциальная шкала магнитуд (шкала Рихтера) используется как мера энергии, выделяющейся в очаге землетрясения. Шкала основана на величине амплитуды колебаний, записанных на сейсмограмме с помощью определенной аппаратуры и на определенном расстоянии от очага. Разрушительные землетрясения обычно имеют магнитуду от 7,0 до 8,7 (максимальное измеренное значение).

На многих сейсмограммах видны мелкие неровные колебания, называемые микросейсмами. Они образуют фоновый «шум» записи.

Среди характерных примеров современных землетрясений – подземные толчки в Сан-Франциско (1906 г.), в Чили (1960 г.), на Аляске (1964 г.), в Никарагуа (1972–1973 гг.) и в Гватемале (1976 г.). *Можно было бы привести много других* примеров.

Цунами, или сейсмические морские волны, – это длинные, низкие, проникающие на глубину во́лны, распространяющиеся в открытом море со скоростью в сотни километров в час. У берегов они вздыбливаются, достигая огромной высоты, и причиняют большой ущерб в приморских районах.

Опасные последствия грядущих землетрясений можно смягчить, принимая соответствующие защитные меры. Во-первых, не следует возводить постройки на неустойчивых грунтах, а во-вторых, необходимо использовать сейсмоустойчивые конструкции зданий.

Искусственно возбужденные землетрясения используются для сейсмического исследования глубинного строения земной коры при поисках нефти и для зондирования осадочного слоя на морском дне.

ВОПРОСЫ

1. Какого рода деформации возникают при передаче сейсмических волн?
2. Что такое «теория упругой отдачи» и как она связана с разрывами и землетрясениями?
3. Дайте определения интенсивности и магнитуды землетрясений. В чем состоит различие между этими параметрами?
4. Что такое эпицентр и как устанавливают его положение?
5. Как возникают волны цунами и какую роль они играют в жизни людей?
6. Какие методы существуют в настоящее время для предсказания времени и места ожидаемого землетрясения?

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Bolt B. A., 1978, Earthquakes: A Primer, W. H. Freeman and Company, San Francisco. [Имеется перевод: *Болт Б.*, Землетрясения: Общедоступный очерк.– М.: Мир, 1981.]

Hodgson J. H., 1964, Earthquakes and Earth Structure, Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs, N. J. [Имеется перевод: *Ходжсон Дж.*, Землетрясения и строение Земли.– М.: Мир, 1966].

Kisslinger C., 1974, Earthquake prediction, Physics Doday, vol. 27, No. 3, pp. 36–42.

Lomnitz C., 1974, Global Tectonics and Earthquake Risk, Elsevier Scientific Publishing Co., New York.

Press F., 1975, Earthquake predictions, Sci. Amer., vol. 232, No. 5, pp. 14–33.

Richter C. F., 1985, Elementary Seismology, W. H. Freeman and Company, San Francisco. [Имеется перевод: *Рихтер Ч. Ф.*, Элементарная сейсмология.– М.: ИЛ, 1963.]

Richter C. F., 1969, *Earthquakes, Natural History, vol.* 78, No. 10, pp. 36–45.

Rikitake T., 1976, Earthquake Prediction, Elsevier, Scientific Publishing Co., New York. [Имеется перевод: *Рикитаке Т.*, Предсказание землетрясений.– М.: Мир, 1979.]

Weigel R. L (ed.), 1970, Earthquake Engineering, Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs, N. J.

Yanev P., 1977, Earthquake safety for homes, California Geology, vol. 30, No. 12, pp. 272–277.



19 ВНУТРЕННЕЕ СТРОЕНИЕ ЗЕМЛИ

Начиная с первых лет двадцатого столетия сейсмические волны приносят нам сведения об устройстве земных недр. За последние годы наши знания в этой области сильно возросли. Среди достижений – разработка усовершенствованной аппаратуры, создание всемирной сети стандартных сейсмических станций, системы сгруппированных датчиков с одной усилительной схемой. Мы получаем теперь нужные сведения, используя подземные взрывы, свободные колебания Земли (с периодом 53,8 мин), возникающие после сильных землетрясений, и изучая поверхностные волны с периодом от 20 до 3400 с.

Сейсмические исследования дополнялись другими работами, развивавшимися в различных направлениях. Проведены испытания минералов, горных пород и металлов ультразвуковыми и ударными волнами и при высоких давлениях. В лабораториях получены данные о полях устойчивости минералов и пород при условиях давления и температуры, эквивалентных обстановке на глубине 700 км. Когда сейсмология, физика твердого тела и экспериментальная петрология объединяют свои силы, появляются новые данные.

В этой главе мы подытожим наши современные знания о внутреннем строении Земли, основанные на новых открытиях. Общее разделение нашей планеты на кору, мантию и ядро показано на рис. 1.3 и 19.1.

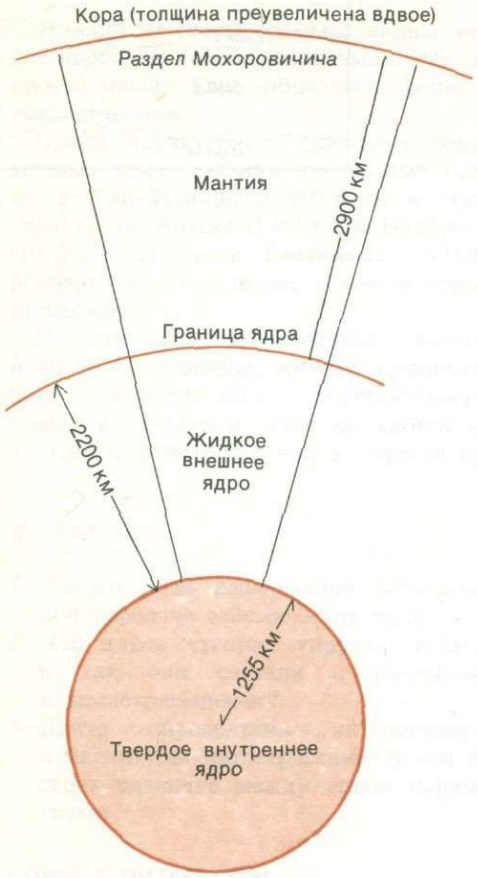


РИС. 19.1
Схема (масштаб соблюден) строения внутренней части Земли, построенная по данным о распространении сейсмических волн.

ОТКЛОНЕНИЕ СЕЙСМИЧЕСКИХ ВОЛН

Встречая на своем пути внутри Земли различные по свойствам слои, сейсмические волны испытывают преломление (рефракцию) и частичное или полное отражение (рис. 19.2). Продольные волны, которые только задевают ядро, образуют

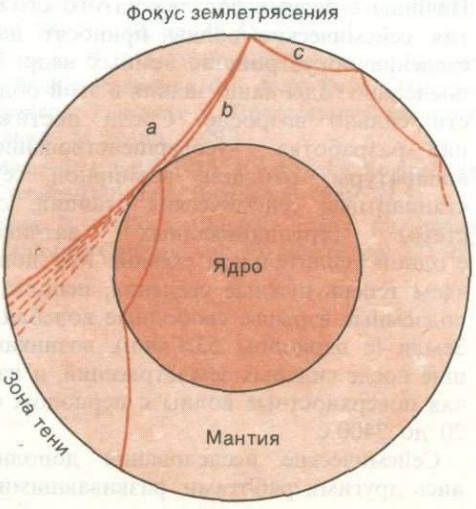


РИС. 19.2
Схема, показывающая дифракцию, преломление и отражение сейсмических волн. Луч *a*, только касающийся ядра, испытывает дифракцию, луч *b* дважды сильно преломляется на границе ядра, а луч *c* многократно отражается от земной поверхности.

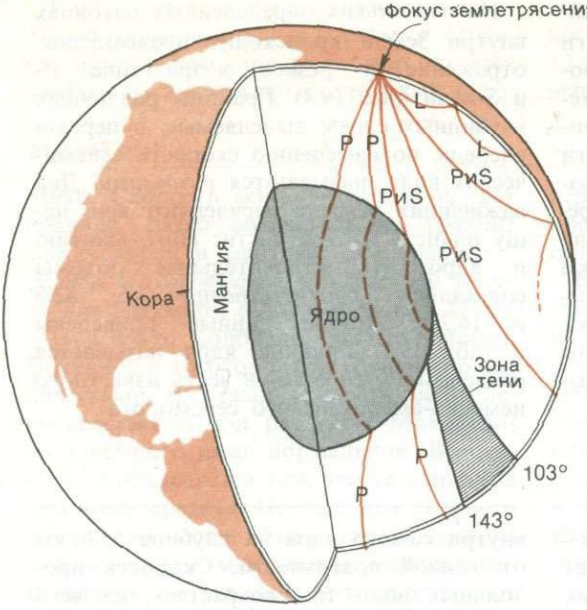


РИС. 19.3
Схема путей распространения сейсмических волн внутри Земли. Продольные волны, входящие в ядро у края, преломляются внутрь, в результате чего под защитой ядра образуется зона тени. Как продольные (*P*), так и поперечные (*S*), а в особенности поверхностные (*L*) волны многократно отражаются от поверхности Земли.

затем пучки дифрагированных волн. *Дифракция* – это изменение направления волны путем рассеяния энергии параллельно гребню волны. *Преломление* сейсмической волны – изменение направления волны при ее прохождении под углом из одного вещества в другое, отличающееся по плотности или по скорости распространения волн; точно так же происходит преломление световых лучей на границе воздуха и воды или в линзах очков. В результате преломления волн внутри Земли часть их энергии возвращается к поверхности, и на сейсмографических записях появляется множество дополнительных сигналов. Как *P*-, так и *S*-волны испытывают внутреннее отражение от земной поверхности и от границы ядра, а *P*-волны отражаются, кроме того, и внутри ядра – от его внутренней поверхности раздела. Все сейсмические волны затухают (ослабляются) обратно пропорционально квадрату пройденного расстояния.

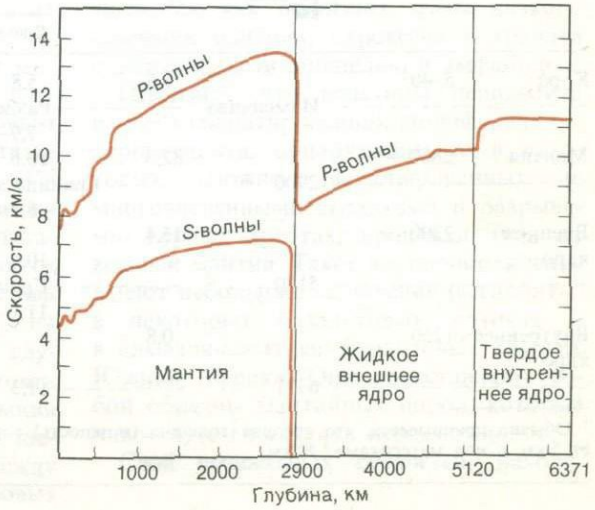


РИС. 19.4
Изменение скорости продольных (*P*) и поперечных (*S*) волн внутри Земли. В жидкое внешнее ядро *S*-волны не проникают. Скорость *P*-волн на границе внешнего ядра падает с 13,6 до 8 км/с, а в твердом внутреннем ядре возрастает приблизительно от 10 до более чем 11 км/с. Прогиб обеих кривых в левой части диаграммы указывает на существование в верхней мантии слоя низких скоростей. (По Болту, 1973, с изменениями).

Кольцо сейсмической тени. На эпицентральных расстояниях 103–143° дуги (11 000–16 000 км) сигналы как продольных, так и поперечных волн исчезают. Поперечные волны, будучи сдвиговыми колебаниями, не могут пройти через жидкое ядро, а продольные преломляются на границе ядра внутрь. В результате образуется «мертвая зона», или зона тени, шириной около 4300 км (рис. 19.3). Для каждого данного землетрясения эта зона имеет форму бублика. В «дырке от бублика» продольные волны появляются снова, но приходят они в измененной форме и с запозданием.

На нескольких определенных глубинах внутри Земли происходит преломление, отражение и резкое возрастание *P*- и *S*-волн (рис. 19.4). Границы различных глубинных слоев, выделяемые, в первую очередь, по изменению скорости сейсмических волн, называются *разделами*. Два важнейших раздела расчленяют всю нашу планету на три части: кору, мантию и ядро. Их относительные объемы составляют соответственно 1,5, 82,3 и 16,2%. Другие данные приведены в табл. 19.1. Граница ядра называется разделом Гутенберга – в честь известного немецко-американского сейсмолога

ЗЕМНОЕ ЯДРО

Внутрь кольцевой – похожей на бублик – зоны тени продольные волны приходят с опозданием в несколько минут, так как на границе внешнего ядра скорость волн падает от почти 14 км/с до приблизительно 8 км/с (рис. 19.4). Эта задержка в сочетании с тем фактом, что *S*-волны, проходящие только через твердое вещество, полностью отсутствуют в зоне тени, показывает, что внешняя часть ядра жидкая, т.е. она не обладает прочностью на сдвиг. Еще один раздел располагается внутри самого ядра на глубине 5120 км от земной поверхности. Скорость продольных волн там возрастает, из чего следует, что внутреннее ядро твердое.

Внешнее ядро обычно считают железоникелевым расплавом, возможно, с примесью более легких элементов, таких, как кремний и сера. Эти легкие элементы включают в гипотетический состав ядра для того, чтобы лучше согласовать экспериментальные данные о плотности с расчетами, касающимися сейсмических скоростей.

Таблица 19.1

Некоторые данные о внутренних частях Земли

Слой	Толщина, км	Глубина раздела, км	Объем, %	Скорость сейсмических волн, км/с		Вычисленная плотность, г/см^3
				P-волны	*S*-волны	
Кора	5–40[1]		1,5	5,8–7,6	3,2–4,3	2,8 (срдн.)
		Изменчива		Раздел Мохоровичича		
				7,9–8,2	4,3–4,6	3,3–3,4
Мантия	2860 +		82,3	13,6	7,3	5,5–5,8
		2900		Граница ядра (раздел Гутенберга)		
				8,1	Нет	9,4–10,0
Внешнее ядро	2200		15,4			10,0–11,0 (средн.)
				10,4	—	12
		5120		Граница внешнего и внутреннего ядра		
				11,1	—	
Внутреннее ядро	1250		0,8			13,0–13,5 (средн.)
		6371		11,3		

[1] Обычно принимается, что средняя толщина (мощность) коры под океаническими впадинами составляет 5 км, а под материками – 40 км.

Как и многие другие вопросы геологической науки, вопрос о составе и строении внутреннего ядра до сих пор остается предметом непрерывных дискуссий и исследований. Согласно расчетам, плотность там достигает по меньшей мере 13 г/см^3 (табл. 19.1), а давление превышает 218 000 кг/см^2.

МАНТИЯ

Мохо. Скорость сейсмических волн, как правило, разко возрастает на границе между корой и мантией. Эта граница — *раздел Мохоровичича,* называемый иногда для краткости разделом М или Мохо.

Под плато Колорадо, под Провинцией бассейнов и хребтов и под срединно-океаническими хребтами скорость волн непосредственно под разделом Мохоровичича немного ниже нормальной. Вероятно, это объясняется тем, что температура там выше средней. Пониженные скорости под плато могут быть также связаны с измененным мантийным материалом. В других местах скорость продольных волн сразу же под разделом Мохоровичича составляет 8,0 км/с или больше.

Деление мантии на слои. Из анализа сейсмических скоростей вытекает, что мантия имеет по меньшей мере трехчленное деление: верхняя мантия, переходная зона и нижняя мантия. Скоростные различия между разными глубинами в мантии или между разными ее слоями могут быть обусловлены различиями в температуре и давлении, локальным частичным плавлением, изменениями в минеральном составе, различиями плотности в результате фазовых переходов между минералами или же какими-то сочетаниями этих факторов.

П. Уилли (Wyllie, 1975) предложил модель мантии, в которой слой между глубинами 100 и 400 км сложен гранатовым перидотитом, содержащим приблизительно 57% оливина, 29% пироксена и 14% граната. На глубинах 400–700 км мантия должна состоять из шпинелево-гранатовых пород, в которых 57% приходится на шпинель оливинового состава [$(Mg, Fe)_2SiO_4$], 39% – на гранат и 4% – на жадеит [$NaAl(SiO_3)_2$]. На еще более глубоких уровнях материал должен состоять в основном из магния, железа и кремния в тесной упаковке с кислородом в шестерной координации. Границы между этими слоями отмечают места фазовых переходов в минералах, повышения плотности и соответствующего возрастания сейсмических скоростей (рис. 19.4).

Верхняя мантия. Верхняя мантия состоит из 1) высокоскоростного слоя толщиной 0–50 км, 2) среднего слоя пониженных скоростей толщиной около 100 км и 3) однородного более глубокого слоя толщиной около 250 км, распространяющегося до глубины 400 км. Полностью твердый верхний слой мантии и лежащая на нем земная кора представляют собой главный источник землетрясений.

Свойства верхней мантии имеют прямое отношение к геотектоническим процессам, вызывающим движение материков и океанических впадин. Большой интерес представляет слой высоких скоростей (мощностью 0–50 км) сразу же под земной корой и подстилающий 100-километровый слой пониженных скоростей.

Верхний высокоскоростной слой – это хрупкое твердое вещество; вместе с земной корой он образует прочную внешнюю оболочку Земли, называемую литосферой (рис. 19.5). Важнейшими минералами, слагающими этот верхний слой, являются, как полагают, фазы низкого давления оливина, пироксена и граната с акцессорными шпинелью и амфиболом.

Полагают, что пластины перидотита или его гидратированной модификации — серпентинита, обнаруживаемые в некоторых сложно дислоцированных (с многочисленными складками и разрывами) горных хребтах, проникли туда из верхней мантии. Такое же происхождение имеют небольшие включения (ксенолиты) в некоторых базальтовых потоках и в алмазоносных кимберлитовых трубках Южной Африки. Они представляют собой образцы мантийных пород, которые иным путем получить невозможно.

Слой пониженных скоростей, находя-



РИС. 19.5

Схема строения коры и верхней мантии, включая твердую литосферу и пластичную астеносферу (слой пониженных скоростей). Базальтовая океаническая кора формируется в срединно-океанических хребтах, питаемых поднимающейся магмой, и погружается у океанических желобов в мантию вдоль наклонных зон субдукции – зон Беньоффа. Там она (вместе с залегающими на ней морскими осадками) подвергается частичному плавлению, питая андезитовые вулканы островных дуг. Ее судьба под материками менее ясна; возможно, она там соединяется с астеносферой. Мощные слои осадков (на схеме не показаны), испытавшие субдукцию на границе с континентом, участвуют в горообразовании и в формировании гранитных интрузий.

щийся под литосферой, называют также *астеносферой* (т.е. слабой, податливой оболочкой) или пластичным слоем (*рис. 19.5*). Характерные для нее низкие сейсмические скорости нельзя объяснить минеральным составом или температурным градиентом. Свойства этого слоя с его резкими границами лучше всего объясняются либо частичным (менее 1%) плавлением, дегидратацией, либо присутствием в его минеральной ассоциации воды. Лабораторными исследованиями было установлено, что в присутствии небольшого количества воды частичное плавление оливина, пироксена, плагиоклаза, граната и менее распространенных минералов начинается при подходящей для данного слоя относительно низкой температуре. Поэтому в настоящее время частичное плавление считается наиболее приемлемым объяснением существования слоя пониженных скоростей.

Под областями докембрийских щитов этот низкоскоростной слой развит, по-видимому, плохо и уходит на чрезвычайно большую глубину, а возможно, что он там отсутствует вовсе.

Переходный слой и нижняя мантия. В переходном слое, находящемся под слоем пониженных скоростей на глубинах 400–800 км, имеется несколько горизонтов, где сейсмические скорости резко возрастают. Это явление связывают с перекристаллизацией (под действием высокого давления) породообразующих минералов в другие, более плотные.

Полагают, что такого рода уменьшение объема продолжается и на еще более глубоких уровнях. В лабораторных опытах при давлении, соответствующем глубине около 500 км, оливин приобретает более плотную внутреннюю структуру типа шпинелевой и сокращается в объеме на 10%. При давлении, соответствующем глубине 600–1000 км, структура пироксена становится ильменитовой, а шпинель и другие минералы приобретают структуру с еще более плотной упаковкой. Плотность вещества у подошвы мантии составляет, согласно расчетам, 5,5–5,8 г/см^3.

ЗЕМНАЯ КОРА

Континентальная кора состоит из двух слоев, между которыми проходит слабо выраженный раздел. Слои выделяются на основании различия сейсмических скоро-

стей, вероятной плотности и по вещественному составу обнаженных на поверхности пород. Скорость в верхнем слое соответствует той скорости, которая, по экспериментальным данным, характерна для гранита. Это обстоятельство, вместе с данными о большом распространении близ земной поверхности гранитов, кристаллических сланцев и гнейсов, привело к тому, что верхний слой коры назвали гранитным или *сиалическим* (т.е. богатым кремнием и алюминием). Нижний слой соответствует базальту или габбро (возможно, гранатовому), поэтому его называют базальтовым, габбровым или *мафическим* субстратом (богатым магнием и железом). Поскольку граница между гранитной и габбровой частями континентальной коры выражена нечетко, это представление о двуслойной коре, возможно, является слишком упрощенным. Последние данные сейсмического профилирования методом отраженных волн указывают на значительную изменчивость континентальной коры от места к месту.

Корни гор. Продольные волны, идущие в мафическом субстрате от очага, который находится в западной Калифорнии, к сейсмографам в долине Оуэнс-Валли (сразу же к востоку от Сьерра-Невады), приходят с опозданием в 2–3 с. Следовательно, хребты Сьерра-Невады должны иметь глубокие «корни»; другими словами, тела гранитоидов с относительно низкими сейсмическими скоростями должны продолжаться вниз, где продольные волны пересекают их, испытывая при этом замедление (рис. 19.6). Существование корней гор подтверждается гравиметрическими исследованиями и дисперсией поверхностных сейсмических волн.

Как было установлено, гранитный слой под горами и высокими плато толще, чем под низменностями, но имеются и исключения. На разрезах через территорию США хорошо видны вариации мощности коры (рис. 19.7). Максимальная известная мощность коры – около 70 км – установлена под Гималаями и под Тибетским плато, где Индийская литосферная плита поддвигается на север под Азиатскую (обе плиты – континентальные).

Океаническая кора. Земная кора под океанами состоит из 1) низкоскоростного слоя глубоководных осадков, толщина которого в Тихом океане составляет 300–400 м, а в Атлантическом океане – 600–700 м, 2) слоя со средней скоростью, называемого фундаментом, который имеет мощность около 0,8 км и сложен потоками базальтовой лавы с тонкими крепкими прослоями уплотненных осадков, и 3) базального, или океанического, слоя мощностью 4,1–5,8 км, имеющего плотность и скорость базальта (рис. 19.8). Океанический базальт образуется в спрединговых срединно-океанических хребтах, поэтому считается, что и океанический слой в целом имеет именно такое происхождение.

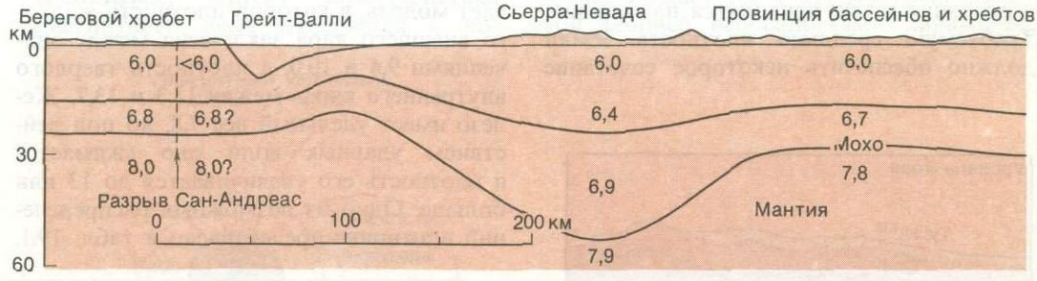


РИС. 19.6

Сейсмический разрез (по методу преломленных волн) через Береговой хребет Калифорнии, Большую Калифорнийскую долину (Грейт-Валли), хребты Сьерра-Невады и часть Большого Бассейна (Провинция бассейнов и хребтов). Числа указывают сейсмические скорости (км/с). Вертикальный масштаб преувеличен приблизительно в 12 раз. Хорошо видно утолщение коры под Сьерра-Невадой. (По Бетману и Итону, 1967.)

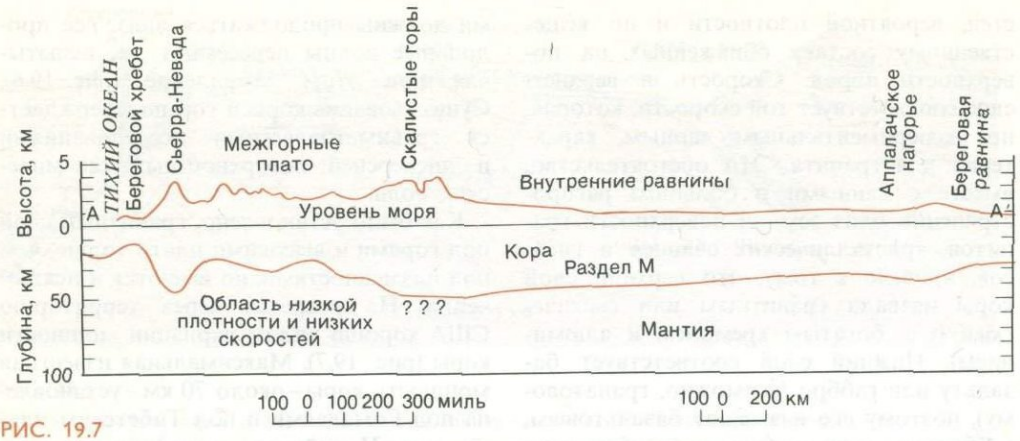


РИС. 19.7

Профиль коры и раздела Мохоровичича через территорию США по данным сейсмических исследований методом преломленных волн. (По Пекайзеру.)

Сиалические породы, которые были бы похожи на породы континентальной коры, отсутствуют. Трехслойная океаническая кора обычно имеет мощность 5–8 км.

ПЛОТНОСТЬ

Плотность Земли в целом равна 5,52. Средняя плотность пород большей части земной коры составляет 2,65, и эти породы недостаточно сжимаемы, даже при громадных давлениях, господствующих в недрах Земли, чтобы достичь на какой бы то ни было глубине плотности 5,52. Поэтому материал глубинных областей Земли должен иметь другой состав.

Поскольку на долю коры и ядра приходится только 1,5 и 16,2% объема Земли соответственно, основной объем (82,3%) и основная масса приходятся на мантию. Требуемую среднюю плотность Земли должно обеспечить некоторое сочетание умеренно тяжелой мантии и исключительно тяжелого железоникелевого ядра.

В 1968 г. были проведены вычисления (с помощью ЭВМ) различных вариантов внутреннего строения Земли. Для скоростей сейсмических волн и распределения плотности в мантии использовалась программа случайных чисел. В результате этих вычислений было получено 5 млн. моделей. Шесть из них удовлетворяли известным фактам, но только три были правдоподобными. Наилучшее согласие дает модель, в которой плотность жидкого внешнего ядра заключена между значениями 9,4 и 10,0, а плотность твердого внутреннего ядра – между 13,3 и 13,7. Железо имеет удельный вес 7,8, но под действием ударных волн оно сжимается и плотность его увеличивается до 13 или больше. Одно из возможных распределений плотности представлено в табл. 19.1.



РИС. 19.8

Схема трехслойного строения океанической коры.

МАГНЕТИЗМ

Земля действует как гигантский магнит. Под влиянием земного магнетизма стрелка компаса устанавливается параллельно геомагнитному полю и указывает на магнитные полюсы Земли.

Геомагнитное поле дипольное, но магнитные полюсы Земли не совпадают с полюсами вращения, т. е. с истинными Северным и Южным полюсами Земли (рис. 19.9). Угол между магнитной осью и осью вращения составляет около $11\frac{1}{2}^\circ$. Северный магнитный полюс находится среди островов северной Канады и имеет координаты 70° с. ш., 100° з. д., а южный магнитный полюс располагается в Антарктиде у 68° ю. ш., 143° в. д. В течение последнего столетия наблюдалось блуждание северного магнитного полюса в пределах нескольких сотен километров от среднего положения.

Склонение. Ввиду того что магнитный и географический полюсы не совпадают, стрелка компаса не указывает на истинный север или юг нигде, кроме как на одной линии, пересекающей восточную часть территории США в северо-северо-западном направлении (рис. 19.10). Это *линия нулевого склонения*. К востоку и к западу от нее стрелка компаса образует с географическим меридианом некоторый угол, называемый магнитным склонением. Повторные измерения показывают, что склонение постепенно смещается к западу («западный дрейф») со скоростью около 2° за 100 лет.

Наклонение. Другая характеристика геомагнитного поля измеряется с помощью магнитного инклинометра — стрелки, колеблющейся около градуированной вертикальной шкалы. Она указывает угол наклонения, определяемый как угол между магнитными силовыми линиями (рис. 19.9) и горизонтальной плоскостью.

Как на показания обычного компаса, так и на показания инклинометра накладывается влияние местного магнитного притяжения, связанного, например, с породами, богатыми магнетитом. Следовательно, инклинометр можно использовать для обнаружения ценной железной руды, даже когда она скрыта под водой, под ледниковыми наносами или речным аллювием. Магниторазведочные работы теперь производятся быстро: с помощью приборов, установленных на низко летящем самолете или буксируемых судном в море.

Происхождение магнитного поля Земли. Предполагается, что постоянное магнитное поле Земли возникает под действием сложной системы электрических токов, сопровождающих турбулентную конвекцию в жидком внешнем ядре. Следовательно, Земля работает как динамомашина, в которой механическая энергия этой конвекционной системы генерирует электрические токи и связанный с ними магнетизм. Блуждание магнитного полюса, западный дрейф, местные и кратковременные неправильные изменения, или вариации, напряженности магнитного поля — все согласуется с предсказываемыми этой теорией особенностями динамиче-



РИС. 19.9
Схема относительного расположения магнитных и географических полюсов Земли.

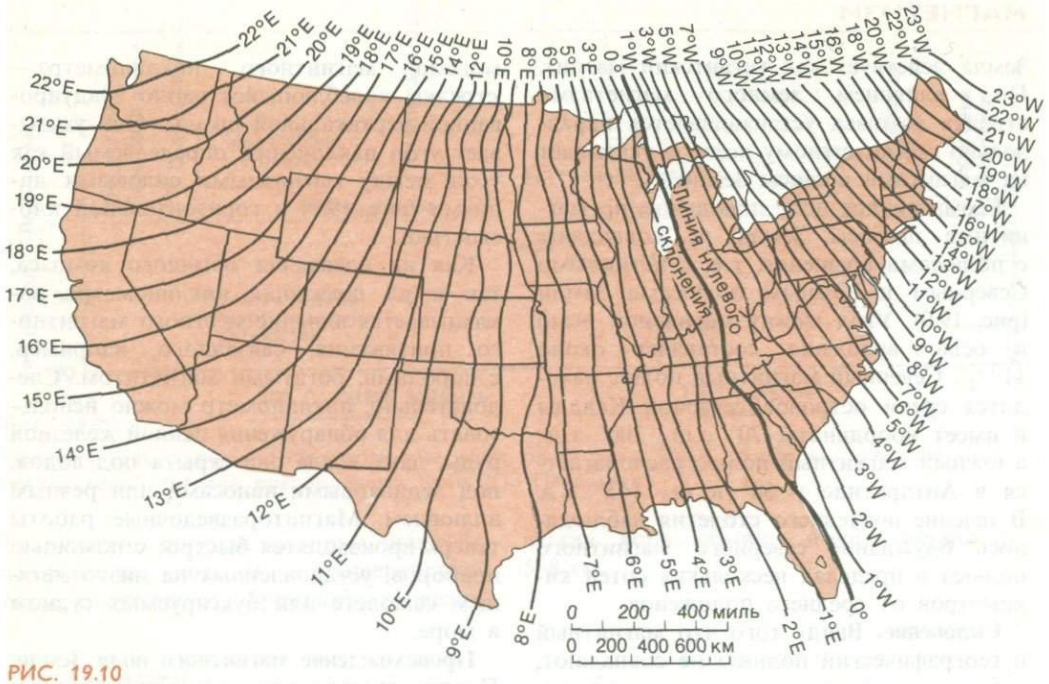


РИС. 19.10

Карта изогон магнитного склонения для территории США. К востоку от линии нулевого *склонения северный конец стрелки компаса указывает западнее истинного направления на* север, а к западу – несколько восточнее этого направления. (Атлас Геологической службы США.)

ского возбуждения. Главной проблемой является источник тепловой энергии, которая могла бы вызвать конвекцию в земном ядре, где, вероятно, очень мало или совсем нет радиоактивных элементов. Существуют три возможности: 1) на границе между внутренним и внешним *ядром происходит медленная кристаллизация* железа, в результате чего выделяется тепло; 2) железо опускается из мантии вниз, при этом высвобождается гравитационная энергия; 3) тепло выделяется при фазовых изменениях, сопровождающих гипотетическое расширение Земли.

Намагничение горных пород. Лавовые потоки, дайки, силлы и другие тела магматических пород, содержащих магнетит, при охлаждении в магнитном поле Земли намагничиваются. Таким образом, недавно выкристаллизовавшийся базальт, содержащий 1 или 2% магнетита, при охлаждении ниже некоторой критической температуры (называемой *температурой* или точкой *Кюри*) слабо намагничивается в направлении общего магнитного поля, господствующего в данное время. Кристаллы магнетита действуют как крошечные стрелки компаса. Это намагничение сохраняется в «замороженном» естественном магнетизме горных пород. При эрозии магнитных пород крошечные *намагниченные частицы проходят* через цикл транспортировки и отложения осадка. Во время осадконакопления магнитные зерна ориентируются вдоль геомагнитного поля, в результате чего осадок и образующаяся затем осадочная порода приобретают естественную остаточную намагниченность, по которой можно определить время образования этой породы.

Изменение намагниченности горных пород. Естественная намагниченность меняется при выветривании горных пород, при ударах молнии, под действием магнитной индукции от геомагнитного поля, *не совпадающего с первоначальным* намагничением, при нагревании в условиях

изменившегося залегания (нагревание может быть связано, например, с внедрением магматической интрузии) или в результате метаморфизма породы на большой глубине в недрах Земли. В некоторых случаях такие изменения, если они не слишком велики, можно учесть путем специальной обработки образцов в лаборатории.

Отбор образцов и измерение магнитных свойств. Из-за возможности изменения магнитных свойств отбор образцов для измерения естественной намагниченности обычно ограничивается свежими, хорошо намагниченными породами в тектонически спокойных областях. Залегание каждого образца отмечается в поле в естественном положении линией, указывающей направление меридиана; проводится также горизонтальная линия и отмечается угол падения пласта (если пласт не горизонтальный).

Намагниченность ориентированного образца измеряется в лаборатории с помощью очень чувствительного магнитометра, а в поле – с помощью портативного прибора. В результате измерений устанавливается склонение и наклонение магнитного поля во время первоначального намагничения породы.

Положение древнего магнитного полюса. Древняя намагниченность пород служит как бы ископаемым компасом, указывающим положение магнитного полюса в то время, когда образовалась данная порода. Если допустить, что геомагнитное поле всегда было дипольным и что магнитный полюс и географический полюс (полюс вращения), несмотря на их современное расхождение на $11\,^1/_2{}^\circ$, в геологическом прошлом в общем совпадали, то по измеренным углам склонения и наклонения можно определить прежнее положение полюсов (рис. 19.11, 19.12). Определения, выполненные для последнего 1 млн. лет (рис. 19.11) на породах, возраст которых установлен с помощью калий-аргонового метода, показали, что древние полюсы группируются около нынешнего положения. Тем самым подтверждается предположение о дипольном и геоцентрическом характере магнитного поля в прошлом. Позднетретичные породы показывают среднее отклонение около 5°, а более древние породы обнаруживают гораздо большее расхождение. Сравнение сотен определений магнитного полюса на породах от докембрийского до кайнозойского возраста показывает, что прошлые положения полюса, несмотря на разброс в десятки градусов, довольно хорошо совпадают для каждого континента, но сильно различаются от одного континента к другому (рис. 19.12). Складывается впечатление, что с течением геологического времени оба северных полюса – магнитный и географический – перемещались из западных районов Тихого океана через Восточную Азию к их нынешнему положению. Скорость движения была около 3 см/год.

Что происходило на самом деле: блуждали ли полюсы или двигались материки? Из-за того что вращение Земли обладает громадной инерцией, как у гигантского гироскопа, трудно вообразить, что возможно какое бы то ни было изменение географического положения полюсов,

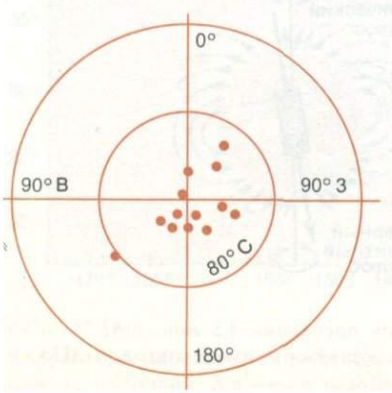


РИС. 19.11

Положение магнитного полюса в позднем плейстоцене и в современную эпоху. Прежние полюсы группируются около географического полюса (центр схемы), а не около современного магнитного полюса. (По Коксу и Доллу, 1960.)

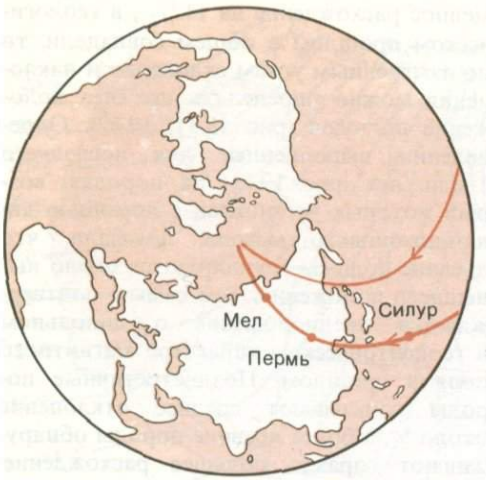


РИС. 19.12

Кажущееся перемещение магнитного полюса начиная с раннего палеозоя до современной эпохи. Жирной линией обозначен путь полюса по определениям для Северной Америки, тонкой линией – по определениям для Европы. (По Ранкорну.)

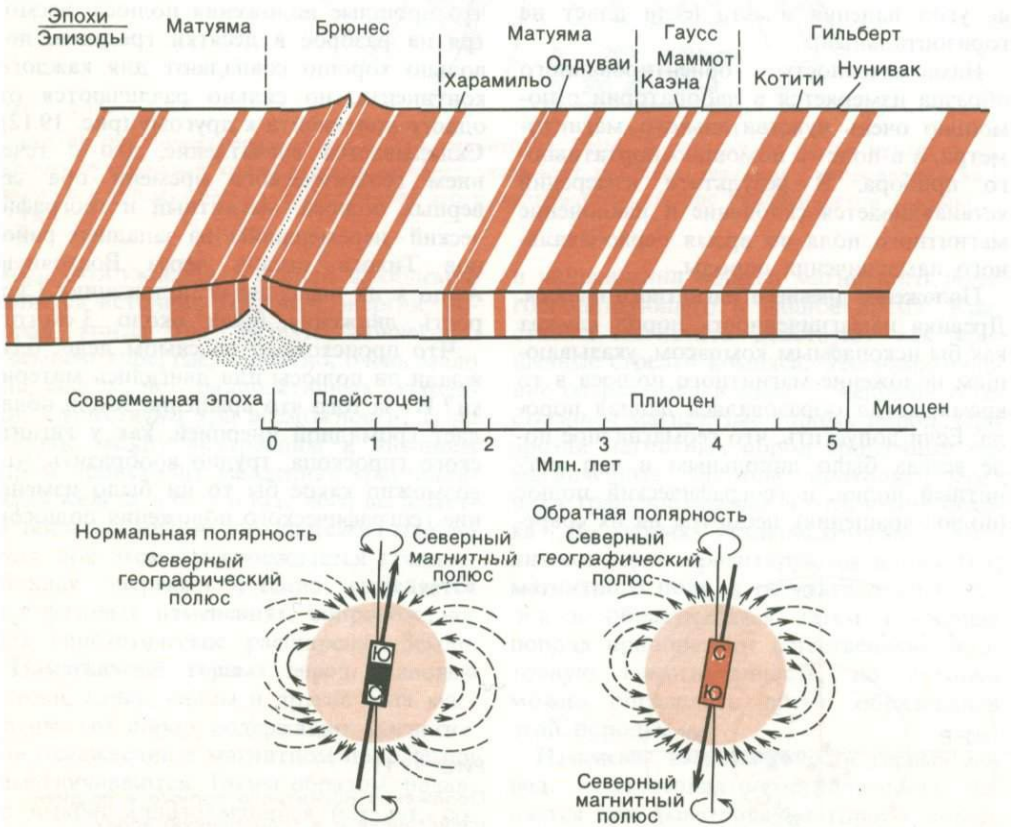


РИС. 19.13

Геохронологическая шкала инверсий магнитного поля для последних 4,5 млн. лет. Получена по материалам изучения пород, датированных калий-аргоновым методом. (По Коксу, 1969.)

хотя на первых порах казалось, что имеющиеся данные как будто бы подтверждают это предположение. Теперь вместо этого мы принимаем концепцию дифференциального континентального дрейфа. Часто, например, высказывалось предположение об отделении обоих Американских материков от Европы и Африки. Пути миграции полюсов, построенные для Северной Америки и Европы, различаются на 20–30°, что служит веским аргументом в пользу разделения континентов. Если эти два материка разошлись в разные стороны, то никакого движения полюсов не требуется. Механизм континентального дрейфа при спрединге океанического дна мы обсудим позже.

Магнитные аномалии. Магнитная аномалия – это местное отклонение от регионального среднего значения магнитного поля. На суше аномалии связаны с типом и строением горных пород. Эти аномалии помогают находить железную руду и обнаруживать структуры, содержащие другие полезные ископаемые.

В океанах аномалии вызываются многократными изменениями (инверсиями) полярности (рис. 19.13). На обширных площадях океанического дна обнаружены магнитные аномалии, которые образуют систему параллельных полос чередующегося знака, ориентированных субмеридионально (рис. 19.14). Полосы интенсивных положительных (соответствующих современной полярности) и отрицательных аномалий протягиваются и вдоль срединно-океанических хребтов. Они образовались в результате подъема новой лавы и ее остывания в магнитном поле – нормальном или обращенном, смотря по тому, какое преобладало в то время, – и в результате последующего раздвигания морского дна в стороны от хребта, где эти лавы появились «на свет» (рис. 19.15). Аномалии представляют собой как бы захороненную историю инверсий магнитного поля и спрединга морского дна. Одна система полосовых магнитных аномалий чередующейся полярности, образующих пары, симме-

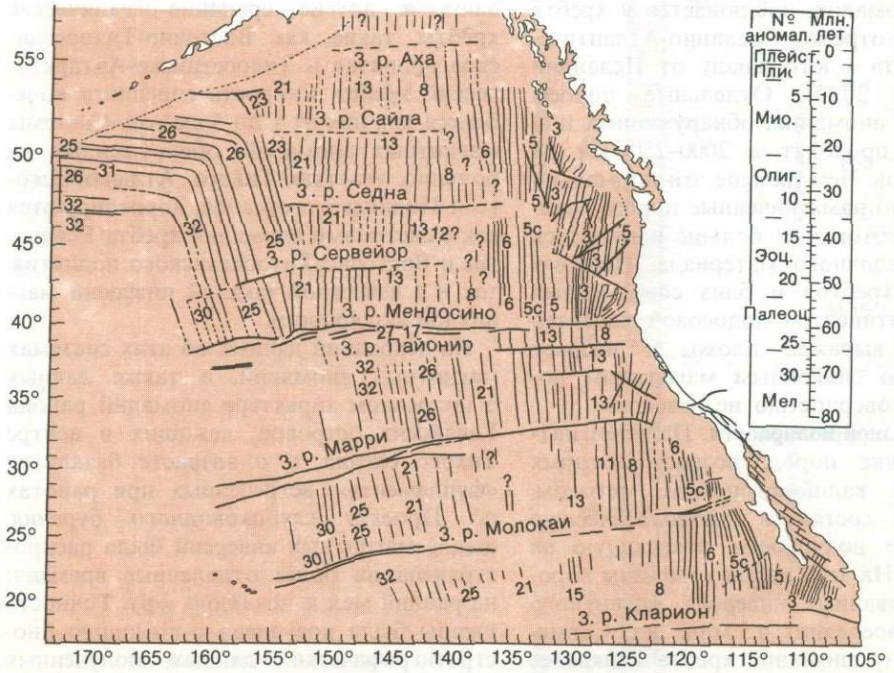


РИС. 19.14

Корреляция полосовых магнитных аномалий на северо-востоке Тихого океана. Обозначены номера аномалий. З.р. – зона разломов. (По Отуотеру, 1970.)

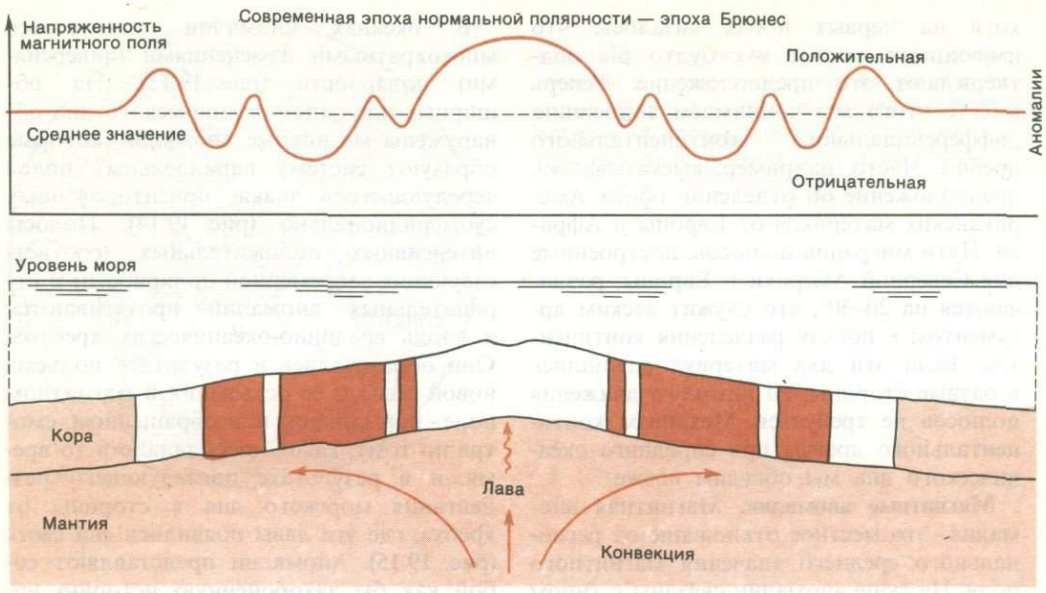


РИС. 19.15

Магнитные аномалии по профилю, пересекающему срединно-океанический хребет. (По Уилли, 1972.)

тричные относительно интенсивной срединной аномалии, наблюдается у хребта Рейкьянес – отрезка Срединно-Атлантического хребта к юго-западу от Исландии (рис. 19.16, 20.15). Отдельные полосы в системах аномалий, обнаруженных под океанами, проходят в 2000–2500 км от осей хребтов. Чем дальше эти нормально или обратно намагниченные породы отошли от хребтов, тем больше накопилось на них осадочного материала. Поэтому вдали от хребтов и близ современных границ континентов полосовой характер аномалий выражен плохо, и возраст участков со спокойным магнитным полем с достоверностью не известен.

Эпохи разной полярности. Палеомагнитное изучение пород, возраст которых установлен калий-аргоновым методом, позволило составить хронологическую шкалу эпох полярности, показанную на рис. 19.13. На этой шкале отмечены хорошо датированные инверсии магнитного поля для последних 4,5 млн. лет. Совмещая систему аномалий хребта Рейкьянес со шкалой полярности для 4,5 млн. лет (рис. 19.13), получаем скорость спрединга 1 см/год. Похожие линейно вытянутые полосы магнитных аномалий ограничивают и другие срединно-океанические хребты, такие, как Восточно-Тихоокеанское поднятие и Тихоокеанско-Антарктический хребет. Скорость спрединга колеблется для них от 1 до 5 см/год. Системы магнитных аномалий, обнаруженных на больших участках Тихого, Атлантического и Индийского океанов, коррелируются как с системами аномалий хребта Рейкьянес и Восточно-Тихоокеанского поднятия, так и с известной шкалой инверсий магнитной полярности.

На основании данных об этих системах магнитных аномалий, а также данных о полосовом характере аномалий района Гавайских островов, лежащих в центре Тихого океана, и о возрасте базальтов «фундамента», встреченных при работах по Проекту глубоководного бурения, шкала магнитных инверсий была распространена на более отдаленные времена: на ранний мел и позднюю юру. Точность шкалы была повышена с помощью биостратиграфических данных, полученных при глубоководном бурении, и путем повторной калибровки по хорошо датированным магнитным аномалиям. Теперь

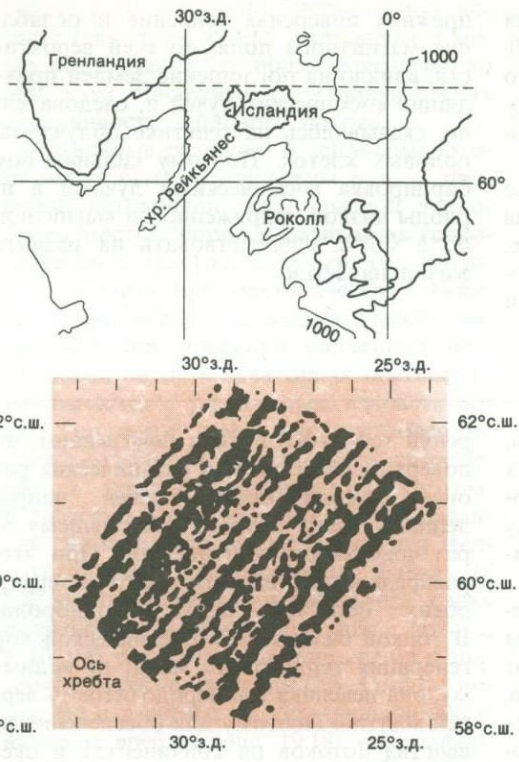


РИС. 19.16
Магнитные аномалии в районе хребта Рейкьянес, к юго-западу от Исландии, симметрично парные относительно срединной оси. Осевая положительная аномалия коррелируется с современной эпохой магнитной полярности, а другие аномалии, по мере удаления от оси хребта, – с последовательно все более древними эпохами. (По Вайну, 1966.)

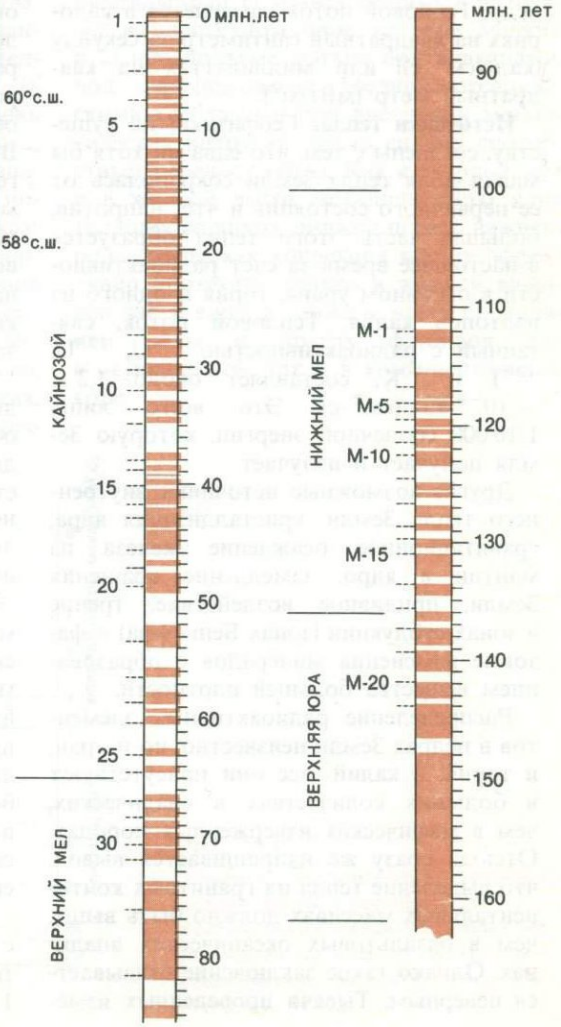


РИС. 19.17
Шкала инверсий геомагнитного поля для последних 162 млн. лет – от поздней юры до современной эпохи. (По Ларсону и Питману, 1972.)

шкала охватывает период, начинающийся с возраста 162 млн. лет назад (рис. 19.17). Таким образом, спрединг океанического дна – явление в жизни Земли не новое, хотя оно и было открыто только в 60-х годах нынешнего столетия.

С 1838 г. напряженность магнитного поля Земли убывает приблизительно на 4% за столетие. Можно предположить, что этот процесс ведет к смене полярности – к инверсии. Происходившее при прежних инверсиях усиление и ослабление магнитного поля, по всей вероятности, влияло на поглощение Землей приходящих космических лучей и, следовательно, сказывалось на генетике облучаемых половых клеток. Поэтому сильная бомбардировка космическими лучами в периоды низкой напряженности магнитного поля могла воздействовать на развитие жизни на Земле.

ТЕПЛОВОЙ ПОТОК

Тепловой поток – это количество тепла, выносимого к поверхности из земных недр. Тепловой поток измеряется в калориях на квадратный сантиметр за секунду (кал/(см^2·с)) или милливаттах на квадратный метр (мВт/м^2).

Источники тепла. Геофизики, по существу, согласны с тем, что едва ли хотя бы малая доля тепла Земли сохранилась от ее первичного состояния и что, напротив, бóльшая часть этого тепла образуется в настоящее время за счет радиоактивности в основном урана, тория и одного из изотопов калия. Тепловой поток, связанный с радиоактивностью ^{235}U, ^{238}U, ^{232}T и ^{40}K, составляет около $1{,}2 \times 10^{-6}$ кал/(см^2·с). Это всего лишь 1/10 000 солнечной энергии, которую Земля получает и излучает.

Другие возможные источники внутреннего тепла Земли – кристаллизация ядра, гравитационное осаждение железа из мантии в ядро, замедление вращения Земли, приливное воздействие, трение в зонах субдукции (зонах Беньоффа) и фазовые изменения минералов с образованием вещества большей плотности.

Распределение радиоактивных элементов в недрах Земли неизвестно, но и уран, и торий, и калий – все они присутствуют в бóльших количествах в сиалических, чем в мафических изверженных породах. Отсюда сразу же напрашивается вывод, что выделение тепла на гранитных континентальных массивах должно быть выше, чем в базальтовых океанических впадинах. Однако такое заключение оказывается неверным. Тысячи проведенных измерений теплового потока показывают, что поверхностный поток в океанических районах приблизительно равен направленному вверх потоку, проходящему через поверхность континентов. При этом распределение теплового потока внутри обеих областей очень неоднородно. В тонкой базальтовой океанической коре генерация тепла очень мала; по-видимому, она невелика и в перидотитовой верхней мантии. Поэтому для обеспечения равенства потоков на континентах и океанах необходимо поступление какого-то количества тепла из более глубоких горизонтов Земли.

Измерение теплового потока. Для определения величины теплового потока необходимо измерить температурный градиент вдоль изучаемого вертикального столба горной породы и теплопроводность этой породы на данном интервале. Единица теплового потока, сокращенно обозначаемая е.т.п. (1 е.т.п. = $= 1 \cdot 10^{-6}$ кал/(см^2·с)), равняется (в системе СИ.– *Перев.*) 41,87 мВт/м^2. При морских измерениях электронные термометры погружают в мягкий слой осадков или монтируют вместе со специальным пробоотборником в устройстве для бурения скважин. На суше для установки приборов и изучения теплопроводности можно использовать нефтяные и газовые скважины, шахты, туннели и специальные скважины.

Около 5000 измерений, выполненных с 1950 по 1969 г., дали среднее значение теплового потока для материков 1,41 е.т.п., а для океанов – 1,42 е.т.п.

Около 2800 измерений, проведенных позднее (две трети из них выполнены в море), подтвердили это общее равенство, но при этом обнаружилась и значительная изменчивость теплового потока.

Локальные различия в тепловом потоке могут быть обусловлены разной природой источников тепла, разной теплопроводностью пород и разным их геологическим возрастом, нарушениями теплового режима при орогенических движениях, при внедрении магматических пород или при миграции подземных вод. Тепловой поток в акваториях постепенно уменьшается с увеличением возраста пород, по мере того как литосферные плиты отходят от места своего зарождения в срединно-океанических хребтах. В геотермальных областях Новой Зеландии, Японии, Италии, Исландии и в Йеллоустонском национальном парке (в США) встречены, как и ожидалось, очень высокие значения теплового потока, в 10–100 раз превышающие средние значения. Высокие значения (2,5–8 е. т. п.) получены и в осевых частях срединно-океанических хребтов (рис. 19.18), в Калифорнийском заливе и в Провинции бассейнов и хребтов. Напротив, для районов докембрийских щитов и для глубоководных желобов Тихого океана характерны низкие значения теплового потока. На участках, которые 6–10 тыс. лет назад были покрыты материковыми ледниками, все еще наблюдаются последствия охлаждения до глубины 2000 м и более.

Передача тепла. Как было отмечено в гл. 3. тепло, генерируемое внутри Земли, передается через горные породы посредством теплопроводности, излучения, конвекции и путем циркуляции флюидов. Породы – плохие проводники тепла и, значит, хорошие изоляторы. Следовательно, скорость теплопереноса в них очень низкая. Перенос тепла через твердое вещество посредством излучения при высоких температурах возрастает, поэтому данный процесс может играть важную роль на исключительно больших глубинах в недрах Земли. Массоперенос, осуществляемый 1) конвекционными потоками в пластичном слое верхней мантии и 2) при подъеме магмы под вулканами, под спрединговыми срединно-океаническими хребтами и при внедрении магматических интрузий, очень сильно способствует переносу тепла. Как в твердой, так и в жидкой части металлического ядра теплопроводность должна играть важную роль, тогда как конвекция может эффективно протекать только в жидкой внешней части ядра, а также в зонах циркуляции воды и других флюидов как в океанической, так и в континентальной коре.

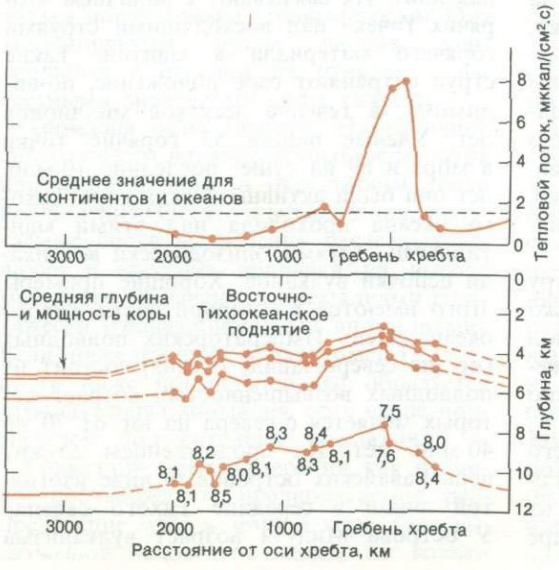


РИС. 19.18
Характер распределения теплового потока вдоль профиля через Восточно-Тихоокеанское поднятие. Ряд чисел на нижней диаграмме – сейсмические скорости (км/с). (По Менарду, 1964.)

В результате проведенных в 1973–1974 гг. исследований по Франко-Американскому проекту изучения срединно-океанических хребтов (проект FAMOUS) был исследован процесс остывания литосферы Срединно-Атлантического хребта у Азорских островов. Всего вдоль рифта и связанных с ним долин трансформных разрывов тепловой поток был измерен на 101 станции. Среднее значение теплового потока оказалось на 5 е. т. п. с лишним меньше, чем ожидалось. В зоне трансформного разрыва значения колебались от 0,4 до 15,4 е. т. п., очевидно, под влиянием циркуляции горячих вод. Такой же разброс значений был отмечен в Красном море, где тепловой поток во внутреннем рифте примерно в 6 раз превышает среднее значение. Похоже, что гидротермальное охлаждение, которое происходит быстрее, чем под действием теплопроводности, играет роль главного первичного агента охлаждения в тектонически активных областях океанической коры. В дальнейшем чехол осадков толщиной в десятки метров мешает проникновению морской воды в кору, и кондуктивное охлаждение начинает преобладать над гидротермальной деятельностью.

Нам неизвестно, что происходит сейчас с Землей: остывает ли она, достигла ли устойчивого состояния или постепенно разогревается. Спустя почти 5 млрд. лет роль радиоактивных источников тепла должна ослабнуть, но другие источники, такие, как экзотермические фазовые изменения или продолжающееся образование ядра, по-видимому, сохранят важное значение. Так или иначе, внутреннее тепло Земли – это огромный источник энергии, вызывающей вулканизм, землетрясения, тектонические движения и природный нагрев грунтовых вод и нефти.

Температура на глубине. Температуру в недрах Земли можно оценить только косвенным путем. Подсчитано, что под тяжестью вышележащего материала железо на границе мантии и ядра должно плавиться при температуре около 3700°С, а на границе внешнего и внутреннего ядра – при температуре около 4300°С. Если земное ядро состоит в основном из железа, расплавленного во внешнем ядре и твердого в центре, то температура большей части ядра должна колебаться, по грубой оценке, где-то между 4000 и 5000°С.

Температура мантии, по-видимому, более или менее закономерно понижается кверху. Поскольку мантия целиком твердая, за исключением, возможно, небольшой части слоя низких скоростей, ее температура должна всюду оставаться ниже точки плавления какого бы то ни было вещества, находящегося на различных глубинах. Точный состав мантии неизвестен, поэтому и температура плавления не выяснена. В отдельных местах и в отдельные периоды появляется базальтовая магма: она возникает на глубине 40–200 км и изливается в виде лавы с температурой 1000–1200°С. Лабораторные испытания показывают, что на глубине 50 км точка плавления находится около 1100°С, на глубине 125 км – около 1200°С, а на глубине 250 км – около 1500°С. Таким образом, температура у подошвы литосферной плиты толщиной около 125 км оценивается значениями 1350 ± 275°С в зависимости от температуры начала плавления в слое низких скоростей. На эту температуру влияет содержание гидратной или свободной воды.

Горячие точки. Кроме вулканов, расположенных вдоль границ плит, имеются тысячи вулканов и во внутренних районах плит. Их связывают с наличием «горячих точек» над восходящими струями горячего материала в мантии. Такие струи сохраняют свое положение, по-видимому, в течение десятков миллионов лет. Ученые нашли 53 горячие точки в море и 69 на суше; последние 10 млн. лет они были активны. Когда кора Тихого океана проходила над этими мантийными струями, эпизодически возникали цепочки вулканов. Хорошие примеры этого имеются в северной части Тихого океана. Цепь Императорских подводных гор (на северо-западе океана) состоит из подводных возвышенностей, возраст которых меняется с севера на юг от 70 до 40 млн. лет. Их продолжением служит цепь Гавайских островов (в виде изогнутой линии в середине Тихого океана). У острова Мидуэй возраст вулканизма

составляет 25 млн. лет, а на юго-восточном конце цепи, на острове Гавайи, вулканизм продолжается в настоящее время. Предполагаемое движение плит подтверждается распространением тропических пелагических осадков в северных широтах и результатами глубоководного бурения на четырех из Императорских подводных гор, где скважины вошли в морские осадки и подстилающие субаэральные базальты. Бурением были обнаружены коралловые рифы, тепловодные и мелководные осадки с остатками ископаемых организмов палеоценового и эоценового возраста, не отлагающиеся в настоящее время в данном районе. Вулканы после своего образования погрузились в море в виде гийотов – вулканических гор с плоскими вершинами, которые когда-то располагались у поверхности моря. Вышележащие миоценовые и плиоценовые отложения содержат холодноводную ископаемую фауну. Магнитная ориентировка базальтов подводной горы Суико (самой северной из разбуренных), находящейся у 45° с.ш., указывает на их образование около 25° с.ш. Скорость перемещения плиты составляет приблизительно 9 см/год. Оценка скорости движения по перемещенным кораллам дает примерно такие же значения.

СИЛА ТЯЖЕСТИ ЗЕМЛИ

Измерение силы тяжести. Для измерения гравитационного притяжения в различных местах земной поверхности можно использовать маятник. Период колебаний маятника определенной длины зависит от местного значения силы тяжести, а она зависит от высоты, от широты местности и от массы материала, находящегося непосредственно под маятником. Чем сильнее притяжение, тем быстрее колебания маятника. Измерения маятниковым методом громоздки и медленны, поэтому для работы в поле стали пользоваться портативными гравиметрами. Они эталонируются путем частых контрольных измерений на пунктах с известными значениями силы тяжести.

Аномалии силы тяжести. На величину силы тяжести влияет местный недостаток или избыток масс в окрестности точки наблюдения. Остаточные значения, получаемые после вычисления расчетных величин и внесения поправки на высоту местности, называются аномалиями силы тяжести (гравитационными аномалиями). Если нижележащие массы имеют плотность ниже нормальной, то образуется отрицательная аномалия, если выше нормальной – положительная аномалия.

Гравитационные измерения, как правило, подтверждают предполагаемое распределение масс в земной коре. Они показывают недостаток массы не только под горами, но также в самих материках или под ними. Из этого делают вывод, что материки и горы приподняты потому, что они представляют собой только верхние части массивов пород со сравнительно низкой плотностью, а это в свою очередь подтверждает существование корней гор. Хотя имеется много локальных аномалий силы тяжести, они, как правило, компенсируют друг друга при осреднении на площадях диаметром 100–150 км. Неоднородное распределение масс в различных районах Земли заметно сказывается на орбитах искусственных спутников. В гл. 2 отмечено, что такие же аномалии, вызванные наличием «масконов», обнаружены на Луне.

Изостатическое равновесие. Измерения силы тяжести, выполненные на суше и в море, показывают, что континенты и океаны находятся в состоянии равновесия. Уравновешены даже области меньшего размера. Объясняя это соотношение, теория изостазии утверждает, что различные массивы, составляющие земную кору, образуют на некоторой глубине внутри Земли равновесную плавающую систему. Эта глубина достигается там, где вес (функция силы тяжести) каждого блока породы с одинаковой площадью поперечного сечения становится одним и тем же независимо от того, что́ находится на поверхности: горы или до-

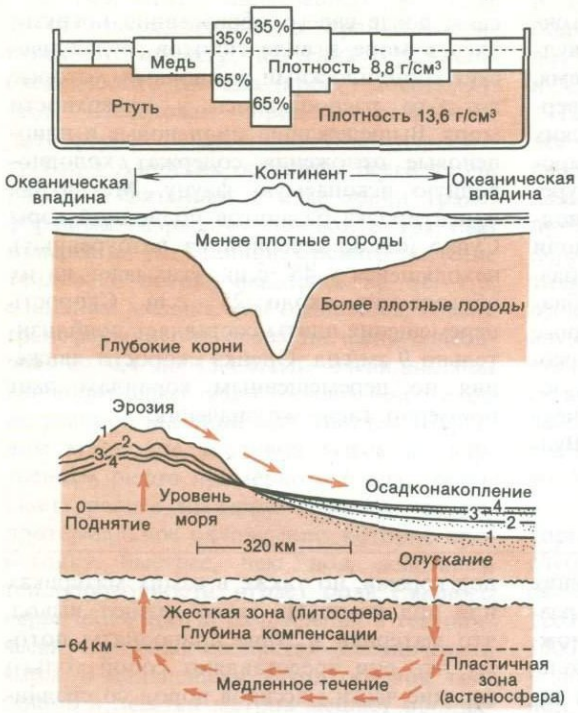


РИС. 19.19
Изостазия. Верхние схемы иллюстрируют представление о строении земной коры согласно теории изостазии, предложенной Эри. Нижняя схема показывает, как на участке земной коры в ходе эрозии и осадконакопления осуществляется изостатическая компенсация. (По Штралеру: *Strahler*, 1971, The Earth Sciences, 2d ed., copyright 1963, 1971 by Arthur N. Strahler. Воспроизводится с разрешения компании Harper and Row. Publ., Inc.)

лины, мелкие или глубокие моря (рис. 19.19). Районы со сравнительно высокими горами, очевидно, плавают на подстилающем их субстрате, как айсберги в море, потому что они легкие и плавучие; океанические же котловины опущены потому, что под ними находятся сравнительно тяжелые породы. Несмотря на различие высотных отметок поверхности каждого блока, массы всех блоков единичного сечения оказываются одинаковыми благодаря обратному соотношению значений средней плотности (т. е. блоки с большим объемом имеют низкую плотность, а блоки с малым объемом – высокую).

Если общее равновесие нарушается, как, например, при непрерывной и длительной эрозии континента, потеря массы компенсируется, вероятно, пластическим течением более тяжелого вещества в область под этим континентом. Перетекание происходит, по всей видимости, в слое низких скоростей в мантии. Такой процесс, заставляющий континенты медленно подниматься одновременно с развитием эрозии, способствует поддержанию равновесия. Это приспособление коры к новым условиям называется изостатической компенсацией (рис. 19.19).

Насколько точно осуществляется изостатическая компенсация и сразу ли она начинается, неизвестно. Хотя бóльшая часть Земли жесткая и может в течение длительного времени накапливать упругую деформацию, в конце концов Земля принимает форму в соответствии с теорией изостазии, однако, возможно, с некоторым запаздыванием и не очень точно. Данные, получаемые с помощью искусственных спутников, показывают, например, что полярное сжатие нашей планеты и экваториальное вздутие несколько больше, чем они должны были бы быть при современной скорости вращения Земли. Кроме того, в областях океанических желобов и современных поднятий коры существуют крупные отрицательные аномалии. С другой стороны, лавовое плато Снейк-Ривер в шт. Айдахо – это одна из областей с положительной гравитационной аномалией, вызванной тяжелыми породами.

Большая нагрузка, действующая на ту

или иную обширную область земной коры, приводит к возникновению вертикальных движений коры. Хорошо установлено, что плейстоценовое оледенение, охватившее значительные части земной поверхности, вызвало опускание суши под весом материковых ледников на сотни метров. После того как лед растаял и нагрузка исчезла, началось частичное приспособление коры к новым условиям путем поднятия, которое шло последние 10 тыс. лет и продолжается в настоящее время. Об этом воздымании коры говорят поднятые ныне участки морского побережья, на которых раньше располагались отдельные ледяные шапки (табл. 19.2).

Таблица 19.2

Воздымание областей, частично или полностью освободившихся от ледникового покрова

Область	*Максимальное поднятие, м*
Восточный Лабрадор	270
Ньюфаундленд	137
Фенноскандия	274
Исландия	119
Шотландия	30
Новая Зеландия, остров Южный	101

Важное значение имеют наблюдения и измерения, выполненные в Фенноскандии в историческое время. Пресноводные болота и низменные пастбища вдоль берегов Балтийского моря в Швеции и Финляндии содержат много морских ракушек, идентичных тем, которые встречаются сегодня в Балтийском море. Тщательное измерение высоты закрепленных реперов, установленных в разных местах побережья, показало, что этот низменный район Фенноскандии поднимается со скоростью около 1 м за столетие.

Сходным образом береговая линия бывших островов у середины бывшего озера Бонвиль в шт. Юта проходит в настоящее время по меньшей мере на 70 м выше береговой линии по периферии впадины этого озера (рис. 19.20). Это различие высот наглядно иллюстрирует про-

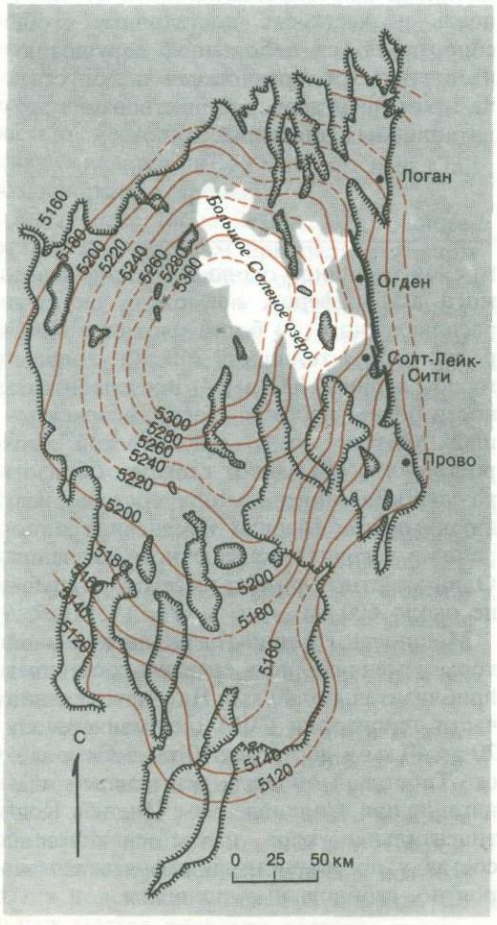


РИС. 19.20

Карта, показывающая изостатическое поднятие береговой линии бывшего озера Бонвиль в шт. Юта. Контур бывшего озера показан линией с зубчиками. Изолинии поднятия проведены через 20 футов. С востока впадина ограничена разрывами. (По Криттендену, 1963.)

цесс изостатического выравнивания ранее прогнутых участков коры.

Точно так же под тяжестью лавы Гавайских островов земная кора там прогнулась, что вызвало вздутие на морском дне в виде широкой дуги на некотором расстоянии от островов. В результате этих движений вокруг вулканических островов появилась похожая на ров впадина глубиной до 160 м. Подобные кольцевые депрессии встречаются вокруг многих тихоокеанских подводных гор и гийотов.

На многих участках береговой линии ледниковых водоемов в районе Великих озер можно видеть эффект наклона блоков земной коры при изостатическом выравнивании после снятия ледниковой нагрузки. Северные пляжи подняты на сотни метров, некоторые наклонены на юг, а южные берега погружены. Примеры этого имеются вдоль всего побережья современных озер. Пролив Макино продолжает подниматься примерно на 2 см за столетие.

С позиций изостазии трудно объяснить поднятие платообразных участков коры. Древние эрозионные поверхности длительное время оставались на небольших высотах, а затем поднялись на сотни и даже на тысячи метров. Как в этом случае происходила изостатическая компенсация? Представляется вероятным, что здесь изменялся не вес материала, а его объем. Возможно, это осуществлялось посредством превращения в верхней мантии 1) граната в плагиоклаз и оливин, что приводит к увеличению объема более чем на 10%, или 2) оливина в серпентин, что дает расширение на 25%.

Приведенные примеры изостатических движений позволяют сделать вывод, что, несмотря на некоторые загадочные несоответствия, Земля все же действительно реагирует спустя какое-то время на большие нагрузки глубинным компенсационным выравниванием, хотя ее прочность и жесткость достаточны, чтобы сопротивляться небольшим нарушениям изостатического равновесия и допускать на некоторый период существование гравитационных аномалий.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ

Сейсмические волны испытывают внутри Земли преломление, отражение, дифракцию и затухание. Изменения скорости и направления волн отмечают разделы у границ ядра, мантии и коры.

Внешняя граница ядра, которая не пересекается поперечными волнами и на которой происходит преломление продольных волн, создает теневое кольцо. Тот факт, что поперечные волны не передаются через ядро, объясняется расплавленным состоянием его внешней части толщиной около 2200 км. Раздел внутри ядра, где продольные волны снова приобретают высокую скорость, отмечает границу внутренней твердой части ядра, диаметр которой составляет около 2500 км.

Мантия, имеющая толщину приблизительно 2850 км, состоит из четырех частей: 1) высокоскоростного (8 км/с) слоя толщиной в десятки километров, называемого литосферой; 2) низкоскоростного слоя толщиной около 100 км, называемого астеносферой, возможно частично расплавленного; 3) более плотного однородного слоя толщиной 250 км, уходящего до глубины 400 км; 4) последовательности более глубоких слоев с возрастающей плотностью и сейсмической скоростью, что объясняют главным образом различиями минерального состава, возникшими при фазовых изменениях минералов в условиях повышенного давления. Один заметный раздел имеется на глубине около 600 км.

Мощность (толщина) континентальной коры изменчива, но в среднем составляет приблизительно 40 км. На значительной части территории США она меняется от 20 до 40 км и достигает 70 км в Гималайско-Тибетской области, испытавшей надвигание при столкновении с Индией. Континентальная кора имеет сиалический состав у поверхности и мафический (вероятно, габбровый) у подошвы.

Океаническая кора включает тонкий слой (менее 1 км) морских осадков, промежуточный «фундамент», состоящий из лавовых потоков с тонкими прослоями, и более мощный «океанический слой» базальтов. Общая мощность океанической коры около 5 км.

Средняя плотность Земли равна 5,52; в строении Земли участвуют легкая кора и верхняя мантия, умеренно плотная нижняя мантия и очень плотное ядро (плотность около 13).

Земля обладает сильным магнитным полем, которое генерируется, как полагают, движением материала в жидком внешнем ядре. Локальные магнитные аномалии используются для поисков железных руд и при выяснении глубинного строения. Широкое распространение имеют морские магнитные аномалии, возникающие при инверсиях магнитного поля и имеющие вид параллельных полос, которые формируются на спрединговых океанических хребтах. Спрединг океанического дна, происходящий со скоростью несколько сантиметров в год, прослеживается на 162 млн. лет назад (до позднеюрского времени).

Внутреннее тепло Земли, выделяющееся главным образом при радиоактивном распаде урана, тория и одного из изотопов калия, подходит к поверхности сравнительно медленно, но в измеримых количествах. Оно передается посредством теплопроводности, излучения, конвекции и циркуляции флюидов. Тепловой поток в море и на суше примерно одинаков, однако отмечаются и различия, характерные для срединно-океанических хребтов, геотермальных областей, океанических желобов и докембрийских щитов. Температура ядра достигает, по-видимому, 5000°С. Горячие точки, возникающие над восходящими струями в мантии, создают на движущихся плитах цепочки вулканов.

Измерения силы тяжести показывают, что континенты и горы, имеющие глубокие корни, занимают приподнятое положение потому, что содержат мощные толщи сравнительно легких пород, а океанические впадины опущены потому, что их подстилают тяжелые породы. Во многих местах локально развиты аномалии силы тяжести, но крупные области обычно сохраняют изостатическое равновесие. Дополнительная нагрузка на земную кору вызывает прогибание; при удалении нагрузки происходит изостатическое выравнивание.

Итак, мы *знаем*, что недра Земли 1) горячие, 2) плотные, 3) твердые (кроме внешнего ядра), 4) в высокой степени упругие, 5) находятся под большим давлением, 6) делятся на слои по сейсмическим скоростям, 7) вызывают земные приливы, 8) генерируют и очень медленно излучают тепло, 9) перекрыты – ближе к поверхности – легкими породами, 10) могут рассматриваться как состоящие из блоков, имеющих в разных местах разную плотность, 11) в крупных объемах изостатически уравновешены, 12) способны создавать магнитное поле.

Мы *предполагаем*, что 1) температурный градиент быстро убывает с глубиной; 2) разделение Земли на слои вызвано изменением состава и плотности; 3) тонкая, легкая, самая внешняя часть континентальной коры имеет сиалический состав, как у гранита; 4) бóльшая часть океанической коры имеет базальтовый состав; 5) верхняя часть массивного материала мантии состоит, вероятно, из оливина, пироксена, граната, а в нижней части имеются более плотные формы мафических минералов; 6) ядро имеет преимущественно железоникелевый состав; 7) плотность в центре Земли достигает 13; 8) глубоко залегающие, в основном твердые породы слоя низких скоростей поддаются изостатическим силам и при этом происходит главным образом пластическое течение материала. Мы думаем, кроме того, что тепло Земли образуется прежде всего за счет радиоактивности и что магма формируется в глубинных зонах (которые во всех иных местах обычно твердые) при достаточных для этого температуре, давлении и содержании воды.

Хотя многое в наших знаниях о недрах Земли имеет косвенный и неполный характер, сейсмологические и другие исследования уже дали нам нечто большее, чем просто намек на то, что же скрыто там, в таинственных глубинах.

ВОПРОСЫ

1. Как с помощью сейсмических волн были получены данные о существовании и природе ядра?
2. Начертите разрез Земли и укажите слои, на которые делится мантия и ядро. Перечислите характеристики каждого слоя.
3. Перечислите черты сходства и различия континентальной и океанической коры.
4. Как изучение земного магнетизма связано с нашим пониманием истории океанического дна?
5. Как генерируется тепло внутри Земли?
6. Какими способами передается тепло через внутренние области Земли?
7. Что говорят нам измерения силы тяжести о земной коре?

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Bolt B. A., 1973, The fine structure of the earth's crust, Sci. Amer., vol. 228, No. 3, pp. 24–33.

Burke K. C., Wilson J. T., 1976, Hot spots in the earth's surface, Sci, Amer., vol. 235, No. 2, pp. 46–57.

Chapman D. S., Pollack H. N., 1975, Global heat flow: A new look, Earth and Planet. Sci. Letters, vol. 28, pp. 23–32.

Chapman D. S., Pollack H. N., 1977, Regional geotherms and lithospheric thickness, Geology, vol. 5, No. 5, pp. 265–268.

Garland G. D., 1971, Introduction to Geophysics – Mantle, Core, and Crust, W. B. Saunders, Philadelphia.

Greene H. G., Dalrymple G. B., Clague D. A., 1978, Evidence for northward movement of the Emperor Seamounts, Geology, vol. 6, pp. 70–74.

Heezen B. C., MacGregor I. D., 1973, The evolution of the Pacific, Sci. Amer., vol. 229, No. 5, pp. 102–112.

Jacobs J. A., Russell R. D., Wilson J. T., 1974, Physics and Geology, 2d ed., McGraw-Hill Book Company, New York.

LaBreque J. L., Kent D. V., Cande S. C., 1977, Revised magnetic polarity time scale for Late Cretaceous and Cenozoic time, Geology, vol. 5, No. 6, pp. 330–335.

Larson R. L., Pitman W. C. III, 1972, World-wide correlation of Mesozoic magnetic anomalies, and their implications, Geol. Soc. Amer. Bull., vol. 83, pp. 3645–3662.

Parsons B., Sclater J. G., 1977, An analysis of the variation of ocean floor bathymetry and heat flow with age, Jour. Geophys. Research, vol. 82, No. 5, pp. 803–827.

Pitman W. C. III, Larson R. L., Herron E. M., 1974, Age of the ocean basins determined from magnetic anomaly lineations, Geol. Soc. Amer. Charts.

Pollack H. N., Chapman D. S., 1977, The flow of heat from the earth's interior, Sci. Amer., vol. 237, No. 2, pp. 60–68, 72–76.

Schubert G., Anderson O. L., 1974, The earth's thermal gradient, Physics Today, vol. 27, No. 3, pp. 28–34.

Smith P. J., 1973, Topics in Geophysics, The MIT Press, Cambridge, Mass.

Wilson J. T. (ed.), Continents Adrift and Continents Aground (Readings from Scientific American), W. H. Freeman and Co., San Francisco.

Wyllie P. J., 1975, The earth's mantle, Sci. Amer., vol. 232, No. 2, pp. 50–63.



20 ТЕКТОНИКА ПЛИТ И ОРОГЕНЕЗ

Геология, как и другие науки, зиждется на наблюдениях, эксперименте и разработке теоретических моделей. Однако в отличие от большинства наук геология исследует исключительно крупный объект, который к тому же очень неохотно открывает свои тайны. Это сочетание «скрытности» объекта и его масштаба долго ограничивало наши возможности в изучении Земли как единого целого, поскольку даже в течение всей своей жизни геолог в состоянии закартировать и расшифровать геологическое строение лишь маленького кусочка земной поверхности. Поэтому геологические исследования были по большей части направлены на изучение различных крупных областей земного шара или разных аспектов науки по отдельности, что представляло собой уже не столь необъятную задачу. Изучая минералы, породы, ископаемые организмы, внутренние и внешние процессы, геологи вместе с тем накапливали информацию, необходимую для построения общей теории динамики Земли. В течение первой половины XX в. было получено достаточно данных для создания ряда моделей Земли. Хорошо были изучены некоторые горные системы, и это позволило понять как характер сил, так и хронологию и последовательность событий, сопровождающих горообразование. Более того, геологическая изученность различных континентов достигла такого уровня, когда стало возможным воссоздать историю становления континентальной коры и вы-

сказать предположение, что континентальные массы перемещались относительно друг друга. Но геологам все же не хватало некоторых существенных данных, необходимых для формулирования обобщающей теории. Из числа наиболее важных данных отсутствовали или были неполными следующие: 1) сведения о природе и истории океанических бассейнов, занимающих 70% поверхности Земли; 2) сведения о современных движениях земной коры, проявляющихся в распределении эпицентров, глубине очагов и повторяемости землетрясений, вместе с информацией о направлении смещений, происходящих в земной коре во время землетрясений; 3) сведения о природе верхней мантии и раздела между литосферными плитами и находящейся ниже них астеносферой. Геологи могли наблюдать результаты действия гигантских сил, формирующих облик земного шара, они были в состоянии установить историю деформаций и историю преобразования поверхности, некоторые из них рискнули даже высказать предположение о движении континентальных масс, но без перечисленных выше сведений никто не мог расшифровать детали происходящих процессов.

Информация, позволившая выдвинуть обобщающую теорию (ныне известную под названием *тектоники плит*), была получена в 60-х и 70-х годах нашего столетия. Но прежде чем обсуждать эту теорию, мы должны познакомиться с двумя ведущими моделями развития Земли, которые предшествовали модели тектоники плит: *геосинклинальной теорией* развития складчатых горных систем и теорией *континентального дрейфа*. Модель тектоники плит вобрала в себя как данные, лежащие в основе этих теорий, так и сами эти теории. Поэтому полезно остановиться на них и посмотреть, каким образом они вошли в состав концепции движения плит.

ГЕОСИНКЛИНАЛЬНАЯ ТЕОРИЯ РАЗВИТИЯ СКЛАДЧАТЫХ ГОРНЫХ СИСТЕМ

Большинство крупных горных сооружений земного шара сосредоточено в поясах шириной в несколько сот и длиной в сотни и тысячи километров. Для всех них характерна интенсивная складчатость, разрывы разного типа и возраста и обычно также региональный метаморфизм и батолитовый интрузивный магматизм. Возникающие таким образом складчатые системы состоят в общем случае из хребтов, сложенных «вывернутыми» из глубины к поверхности устойчивыми осадочными породами, метаморфическими породами и гранитами; благодаря эрозии они приобретают рельефную форму горных сооружений.

Складчатые системы, находящиеся на разных стадиях эрозионного разрушения, имеются на всех континентах. Хорошо знакомые горные районы Аппалачей, Уошито, Скалистых гор и Береговых хребтов США (рис. 20.1) представляют собой складчатые системы, сформировавшиеся в различные эпохи в прошлом. К другим складчатым системам относятся Анды, Гималаи, Альпы, горы Атлас в Северной Африке, Большой Водораздельный хребет восточной Австралии, горы Антарктического полуострова – отдельные яркие примеры из большого числа складчатых систем.

Строение Аппалачской складчатой системы показано на обзорной карте (рис. 20.2). Осевая зона, или ядро, с наиболее интенсивным метаморфизмом была местом внедрения интрузий. Бóльшая часть этого ядра представляет собой пояс палеозойских осадочных пород, интенсивно смятых в складки и рассеченных разрывами, но во многих местах в его строении участвуют также докембрийские магматические и метаморфические породы. Для территории, лежащей к востоку от ядра, данные в основном отсутствуют, так как эта часть Аппалачей погребена под несогласно лежащими на них отложениями Атлантической прибрежной равнины. Эти отложения накапливались

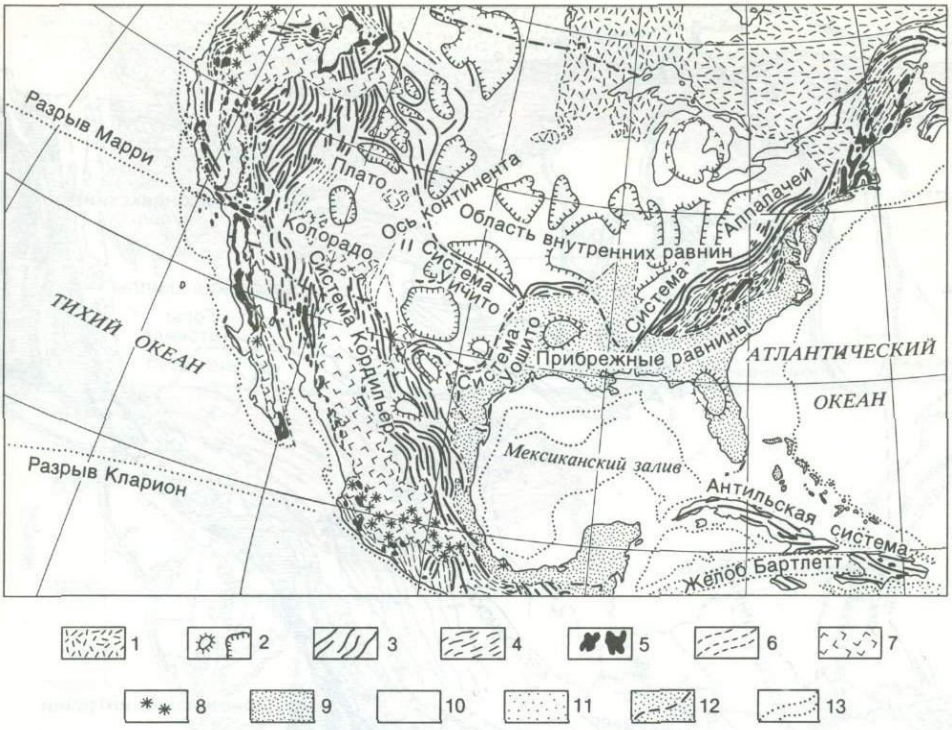


РИС. 20.1

Тектоническая карта США. *Центральное устойчивое ядро континента (1–2)*: *1* – щиты. Выходы на поверхность древних пород, давно консолидированных и срезанных эрозией; *2* – внутренние равнинные области. Осадочные породы, залегающие с небольшим наклоном или смятые в пологие складки. Основные поднятия и впадины показаны линией с зубчиками. *Складчатые (орогенические) пояса (3–6)*: *3* – краевые (внешние) зоны. Осадочные породы преимущественно миогеосинклинального происхождения со складчато-надвиговой структурой. Сплошными линиями показано генерализованное простирание структур на поверхности, пунктиром – под чехлом более молодых осадков; *4* – внутренние зоны. Осадочные и вулканические породы преимущественно эвгеосинклинального происхождения, частью метаморфизованные. Линиями показано генерализованное простирание структур; *5* – интрузии кислого состава. Крупные и мелкие интрузии во внутренних зонах складчатых областей; *6* – крутопадающие разрывы. Секущие разрывы большой протяженности: сбросы, трансформные разрывы, взбросы. *Послескладчатые (посторогенические) образования (7–9)*: *7* – вулканические породы третичного и четвертичного возраста. Большей частью лежат на деформированных породах складчатых поясов; *8* – вулканы. Действующие сейчас или активные в недалеком прошлом; *9* – прибрежные равнины. Прибрежные площади, сложенные молодыми осадками, полого наклоненными в сторону моря. Внешние части продолжаются на континентальных шельфах. *Тектонические элементы океана (10–13)*: *10* – площади с сиалической (континентальной) корой. Включают эпиконтинентальные моря, континентальные шельфы, континентальные склоны; *11* – площади с симатической (океанической) корой. Океанические впадины с глубинами в основном больше 3000 м; *12* – глубоководные желоба. Линиями указаны оси желобов; *13* – разрывы и зоны разрывов. Выделяются преимущественно по особенностям топографии морского дна. (По Б. Кингу: *Philip B. King*, The Evolution of North America, Copyright © 1959 by Princeton University Press. Перепечатано с разрешения издательства «Принстон юниверсити пресс».)

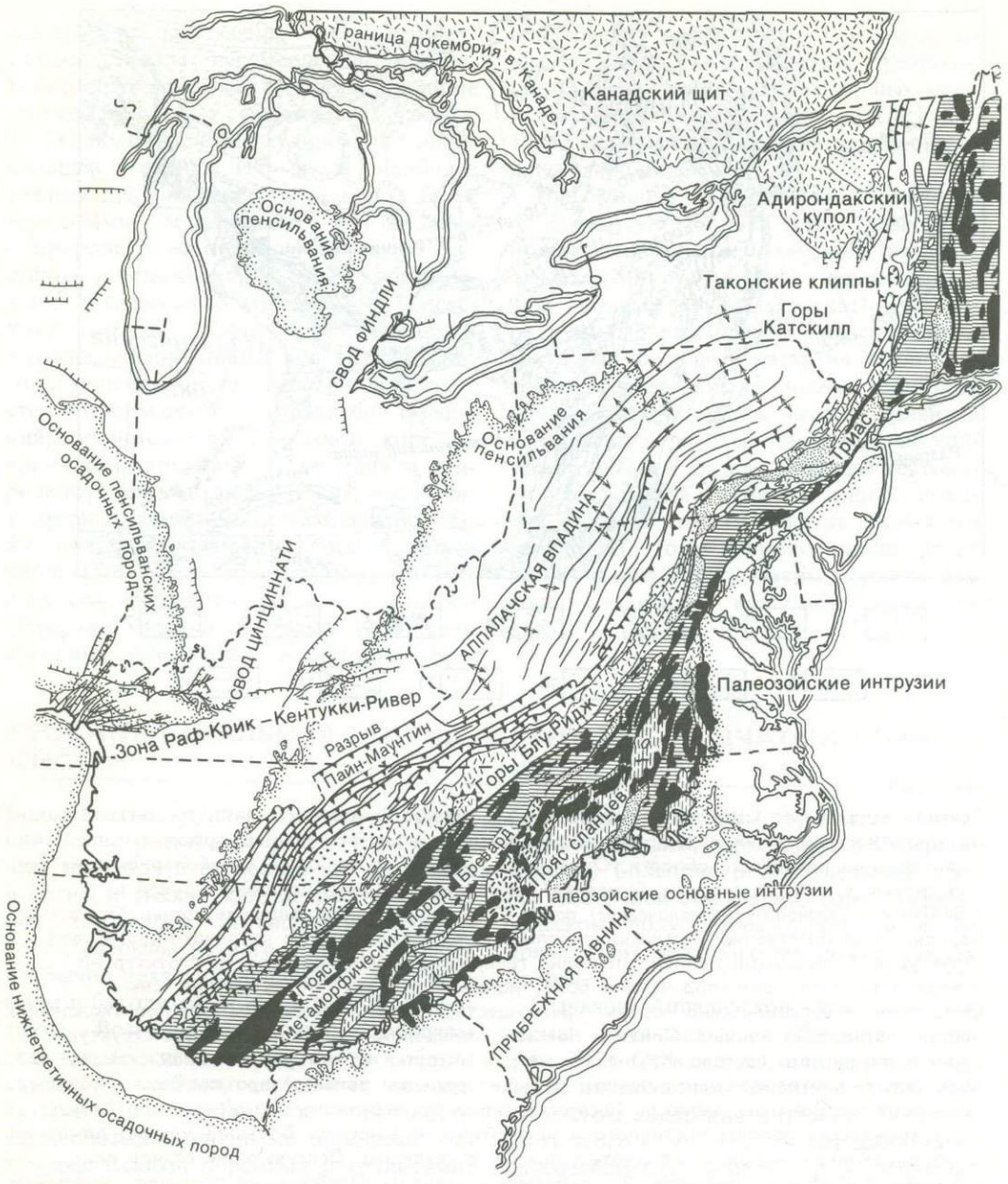


РИС. 20.2

Гектоническая карта Центральных и Южных Аппалачей. Осевая зона (ядро) хребта сложена докембрийскими и палеозойскими метаморфическими породами (горизонтальная штриховка) и палеозойскими интрузиями (черное). К северо-востоку от них находится зона палеозойских пород со складчато-надвиговой структурой. (Из работы Спенсера, 1977; заимствовано с Тектонической карты США, 1961.)

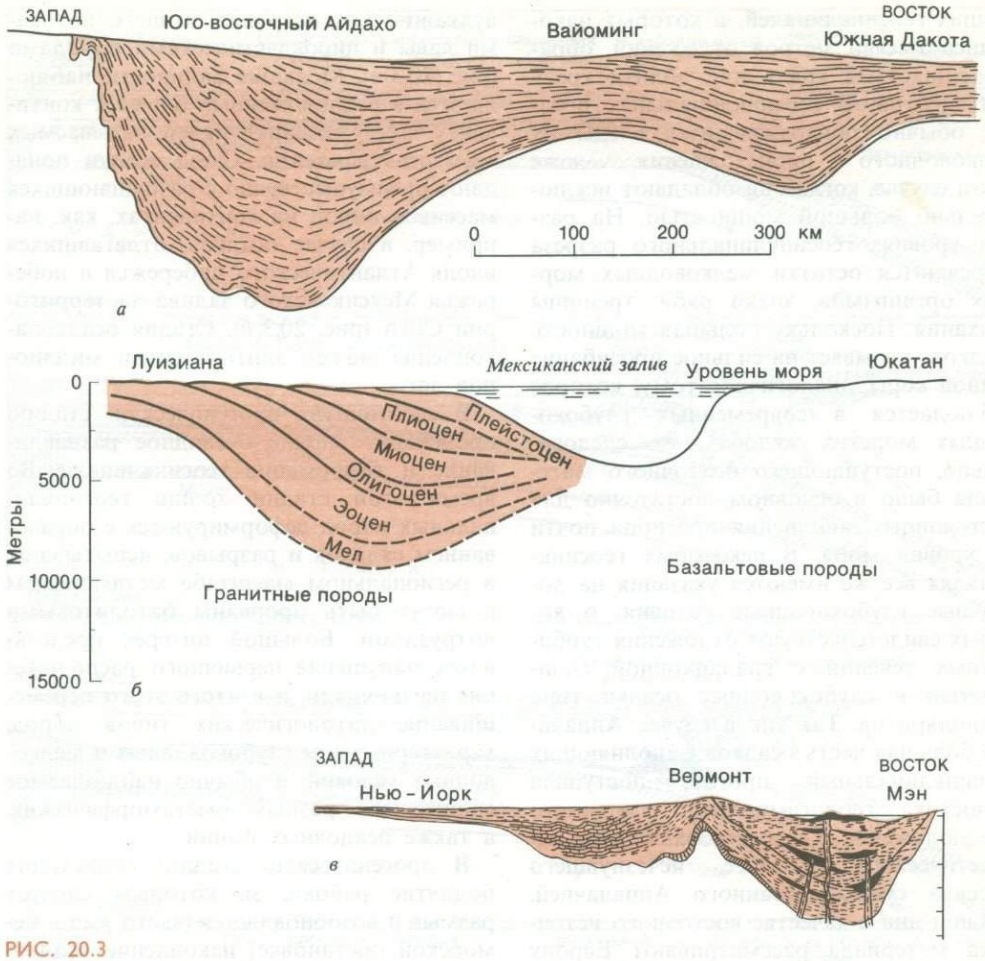


РИС. 20.3

Геосинклинали. *а* – геосинклиналь Кордильер; виден глубокий, четко выраженный прогиб на территории юго-восточной части шт. Айдахо, заполненный осадками, накопившимися до складчатости Скалистых гор (по Кэю, 1942); *б* – геосинклиналь Мексиканского залива, в которой до сих пор продолжается накопление осадков (по Уортону, 1933); *в* – геосинклиналь Аппалачей на территории Новой Англии в ордовике (по Кэю: *Kay*, Geol. Soc. Amer. Mem. 18, 1951). Отношение горизонтального масштаба к вертикальному 1 : 40.

в мелу и кайнозое, когда водами Атлантического океана был затоплен восточный край Северо-Американской континентальной плиты (рис. 20.2).

В 1857 г. молодой геолог Джеймс Холл подметил примечательную особенность Аппалачей. Мощность накопившихся пород в складчатой области в 4–5 раз превышает мощность осадочной толщи того же возраста во внутренних районах США. Породы, деформированные во время аппалачской складчатости, представляют собой необычайно мощную толщу осадочных пород, протягивающуюся вдоль всей складчатой зоны Аппалачей. Это знаменательное открытие привело к созданию геосинклинальной теории формирования гор. Удлиненная область мощных осадков, которая позднее превращается в горную систему, получила название *геосинклинали* (рис. 20.3). Почти все складчатые системы земного шара с их интенсивной складчатостью и разрывами расположены на месте предшество-

вавших геосинклиналей, в которых накопились тысячи метров отложений, образовавшихся на краях или вблизи краев континентов. В геосинклинальных осадках обычно обнаруживаются следы их мелководного происхождения, даже в том случае, когда они обладают исключительно большой мощностью. На разных уровнях геосинклинального разреза встречаются остатки мелководных морских организмов, знаки ряби, трещины усыхания. Поскольку большая мощность осадков указывает на сильное прогибание земной коры, аналогичное тому, которое наблюдается в современных глубоководных морских желобах, то, следовательно, поступающего осадочного материала было в основном достаточно для постоянного заполнения прогибов почти до уровня моря. В некоторых геосинклиналях все же имеются указания на локальные глубоководные условия, о которых свидетельствуют отложения турбидитных течений с градационной слоистостью и глубоководные осадки типа радиоляритов. Так как в случае Аппалачей бóльшая часть осадков, заполняющих геосинклинальный прогиб, поступала с востока, геологами было выдвинуто предположение о существовании там гипотетического, позднее исчезнувшего массива суши, названного Аппалачией. В наши дни в качестве восточного источника материала рассматривают Европу и Северную Африку, которые были связаны с Северной Америкой до раскрытия северной части Атлантического океана.

Стадии геосинклинального развития. Имеется определенная последовательность в развитии складчатых систем (рис. 20.4). Вначале территория размером в 1000 км или больше в длину и 200–300 км в поперечнике погружается в море, и на ней происходит накопление отложений мощностью от 6000 до 20 000 м. Максимальные мощности наблюдаются в *эвгеосинклиналях*, расположенных на океанической стороне геосинклинальных систем; они характеризуются хемогенными осадками, такими, как известняки и кремни, обломочными породами, материал для которых поступал с близлежащих участков суши или вулканических островов, и часто потоками лавы и пирокластическими породами (рис. 20.3, *в*). Меньшие мощности наблюдаются в расположенных ближе к континенту частях геосинклиналей, называемых *миогеосинклиналями*. Сюда осадки попадают преимущественно с разрушающихся массивов пород на континентах, как, например, в случае осадков, отлагавшихся вдоль Атлантического побережья и побережья Мексиканского залива на территории США (рис. 20.3, *б*). Стадия осадконакопления может длиться сотни миллионов лет.

В следующую, орогеническую стадию происходит вполне очевидное раздавливание и деформация геосинклинали. Во время этой стадии толщи геосинклинальных пород деформируются с образованием складок и разрывов, испытывают в региональном масштабе метаморфизм и могут быть прорваны батолитовыми интрузиями. Большой интерес представляет нарушение первичного расположения на площади, и в итоге этого перемешивание литологических типов пород, характерных для глубоководных и мелководных условий, и обычно наблюдаемое сближение разных метаморфических, а также осадочных фаций.

В орогеническую стадию происходит поднятие района, за которым следует размыв и возобновляется (часто уже в неморской обстановке) накопление осадочного материала.

После складчатости и сопровождающего ее поднятия дефицит массы, обусловленный эрозией, компенсируется изостатическим поднятием земной поверхности. В конечном счете может быть удалено столько материала, что территория перестанет реагировать на это региональным поднятием, и тогда древний горный хребет полностью срезается эрозией (рис. 20.5). Убедительные доказательства существования в прошлом складчатой горной системы сохраняются в виде деформированных слоев, динамометаморфизованных пород и остатков батолитовых интрузий. В конце концов в результате либо эрозии, либо погружения континентальной плиты, либо подъема уровня океана оставшиеся корни гор могут

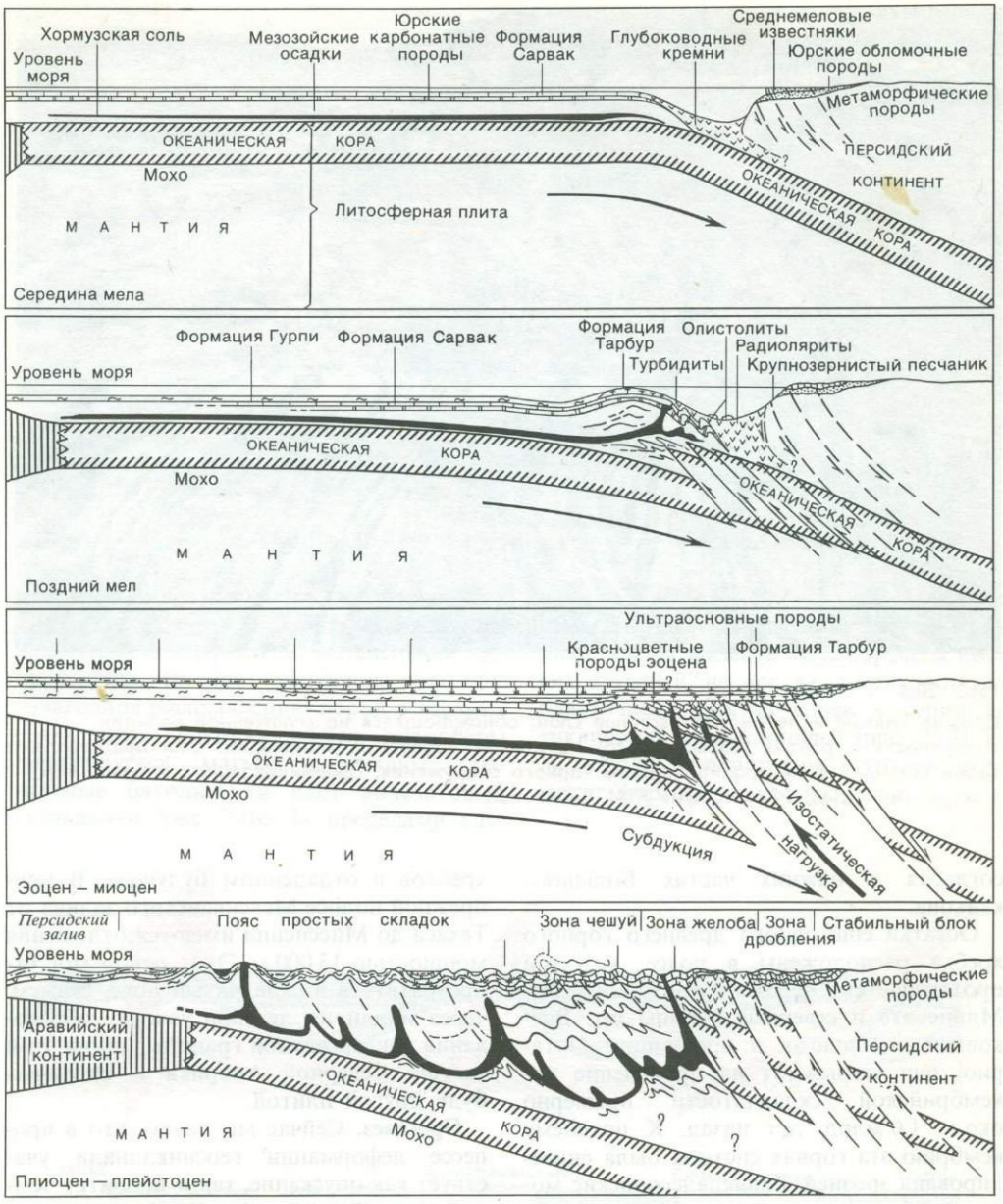


РИС. 20.4

Стадии формирования складчатых и разрывных тектонических структур в зоне субдукции на территории западных областей Азии в соответствии с концепцией тектоники плит. (Из работы Спенсера, 1977.)

быть редуцированы до столь низкого гипсометрического уровня, что море может затопить занятую ими площадь и похоронить корни старых гор под несогласно залегающими молодыми отложениями. Метаморфические и магматические породы одной из таких древних горных систем обнажаются ниже поверхности не-

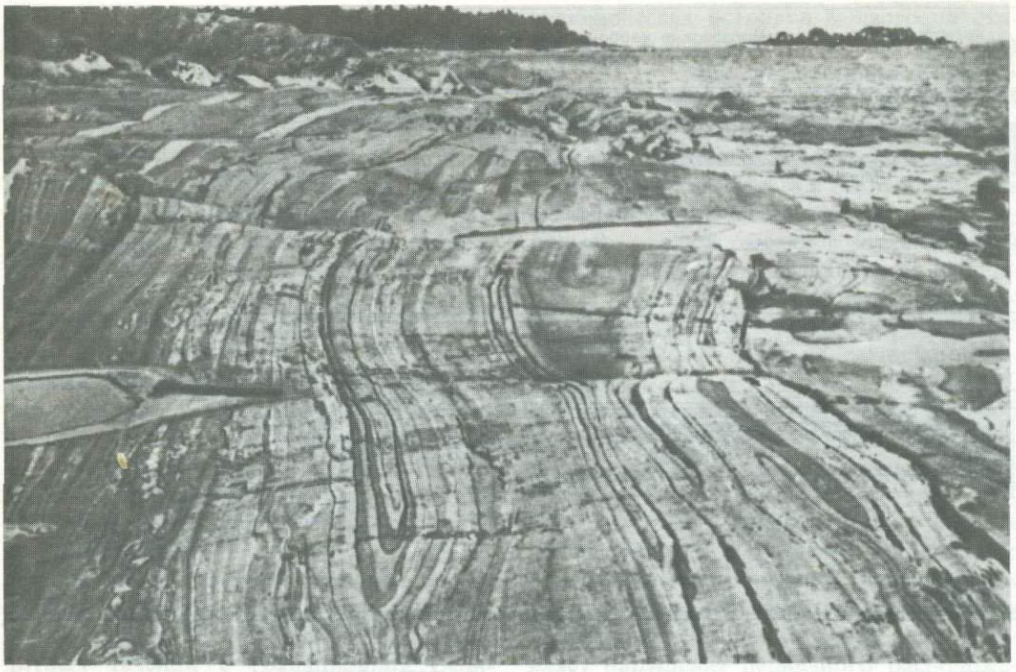


РИС. 20.5

Сложно смятые и метаморфизованные слои, обнажающиеся на сглаженной волнами поверхности в районе Порво (Борго) на южном побережье Финляндии. Они представляют собой корни глубоко эродированного горного сооружения, сформировавшегося более чем 1 млрд. лет назад. (Фотография К. И. Вегманна.)

согласия в нижних частях Большого каньона.

Остатки еще одного древнего горного хребта расположены в поясе, который протягивается через территорию шт. Миннесота и северные районы шт. Висконсин и Мичиган в провинцию Онтарио; они указывают на проявление докембрийской складчатости примерно около 1,6 млрд. лет назад. К позднему кембрию эта горная система была снивелирована эрозией. Раннепалеозойские моря временами заливали эту площадь, и поверх остатков бывших гор несогласно отложились слои морских пород с окаменелостями. Эта зона корней древних гор с тех пор всегда оставалась спокойной и низменной.

Области, служащие ареной интенсивной аккумуляции осадков в настоящее время, могут, по-видимому, легко оказаться местом возникновения горных хребтов в отдаленном будущем. В прибрежной полосе Мексиканского залива от Техаса до Миссисипи имеются отложения мощностью 13 000 м. Этот район мог бы превратиться в складчатый пояс, скажем, через миллионы лет при условии образования конвергентной границы между этой частью Северной Америки и какой-нибудь другой плитой.

Орогенез. Сейчас мы знаем, что в процессе деформации геосинклинали участвует как опускание, так и поднятие земной коры. В этой деформации принимает участие медленное движение плит, охватывающее период времени в сотни миллионов лет. При движении плит субдукция океанической литосферы вызывает опускание поверхности с образованием геосинклинали. Так как область накопления наиболее мощных осадков погружается в зону субдукции, материал подвергается воздействию растущей тем-



РИС. 20.6

Возникновение островодужной андезитовой магмы (справа), базальтовой и перидотитовой магм (слева) и вулканов и гранитных интрузий андского типа. (По Крину, 1972.)

пературы и сжимающих сил, вызванных сближением плит. Результатом является динамометаморфизм и интенсивная деформация. В зоне субдукции, там, где благодаря расплавлению пород в верхних горизонтах погружающейся литосферы генерируется магма, возникают гранитные батолиты и идет андезитовый вулканизм (рис. 20.6). За пределами глубинной центральной зоны геосинклинали температура и давление не настолько велики, чтобы вызвать метаморфизм высоких ступеней, но все же достаточны для пластичного смятия слоев в серии антиклиналей и синклиналей (рис. 20.7). Если породы не пластичны, а хрупки, в них могут формироваться разрывы.

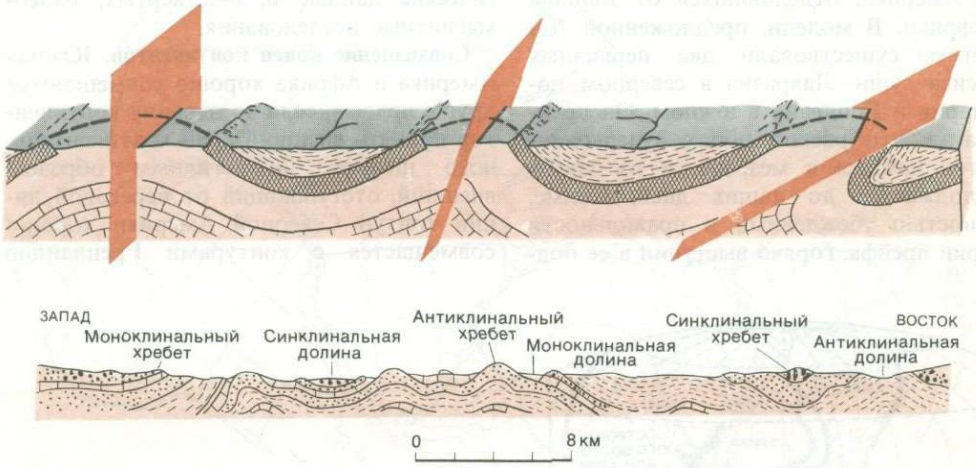


РИС. 20.7

Геологический разрез через территорию округа Аллеган, шт. Мэриленд, с изображением структур разного типа. Обратите внимание на то, что рельеф поверхности отражает разную степень сопротивляемости пород эрозии, а не конфигурацию складок. (По материалам Геологической службы шт. Мэриленд, Геологическая карта Аллеганского округа, 1956.)

Горообразование продолжается, пока продолжается сближение плит. Древние горные системы, вроде той, которая протягивается через северные районы центральной части США в провинцию Онтарио, пребывают в покое, так как процессы сближения и столкновения плит не захватывали этой области в течение уже многих сотен миллионов лет.

ДРЕЙФ КОНТИНЕНТОВ

Идея о том, что относительное положение континентов в ходе геологической истории могло меняться, была в основном развита между 1910 и 1940 гг., хотя намеки на такую концепцию появились еще в 1881 г. Главными защитниками этой идеи были в то время немец Альфред Вегенер, шотландец Артур Холмс и южноафриканский геолог Александр Дю Тойт. Вегенер сделал первые шаги, предложив модель, исходящую из следующих предпосылок: 1) существования единой первичной континентальной массы, названной «Пангея» (греч.–«вся земля»; рис. 20.8); 2) ее распада на отдельные части; 3) дрейфа сиалической континентальной коры по «морю» более плотной симатической коры; 4) вздымливания горных хребтов на фронтальных краях массивов континентальной коры, в особенности при движении к западу Южной и Северной Америки, отделившихся от Европы и Африки. В модели, предложенной Дю Тойтом, существовали два первичных массива суши – Лавразия в северном полушарии и Гондвана в южном. Он предполагал, что раскол обоих суперконтинентов начался в мезозое, и их дрейф продолжается до наших дней. Холмс, полностью убежденный в правильности теории дрейфа, горячо выступил в ее поддержку. Эта идея была принята многими геологами Европы и стран южного полушария, но в основном отвергалась американскими геологами.

Главные возражения против теории континентального дрейфа возникли в связи с сомнением в том, может ли движение континентальной коры осуществляться по твердой симатической коре океанов, и в связи с видимым отсутствием источников энергии, достаточной для того, чтобы вызвать движение континентов.

Данные в пользу модели перемещающихся континентов были получены из разных отраслей науки. Особенно большое значение имело, во-первых, совмещение краев континентов и прослеживание некоторых внутренних особенностей от одного континента к другому, во-вторых, изучение палеоклиматов, подтвердившее изменение широт, в-третьих, палеонтологические данные и, в-четвертых, палеомагнитные исследования.

Совмещение краев континентов. Южная Америка и Африка хорошо совмещаются друг с другом, если за окраину континентов принять внешний край континентального шельфа. Аналогичным образом внешний, отступающий от береговой линии контур Северной Америки хорошо совмещается с контурами Гренландии



РИС. 20.8
Пангея – одна из первых реконструкций положения континентов до дрейфа, предложенная Альфредом Вегенером в 1915 г. (Из работы Спенсера, 1977.)



РИС. 20.9

Совмещение Северной Америки с Гренландией и Гренландии с Европой по изобате 500 фатомов (910 м). Остров Элсмир (слева вверху) оставлен на своем теперешнем месте. Пояс, ограниченный пунктирными линиями и протягивающийся от полуострова Гаспе, Новой Шотландии и Ньюфаундленда через Британские острова в Норвегию, восточную Гренландию и Шпицберген, сложем складчатыми нижне- и среднепалеозойскими породами, которые в юго-западном направлении продолжаются в Аппалачах. В данной реконструкции положения континентов до дрейфа эти области располагаются на одной линии; это служит веским доказательством прежнего единства континентов. (По материалам Булларда, Эверетта и Смита, 1965.)

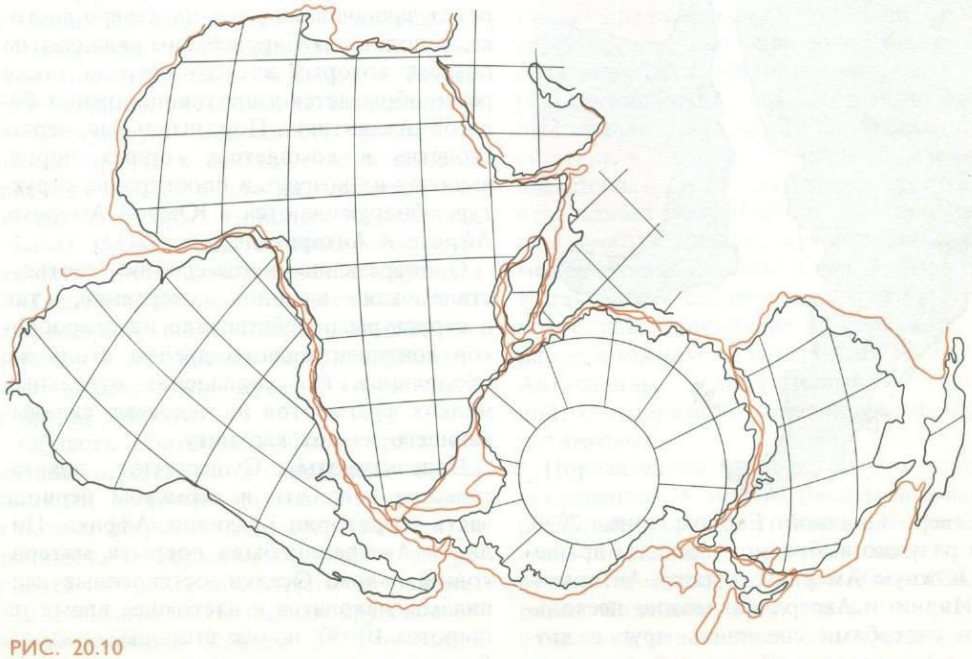


РИС. 20.10

Совмещение Южной Америки, Африки, Индии, Антарктиды и Австралии по изобате 500 фатомов (910 м). (По Смиту и Холэму, 1970.)

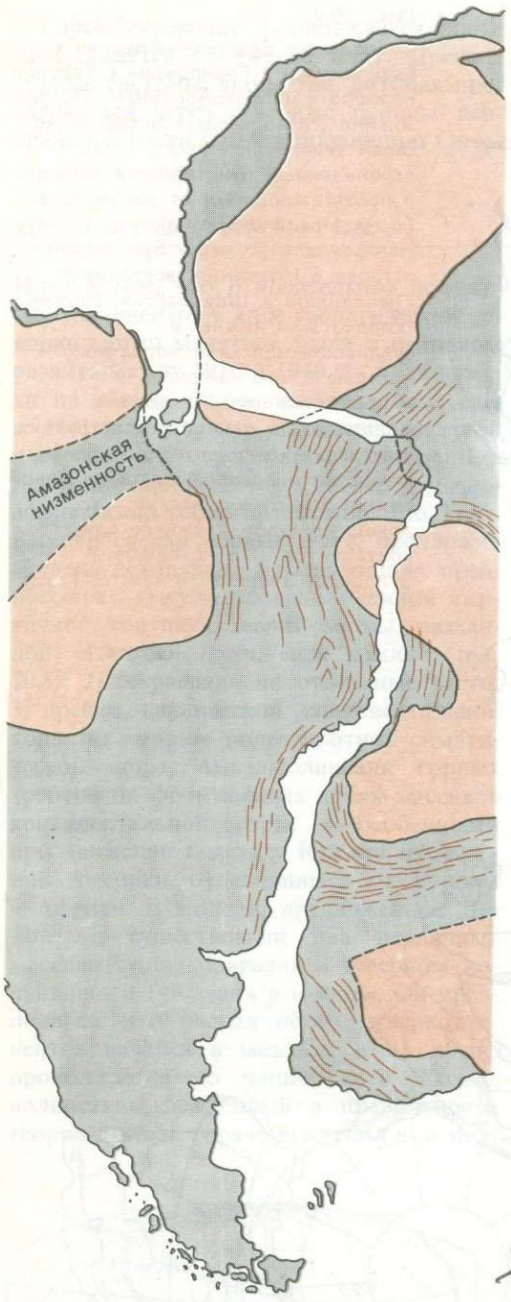


РИС. 20.11
Совмещение краев Африки и Южной Америки, показывающее хорошее соответствие возраста и структуры развитых здесь комплексов горных пород. Розовым цветом показаны самые древние массивы (с возрастом более 2 млрд. лет). Штрихи – простирание структур в более молодых складчатых поясах. Оторванные части массивов в Бразилии и совпадение структурных направлений на обоих континентах являются ярким свидетельством некогда слитного расположения комплексов пород, ныне разделенных Атлантическим океаном. (По Хёрли, 1968.)

и Северо-Западной Европы (рис. 20.9). При разумно выбранном простом вращении Южную Америку, Африку, Антарктиду, Индию и Австралию можно несколькими способами соединить друг с другом, получив единый древний суперконтинент Гондвану (рис. 20.10).

Согласуются также особенности внутреннего строения континентов. В восточных областях Северной Америки и в Северо-Западной Европе очень похожи стратиграфия и структура палеозойских пород. Складчатая система Аппалачей, резко заканчивающаяся на северо-востоке, дополняется Европейским складчатым поясом, который в свою очередь также резко обрывается у противоположных берегов Атлантики. Поразительные черты сходства в комплексах горных пород, включая их возраст и простирание структур, обнаруживаются в Южной Америке, Африке и Антарктиде (рис. 20.11).

Одновременно наблюдаемое соответствие как внешних очертаний, так и структуры подействовало на сторонников континентального дрейфа столь же ободряюще, как совпадение отдельных мелких фрагментов на человека, складывающего из них картинку.

Палеоклиматы. Существуют доказательства того, что в пермском периоде часть территории Бразилии, Африки, Индии и Австралии была покрыта материковым льдом. Осадки, оставленные ледниками, находятся в настоящее время на широтах 10–30° по обе стороны экватора. Более того, установлено, что в некоторых областях лед двигался в сторону от со-



РИС. 20.12
Размещение Южной Америки, Африки, Индии, Антарктиды и Австралии, представляющих собой части гипотетического континента Гондваны Дю Тойта, в районе Южного полюса. Стрелками показано направление движения ледников палеозойского материкового оледенения. Обратите внимание, что в некоторых местах лед, видимо, поступал из районов, ныне занятых океаном.

временного экватора. Эти факты проще всего объясняются, если допустить, что указанные площади были некогда сосредоточены у Южного полюса и уже затем переместились в их современное положение (рис. 20.12).

Сейчас зоны наиболее жаркого сухого климата приурочены к субтропическим поясам высокого барического давления вблизи 30° северной и южной широты. Однако ордовикские соленосные отложения, свидетельствующие о сухом климате с активным испарением, встречаются в Сибири, силурийские соленосные отложения распространены в шт. Нью-Йорк и Огайо, девонская соль – в Саскачеване, миссисипская соль – в шт. Мичиган, пермская соль – в Канзасе, Оклахоме и Техасе. Если принять во внимание современную климатическую зональность Земли, то можно прийти к выводу, что в средних широтах не место для находящихся там сейчас некоторых мощных толщ осадочных пород с пустынными эоловыми песками. Либо атмосферная циркуляция в палеозое принципиально отличалась от современной, либо области развития эвапоритов и пустынных песков переместились в результате дрейфа континентов в другие широты.

Область обитания рифостроящих кораллов ограничена в настоящее время чистыми теплыми водами в основном в полосе до 30° от экватора. Но остатки ископаемых коралловых рифов встречаются не только в центральных районах США, но даже за Полярным кругом в северных районах Канады и Гренландии. В 1973 г. советские геологи сообщили, что коралловые рифы обнаружены в пустыне Каракум в Туркмении к востоку от Каспийского моря. В этих отложениях, залегающих ныне на глубине 2 км под осадками современной пустыни, заключены раннемеловые (возрастом 120 млн. лет) кораллы, морские лилии и губки. Объяснением такого аномального распределения кораллов могла бы быть миграция Американской и Евразиатской плит по направлению к северу.

Палеонтологические данные. Присутствие сходной морской фауны палеозойского возраста в Европе и Северной Америке можно объяснить миграцией организмов в мелководной среде, не прибегая к предположению о значительном перемещении плит, или вторичным обособлением этих эпиконтинентальных морей, органический мир которых до этого был одинаковым (рис. 20.13). Однако присутствие в Европе и Северной Америке идентичных углеобразующих растений, ископаемых амфибий и пресноводных рыб требует наличия сухопутных связей между этими континентами в полеозое. К такому же заключению приводит широкое распространение в пермском периоде в южном полушарии от Индии до Антарктиды глоссоптериевых растений – своеобразной разновидности папоротниковых.

Поразительна близость фауны разных континентов. У многих раннемезозойских рептилий Африки (например, *мезозавров* – плавающих пресноводных животных) имеются аналоги в Южной Америке. Сильным аргументом в пользу отделения континентов в послетриасовое время служат остатки пресноводных амфибий и сухопутных рептилий триасового



РИС. 20.13
Объяснение одной из палеонтологических головоломок. Дж. Т. Уилсон выдвинул предположение о существовании палеозойского океана (верхняя часть рисунка), заселенного мелководной «американской» фауной на западе и «европейской» фауной на востоке; позже этот океан «закрылся». Когда континенты снова были разъединены в мезозойское время, разделивший их рифт прошел таким образом, что часть «Евро-Африки» оказалась причлененной к территории Новой Англии и прибрежным районам восточной Канады, а часть прежней Америки – к Шпицбергену, Норвегии, Шотландии и Ирландии. *1* – американская фауна; *2* – европейская фауна. (Из работы Салливена, 1974.)

возраста (около 200 млн. лет назад) в Антарктиде и Южной Америке. То, что ископаемая рептилия, найденная в 1969 г. в 660 км от Южного полюса, оказалась сродни южноамериканским и южноафриканским формам, также служит убедительным доказательством континентального дрейфа.

Палеомагнитные данные. Как говорилось в гл. 19, измерение направления остаточной намагниченности горных пород позволяет определить характер магнитного поля Земли во время образования породы. Измерение магнитного склонения в породе позволяет определить угол, на который с течением времени мог повернуться массив горных пород или континент. С другой стороны, измерение наклонения магнитного поля породы дает возможность определить палеошироту, на которой находилась порода в момент ее образования. Изучая склонение и наклонение в каждой последовательности горных пород, можно воссоздать историю дрейфа данной области. Тот факт, что для разных континентов получаются свои различные траектории перемещения полюсов (рис. 19.12), объясняется независимым движением или дрейфом континентов.

НОВЫЕ ОБОБЩЕНИЯ В РАМКАХ ТЕОРИИ ТЕКТОНИКИ ПЛИТ

Старые теории геосинклинального развития и дрейфа континентов объяснили многие особенности динамики Земли, но многое все же осталось неясным, и требовалось объединить обе эти теории в рамках одной модели, которая объясняла бы как современное состояние Земли, так и ее историю.

Для того чтобы сформулировать этот новый подход, необходимы были две вещи. Во-первых, от океанологов и геофизиков надо было получить данные об океаническом дне, во-вторых, нужна была идея, позволяющая свести воедино материалы многих отраслей геологии.

Новая теория тектоники плит выросла, таким образом, на почве как прежних знаний, так и вновь полученных данных.



РИС. 20.14

Иллюстрация концепции спрединга океанического дна в представлении Гарри Хесса. Новая океаническая кора образуется в срединно-океанических хребтах; породы старого океанического дна погружаются под континенты или островные дуги, и при этом образуется наклонная зона очагов землетрясений (теперь называемая зоной Беньоффа или зоной субдукции) и возникает вулканизм. (Из работы Салливена, 1974.)

Наиболее фундаментальной идеей оказалась мысль о том, что внешняя оболочка Земли – литосфера представляет собой мозаику из семи крупных и нескольких более мелких плит, перемещающихся относительно друг друга. Края плит прочерчиваются глобальными системами распределения эпицентров землетрясений. Большинство эпицентров расположено в относительно четко ограниченных поясах (рис. 18.1); ими разделяются площади, или плиты, внутри которых не происходит сильных деформаций. Возможны три типа относительного движения плит: 1) они могут двигаться в разные стороны, т. е. расходиться, или дивергировать, 2) могут двигаться навстречу друг другу, т. е. сходиться, или конвергировать, 3) могут проскальзывать относительно друг друга по так называемым трансформным границам. При расхождении (дивергенции) плит образуется новая океаническая кора. Затем кора перемещается в горизонтальном направлении по океаническому дну и у конвергентных границ опускается в мантию в зонах океанических желобов, ограничивающих островные дуги или континентальные окраины определенного типа (рис. 20.14).

Прежде чем углубиться в теорию тектоники плит, позволим себе кратко остановиться на истории этой новой геологической концепции. Она представляет собой убедительный пример развития научных идей путем синтеза, казалось бы, не связанных между собой данных[1].

Лидирующая роль в накоплении данных выпала на долю морских исследований. Вскоре после второй мировой войны началась эра интенсивных океанографических работ. Наиболее активными в этой области учреждениями были Ламонтская (ныне Ламонт-Доэрти) геологическая обсерватория Колумбийского университета, Океанографический институт Вудс-Хол в Массачусетсе, Военно-морские силы США, Институт морских исследований Университета Майами, Скриппсовский океанографический институт в Калифорнии. Многие другие организации присоединили к ним свои усилия позже; к морским исследованиям подключился и ряд судов других государств.

В 1960 г. сотрудник Ламонтской обсерватории Брюс Хизен привлек внимание к рифту океанического дна, как к структуре или структурам глобального значения протяженностью порядка 64 000 км. Он рассматривал рифт как место, где происходит разъединение океанической коры и формирование новой коры из потоков

[1] Для более подробного ознакомления см. литературу в конце главы.

лавы, образующихся вследствие подъема магмы из мантии. Научным персоналом Ламонтской обсерватории была выполнена серия работ по изучению и описанию океанического дна, в том числе была составлена геоморфологическая схема океанического ложа Северной Атлантики (рис. 20.15, 20.16). Позже сотрудники обсерватории распространили свою деятельность по описанию и составлению таких схем на другие океаны. Они проводили гравиметрические исследования в океане, измеряли тепловой поток, идущий из недр Земли, поднимали с помощью пробоотборника образцы донных осадков, отбирали образцы коренных пород со срединно-океанических хребтов. Создавая искусственным путем землетрясения, они исследовали строение коры в акваториях, проводили магнитометрические измерения в рейсах с использованием буксируемой аппаратуры. Все это привело к накоплению огромного объема новой информации.

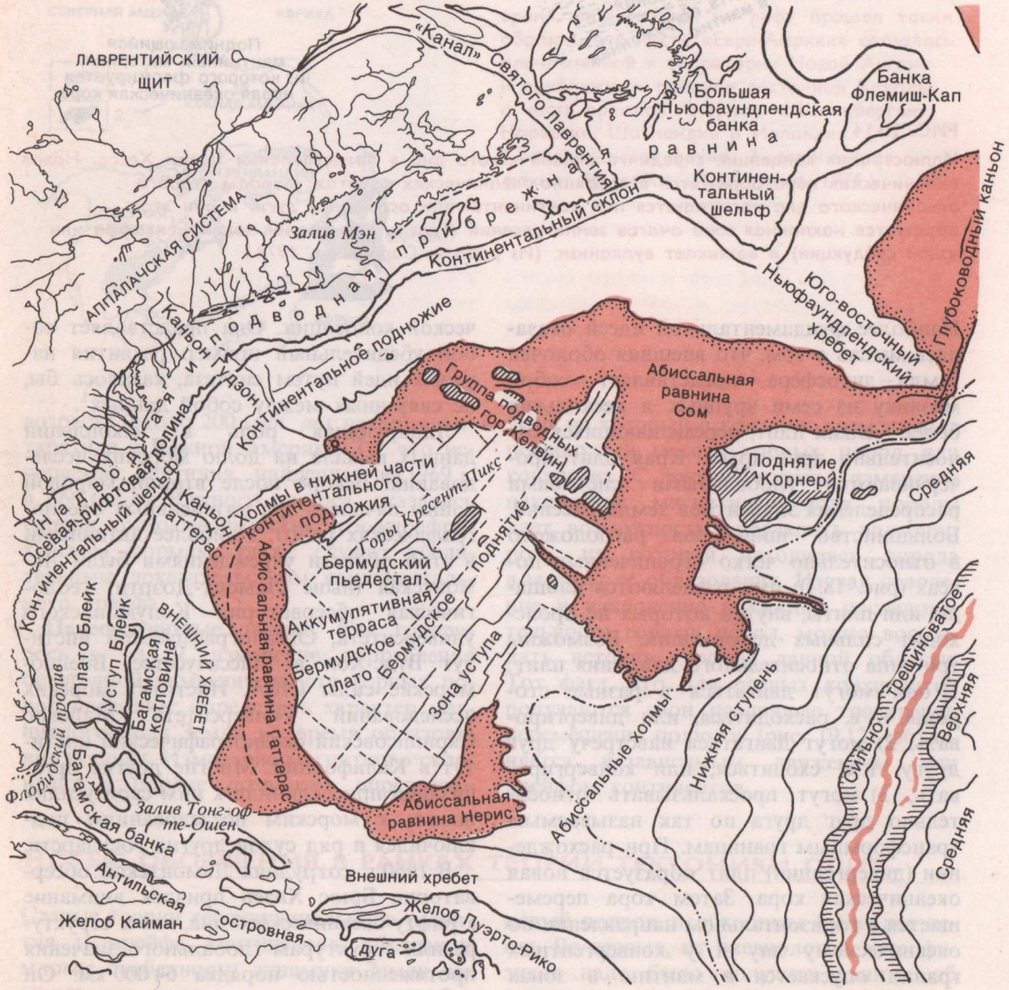
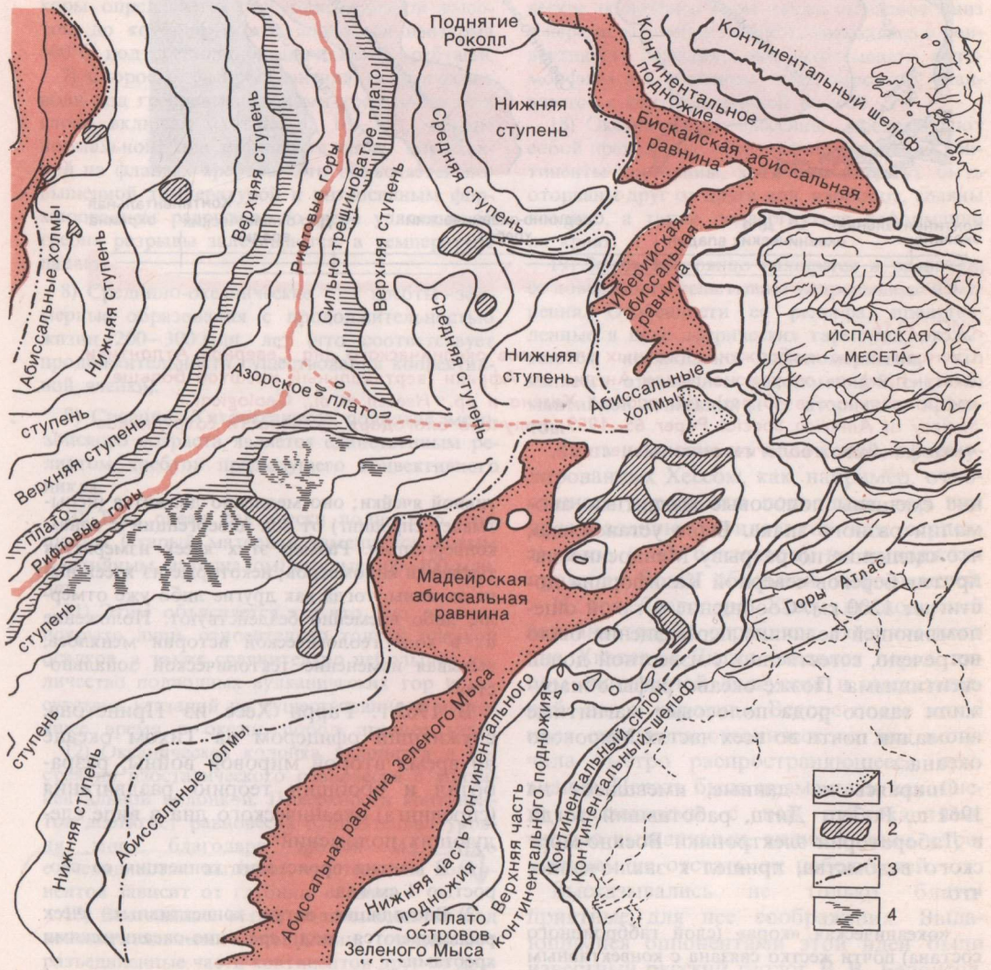


РИС. 20.15

Геоморфологическая карта дна северной части Атлантического океана. Геоморфологические провинции Атлантического океана: 1 – абиссальные равнины; 2 – подводные горы; 3 – линии максимальных глубин; 4 – внутригорные депрессии. (Из работы Хизена и др.: *Heezen et al.*, Geological Society of America Special Paper 65, 1959; получено благодаря любезности сотрудников Американского геологического общества.)

Сотрудники Скриппсовского института вели между тем аналогичные исследования в Тихом океане. Ими был изучен рельеф океанического дна с ярко выраженными уступами тектонического (разрывного) происхождения напротив Калифорнийского побережья и показано, что по этим структурам на большое расстоя-



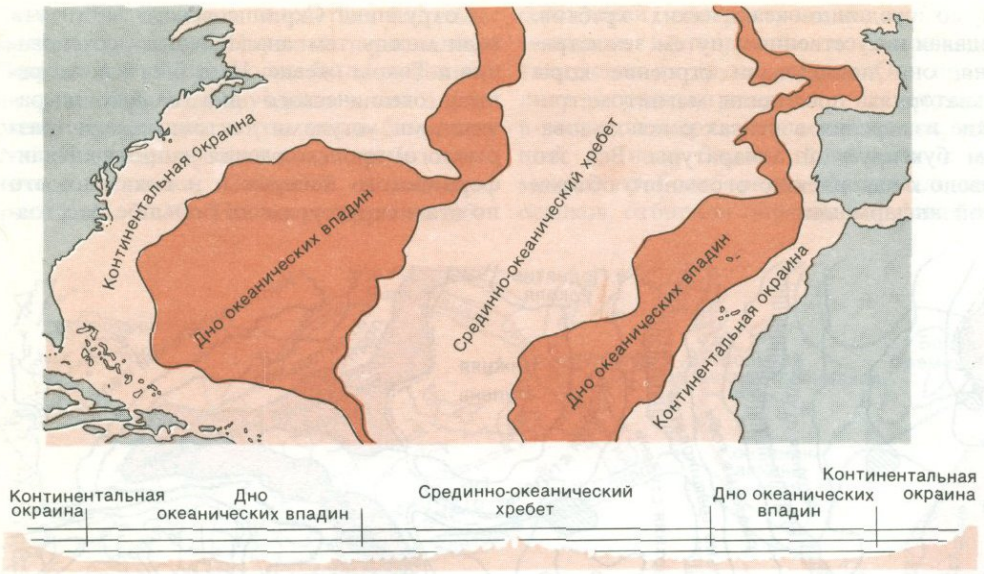


РИС. 20.16

Схематическое изображение главных элементов океанического дна Северной Атлантики. Внизу – профиль от района Новой Англии до Африки (вертикальный масштаб больше горизонтального в 40 раз). (Из работы Хизена и др.: *Heezen et al.*, Geological Society of America Special Paper 65, 1959; получено благодаря любезности сотрудников Американского геологического общества.)

ние смещены полосовые магнитные аномалии разного знака. Было установлено, что смещение по разрыву Мендосино напротив берегов северной Калифорнии достигает 1200 км. Сообщение о такой ошеломляющей величине перемещения было встречено, естественно, с известной долей скептицизма. Позже океанографы обнаружили такого рода полосовые магнитные аномалии почти во всех частях Мирового океана.

Опираясь на данные, имевшиеся на 1961 г., Роберт Дитц, работавший тогда в Лаборатории электроники Военно-морского ведомства, пришел к заключению, что

«океаническая «кора» (слой габброидного состава) почти жестко связана с конвективным оборотом в мантии, ползущим со скоростью каких-нибудь нескольких сантиметров в год. Поскольку океаническое дно покрыто лишь тонкой пленкой осадков с некоторой примесью эффузивных пород, то оно, по сути дела, представляет собой выступающую на поверхность мантию. Океаническое дно, таким образом, образует верхнюю границу конвективной ячейки; оно медленно движется (испытывает спрединг) от зон дивергенции к зонам конвергенции. Размер этих ячеек измеряется тысячами километров; некоторые из ячеек ныне активны, тогда как другие либо уже отмерли, либо временно бездействуют. Положение их в ходе геологической истории менялось, вызывая изменение тектонической зональности».

В 1962 г. Гарри Хесс из Принстона, служивший офицером на Тихом океане во время второй мировой войны, разработал и обобщил теорию раздвигания (спрединга) океанического дна в виде следующих положений[1]:

1) В мантии происходит конвекция со скоростью 1 см/год.

2) Восходящие ветви конвективных ячеек располагаются под срединно-океаническими хребтами.

3) С существованием конвективных ячеек связано возникновение наблюдаемого повышенного теплового потока и образование выраженных в рельефе поднятий.

[1] *H. H. Hess*, History of ocean basins, in: *A. E. Engel et al.* (eds), Petrologic Studies (Buddington Volume), Geol. Soc. Amer., pp. 617–618. © Reprinted by permission.

4) Мантийный материал поступает к поверхности в гребневой части этих хребтов.

5) Океаническая кора состоит из серпентинизированного перидотита, подвергшегося гидратации в результате выделения воды из мантии над восходящей ветвью конвективного течения. Иными словами, океаническая кора – это гидратированный материал мантии.

6) Однообразная мощность океанической коры определяется той максимальной высотой, до которой может подняться изотерма 500°С под срединно-океаническими хребтами.

7) Скорость распространения сейсмических волн под гребневыми зонами хребтов во всех слоях, включая мантию, на 10–20% меньше нормальной; она становится снова нормальной на флангах хребтов. Это объясняется повышенной температурой и интенсивным формированием разрывов; по мере удаления от гребня разрывы залечиваются, а температура падает.

8) Срединно-океанические хребты – эфемерные образования с продолжительностью жизни 200–300 млн. лет (что соответствует продолжительности существования конвективной ячейки).

9) Срединно-Тихоокеанское поднятие мезозойского возраста является единственным реликтом хребтов предыдущего конвективного цикла.

10) Весь океан фактически полностью очищается (старый материал замещается новым мантийным материалом) каждые 300–400 млн. лет.

11) Этим объясняется то, что дно океанов покрыто лишь относительно тонкой пленкой осадков, а также сравнительно небольшое количество подводных вулканических гор и отсутствие указаний на существование в настоящее время в океане пород древнее мела.

12) Океаническая колонка находится в состоянии изостатического равновесия с континентальной колонкой. Поверхность континентов достигает равновесия относительно уровня моря благодаря эрозии. Из этого с очевидностью вытекает, что толщина континентов зависит от глубины океанов.

13) Восходящие ветви, поднимающиеся под континентальными площадями, отодвигают разъединенные части континентов друг от друга с одинаковой скоростью, благодаря чему и образуются в полном смысле слова срединные хребты, как, например, в Атлантическом океане.

14) Континенты пассивно переносятся поверх мантии в результате конвекции, а вовсе не прокладывают себе с трудом путь сквозь массу океанической коры.

15) Их передние края подвергаются интенсивной деформации, когда сталкиваются с погружающимися вниз конвективными ветвями мантийного материала.

16) Океаническая кора, затягиваемая вниз в нисходящем конвективном течении, разогревается и теряет, выделяя в океан, заключенную в ней воду.

17) Чехол океанических осадков и вулканические подводные горы также съезжают вниз в перемалывающие челюсти нисходящего конвективного течения; они испытывают метаморфизм и в конечном счете, вероятно, спаиваются с континентальной массой.

18) Океанические бассейны представляют собой преходящие образования, тогда как континенты постоянны, хотя они и могут быть оторваны друг от друга или, наоборот, спаяны воедино, а также подвергнуться деформации на краях.

19) Земля постоянно находится в развитии, ее поверхность испытывает непрерывные изменения. Особенности ее рельефа, представленные в виде сферических гармоник, оказываются неожиданно закономерными, что является отражением закономерной системы мантийной конвекции и ее вторичных эффектов.

Лишь немногие из положений, сформулированных Хессом, как, например, относящиеся к редкости подводных гор или преобладанию перидотитов или серпентинитов (а не базальтов), не выдержали проверки более обильной информацией.

И вот благодаря Хессу полновесный вариант теории спрединга океанического дна Хизена и Дитца оказался перед лицом оживленной дискуссии и высказываний «за» и «против». Вскоре после этого идея спрединга океанического дна получила быстро распространяющееся признание. Печать была прямо-таки наводнена связанными с ней публикациями, частью вызванными, видимо, лишь стремлением не отстать от победителей.

Высказывались не только благоприятные для нее соображения. Выдающимися оппонентами этой идеи были известный русский геолог В. В. Белоусов, стойкий как скала, и американцы – отец и сын Мейергофы; они прежде всего возражали против идеи разделения континентов, процессов спрединга и интерпретации данных по магнитному полю океанов и по оледенению Гондваны. Возникли вопросы также в связи с силами. Но

под влиянием быстро накапливавшихся свидетельств в пользу спрединга океанического дна и в особенности результатов изучения широко распространенной системы полосовых магнитных аномалий некоторые из первоначально скептически настроенных ученых позже изменили свое мнение.

Дополнительная поддержка была получена со стороны смежных дисциплин. Стало ясно, что сейсмичность больших и промежуточных глубин связана с наклонными зонами субдукции, а составленная в 1961–1967 гг. карта расположения эпицентров землетрясений (рис. 18.1) с полной очевидностью продемонстрировала их приуроченность к краям плит. Более того, оказалось, что смещения по разрывам, происходящие во время землетрясений, увязываются с геометрией вращательного движения плит на сфере.

Различные дополнительные исследования имели эффект снежного кома. Проводились симпозиумы, писались книги, и еще до 1970 г. были опубликованы десятки статей в научных журналах, написанные известными учеными в области океанографии, геологии и геофизики.

СПРЕДИНГ ОКЕАНИЧЕСКОГО ДНА

В теории раздвижения или спрединга океанического дна утверждается, что океаническое дно разорвано вдоль оси глобальной системы срединно-океанических хребтов и что разъединенные сегменты коры медленно движутся в стороны от осевого рифта (рис. 20.17). Срединно-Атлантический хребет представляет собой ту центральную полосу, по которой, в соответствии с механизмом спрединга, произошло отделение континентов Северной и Южной Америки от Европы и Африки и в которой сформировалась кора Атлантического океана.

Система срединно-океанических хребтов (рис. 20.18) является средоточием постоянно продолжающегося раздвижения глобального масштаба. Полагают, что



РИС. 20.17

Гипотетический разрез океана, на котором показан срединно-океанический спрединговый хребет (слева), несколько вулканических океанических островов и зона субдукции у островной дуги или окраины андского типа. Базальтовая лава изливается на океаническом хребте и в процессе спрединга к зоне субдукции перекрывается осадками. Край зоны субдукции маркируется желобом, в котором накапливаются глубоководные осадки. Во время субдукции осадки соскребаются с погружающейся коры, сминаются в складки и нарушаются разрывами. За счет высокого давления в породах под желобом идет метаморфизм фации голубых сланцев. В еще более глубоких горизонтах базальт переходит в амфиболит и далее в эклогит. На глубине около 100 км начинается частичное плавление, и образующиеся расплавы поднимаются к поверхности, формируя вулканы с андезитовым составом излияний и вулканические островные дуги. (Из работы Спенсера, 1977; по Хессу, Рингвуду, Грину и Миасиро.)

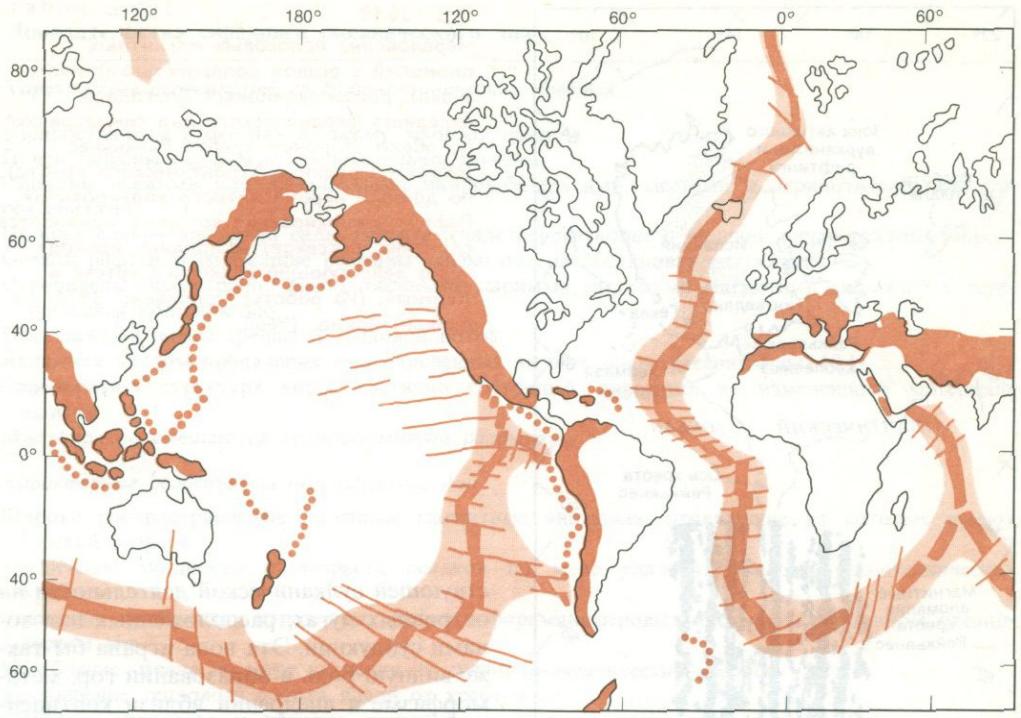


РИС. 20.18

Главные элементы земной коры. Континентальные платформы и дно океанических впадин пересекаются активными горными складчатыми поясами и подводными хребтами. Система срединно-океанических хребтов (темные полосы) рассечена трансформными разрывами (жирные темные линии), смещающими части хребта. Жирными точками показаны глубоководные желоба около островных дуг или континентальных окраин. Землетрясения ассоциируются главным образом со срединно-океаническими хребтами, желобами, островными дугами и горными поясами. (Из работы Уилли, 1972; получено благодаря любезности сотрудников журнала «Юниверсити оф Чикаго мэгезин».

Калифорнийский залив, Красное море, Аденский залив, так же как рифтовые долины Восточной Африки, озера Байкал, Мертвого моря и других рифтов Иордании, относятся к структурам ранней стадии разделения коры в тех местах, где либо начинается формирование срединно-океанических хребтов, либо они пересекаются с континентами. Максимальные величины перемещения получены для Индии, которая с юрского периода сместилась в северном направлении на 70° по долготе, т. е. приблизительно на 8000 км. Подсчитано, что Исландия расширилась за кайнозой на 200, а возможно, и на 400 км за счет внедрения даек и формирования рифтовых структур. Активные рифтовые структуры Исландии вытянуты вдоль северного продолжения Срединно-Атлантического хребта, проходящего через остров (рис. 20.19).

Характер процесса. Представления о системе спрединга океанического дна расходятся в деталях, но все они рассматривают срединно-океанические хребты как область возникновения океанической коры (рис. 20.14, 20.17), а глубоководные желоба – как область поглощения океанической коры в результате субдукции. Окраины континентов и островные дуги оказываются местом столкновения разных типов коры.

По мере отдаления пород океанического дна от породивших их срединно-океа-



РИС. 20.19

Чередование полосовых магнитных аномалий с разной полярностью (разного знака), располагающихся благодаря спредингу океанического дна симметрично по обеим сторонам хребта Рейкьянес (отрезок Срединно-Атлантического хребта); по данным аэромагнитного картирования. Рифт, с возникновения которого начинается спрединг, рассекает Исландию, проходя через действующие вулканы Суртсэй и Хеймаэй. (Из работы Салливана, 1974; по данным Вайна, 1966.)

нических хребтов они передвигаются в более глубокие части океана; здесь они охлаждаются, и на них накапливается осадочный чехол, мощность которого возрастает с увеличением расстояния от срединно-океанических хребтов.

На конвергентных участках кора и лежащие на ней осадки испытывают субдукцию и под системой дуга–желоб или континентальной окраиной увлекаются вниз, в мантию. Самая верхняя часть мантии также перемещается вместе с корой и вместе с ней подвергается субдукции.

Если бы в погружающемся на глубину материале океанической коры содержался в качестве ее составной части серпентин, то в результате дегидратации на соответствующей глубине ниже точки перегиба высвобождалось бы большое количество воды, облегчающей плавление и образование магмы и тем самым благоприятствующей вулканической деятельности на островных дугах, расположенных над зонами субдукции. Эта вода играла бы также видную роль в образовании гор, метаморфизме и внедрении вблизи континентальных окраин батолитовых интрузий.

Установлено, что скорость спрединга, направленного от центральных зон срединно-океанических хребтов, варьирует приблизительно от 1 до 8 см/год. Океанические плиты движутся в три-четыре раза быстрее, чем континентальные. Особенно велика скорость в Тихом океане, достигающая 8 см/год в случае спрединга, идущего в стороны от Восточно-Тихоокеанского поднятия. Скорость увеличивается с увеличением широты. Наблюдения над мощностью и возрастом осадков дна океанов показывают, что скорость спрединга в прошлом изменялась.

Доказательства спрединга. Аргументы в пользу спрединга океанического дна перечислены в табл. 20.1. Глубоководное бурение, проведенное начиная с 1968 г. с исследовательского судна «Гломар Челленджер» в местах, рассредоточенных по площади всех океанических бассейнов, показало, что нигде на дне океанов не обнаруживается осадков древнее юрских и что все имеющиеся осадки располагаются в порядке их возраста в соответствии с их удалением от источников спрединга (рис. 20.20). Что должно было

Таблица 20.1
Доказательства спрединга океанического дна

Характерные особенности срединно-океанических хребтов
Распространены в океанах по всему земному шару
Почти лишены осадков и, следовательно, молоды
Сложены свежими или измененными пиллоу-базальтами, местами с перидотитами или пироксенитами
Положительные аномалии силы тяжести (свидетельствующие о наличии внизу тяжелых пород)
Осевой рифт и близлежащие разрывы указывают на обстановку растяжения
Ограничены симметрично расположенными парными системами магнитных аномалий с чередующейся полярностью
Повышенный (выше среднего) тепловой поток
Являются местом проявления многочисленных мелких землетрясений (рис. 18.1)
Своеобразная структура коры, частично состоящей, вероятно, из измененного материала мантии
Многократно смещаются трансформными разрывами
Характерные особенности океанического дна
Широко распространенные линейные магнитные аномалии, древнейшие из которых имеют юрский возраст
Увеличение мощности и возраста осадков по мере удаления от срединно-океанических хребтов
Смещение тропических коралловых рифов и фораминиферовых илов на современном океаническом дне
Углубление океана по мере удаления от срединно-океанических хребтов
Уменьшение теплового потока вдали от хребтов
Скорость спрединга и история инверсий магнитного поля подтверждаются результатами глубоководного бурения
Вулканические цепи (типа Гавайских вулканов) предполагают наличие мантийных струй
Большие горизонтальные смещения по трансформным разрывам
Горячие подводные источники, приуроченные к зонам трансформных разрывов
Тройные сочленения срединно-океанических хребтов
Линейное расположение последовательно все более молодых вулканических конусов и подводных гор (см. гл. 19)
Характерные особенности глубоководных желобов и зон субдукции
Отрицательные аномалии силы тяжести
Низкий тепловой поток
Разрывные нарушения вблизи краев
Являются местом проявления промежуточных и глубоких землетрясений

произойти с осадками древнее юры? Установлено, что наблюдаемая скорость спрединга близка той, которая была вычислена по магнитным аномалиям; в керне океанических осадков, кроме того, наблюдается сходное чередование магнитной полярности за тот отрезок времени, к которому относится керн.

Поскольку все эти факты, как и те, которые указаны в табл. 20.1, убедительно объясняются моделью спрединга океанического дна, эта концепция привела к революционному перевороту в геологических представлениях о тектонике и стабильности континентов и океанических бассейнов.

Вскоре вслед за Хессом ученые, занимающиеся проблемами тектоники, также поняли, что движение плит несомненно имеет отношение к тектонике, и в итоге не просто спрединг океанического дна, но теория тектоники плит стала новым объединяющим лозунгом в геологии. Впервые это было сформулировано

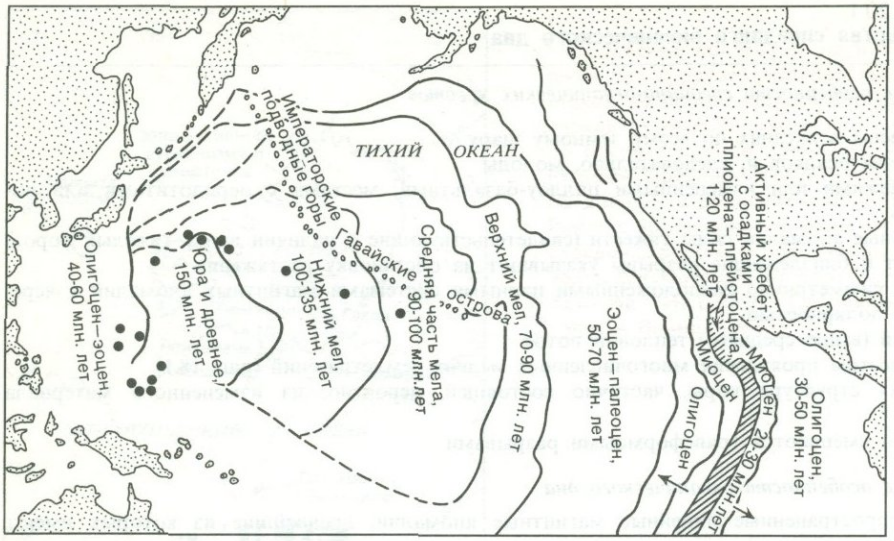


РИС. 20.20

Карта возраста осадков океанического дна на площади между осью (местом начала) спрединга в Восточно-Тихоокеанском поднятии (современные осадки) и западной частью Тихого океана (осадки юрского возраста). Темные кружки – скважины, пробуренные с судна «Гломар Челленджер» (рейс 6). (По материалам Проекта глубоководного бурения.)

в 1967 г.: «Спрединг океанического дна и тектоника плит могут быть использованы в качестве основы для понимания процессов тектонической эволюции континентов и океанов». Эта теория, упомянутая нами еще в гл. 1, теперь должна быть рассмотрена более обстоятельно.

ТЕКТОНИКА ПЛИТ

Открытие повышенного теплового потока на срединно-океанических хребтах; симметричное расположение на океаническом дне линейных магнитных аномалий с разной полярностью; приуроченность большого числа землетрясений к хребтам, зонам разрывов в океане и краям континентов; приуроченность глубокофокусных землетрясений к районам вблизи глубоководных желобов (рис. 18.1); правдоподобность механизма спрединга океанического дна,– все это привело к более широкой концепции тектоники плит. Согласно Дитцу, тектоника плит представляет собой объединение концепций спрединга океанического дна, трансформных разрывов, субдукции в зонах желобов и дрейфа континентов.

Океанические и континентальные плиты. К семи крупнейшим плитам относятся плиты Евразии, Африки, Северной Америки, Южной Америки, Тихого океана, Индо-Австралии и Антарктиды (рис. 20.21). Более мелкие плиты – Аравийская, Карибская, Филиппинская, Наска, Кокос и шесть или восемь других, выделение которых зависит от принятого подхода. Плиты состоят из океанической или континентальной коры или той и другой вместе. Северо-Американская и Южно-Американская плиты включают дно Атлантического океана к западу от Срединно-Атлантического хребта; дно восточной Атлантики присоединяется к Евразии и Африке. Точно так же разные части Индийского океана относятся

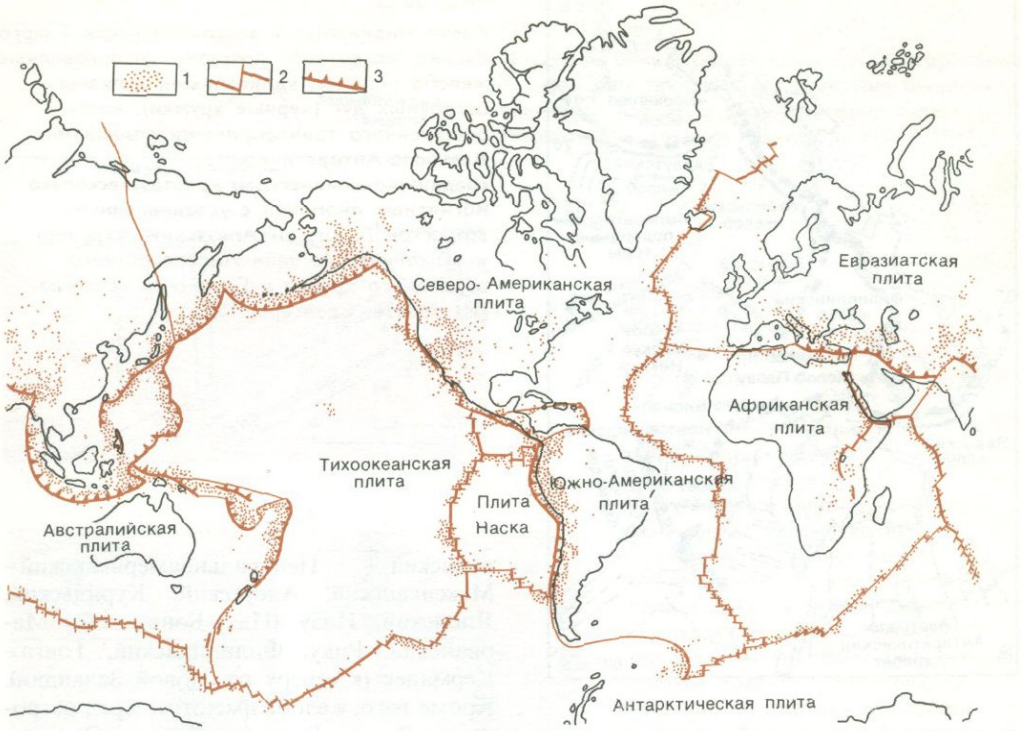


РИС. 20.21

Сейсмические пояса и основные плиты. Изучение распределения землетрясений на земном шаре показывает существование непрерывных поясов сейсмической активности, проходящих вдоль срединно-океанических хребтов и других краев гигантских коровых плит. Во внутренних частях океанических сегментов этих плит землетрясений очень мало. Глобальная картина распределения землетрясений была одним из важнейших факторов, приведших Хесса к его теории спрединга океанического дна. *1* – эпицентры землетрясений; 2 – спрединговые границы, на которых происходит наращивание плит; 3 – границы, на которых происходит поглощение плит. (По материалам Национальной академии наук.)

к Африке, Индии и Австралии, а Антарктическая плита включает океаническое дно окружающих ее морей.

Срединно-океанические хребты. Типичный срединно-океанический хребет – это вытянутое гористое сводообразное поднятие с осевым рифтом шириной в несколько километров и глубиной около километра, окаймленным несколькими наклонными и ограниченными разрывами блоками (рис. 20.16). Вначале исследование этих хребтов могло вестись только с надводных кораблей, но с 1972 г., когда начались работы по Франко-Американскому проекту изучения срединно-океанических хребтов (FAM OUS), на одном из отрезков Срединно-Атлантического хребта были произведены наблюдения с близкого расстояния с применением управляемых погружающихся аппаратов. Использовалась акустическая техника, крупномасштабное фотографирование и сканирующая сонарная[1] техника. В условиях ограниченной видимости применение искусственного освещения позволило визуально наблюдать детали и фотографировать. Образцы пород захватывались механическим путем. Были проведены наблюдения над особенностями лав, излившихся под водой: их

[1] Sonar – сокращение от Sound navigation and ranging – звуковая навигация и определение расстояний. – *Прим. перев.*



РИС. 20.22
Карта Индийского и восточной части Тихого океана, на которой показаны глубоководные желоба (черные, удлиненные), вулканы островных дуг (черные кружки), часть рассеченного трансформными разрывами Австрало-Антарктического срединно-океанического хребта, несколько магнитных аномалий с установленным возрастом (к югу от Алеутских островов) и вулканические цепи Императорского подводного хребта и Гавайских островов. (Из работы Спенсера, 1977.)

подушечной текстурой (пиллоу-текстурой), крутыми фронтальными частями лавовых потоков, вулканическими холмами и гребнями внутри осевого рифта; наблюдались также многочисленные разрывы. Одновременно были выполнены сейсмические, гравиметрические, магнитометрические и батиметрические исследования.

На изученной площади хребет характеризуется короткими отрезками осевого рифта, вытянутыми в северо-северо-восточном направлении. У края рифта мощность коры достигает примерно 6 км. Эпизодические излияния лав базальтового состава, по-видимому, происходят не из линейных трещин, а скорее из точечных центров излияния; некоторые из последних образуют вулканические конусы. Можно думать, что в это же время происходит внедрение многочисленных даек.

Океанические желоба и зоны субдукции. Основные активные в настоящее время желоба сосредоточены у границ Тихого океана и подчиненных ему бассейнов. К ним относятся желоба Чилийско-Перуанский, Центральноамериканский – Мексиканский, Алеутский, Курильский, Японский, Идзу (Идзу-Бонинский), Марианский, Рику, Филиппинский, Тонга – Кермадек (к северу от Новой Зеландии). Кроме того, желоба имеются перед островами Пуэрто-Рико и Ява и Суматра (рис. 20.22). Геологически молодые зоны субдукции недавнего геологического прошлого существуют в Гималаях и Средиземноморском регионе.

При опускании холодных, хрупких океанических плит по наклонным зонам субдукции возникает множество мелких, промежуточных по глубине и глубоких землетрясений, о которых уже говорилось раньше. Они приурочены к узкой полосе толщиной около 20 км в верхней части погружающейся плиты (рис. 20.23). Там, где погружающиеся плиты несут на себе достаточно мощный покров осадочных и вулканических пород, эти породы деформируются с образованием горных поясов покровно-складчатого строения (рис. 20.23). Освободившись таким образом от большей части или даже всего своего груза, состоящего из плавучего, относительно легкого материала, опускающаяся плита может, вероятно, сохранять свою целостность до глубины 400–700 км, после чего она расплавляется и поглощается веществом мантии. Частичное плавление части опускающейся

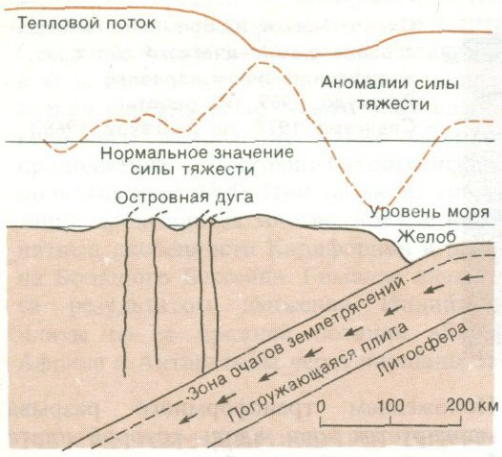


РИС. 20.23

Предполагаемый разрез через часть территории Японии. Для простоты не показаны значения теплового потока и аномалии поля силы тяжести. (По данным Мацуды и Уеды, 1971.)

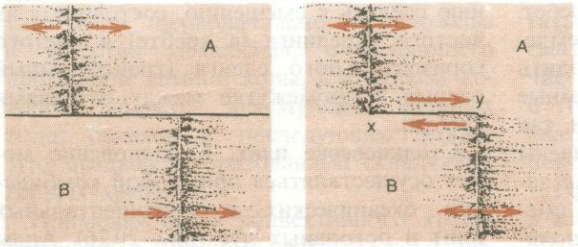


РИС. 20.24

Образование трансформного разрыва. Обычный поперечный разрыв (случай *а*) смещает блоки A и B в противоположных направлениях; внешне это напоминает смещения, наблюдающиеся в срединно-океанических хребтах; протяженность разрыва не ограничена. При настоящем трансформном разрыве (случай *б*) спрединг океанического дна происходит в противоположных направлениях от обоих смещенных отрезков хребта; относительное смещение по разрыву происходит (и сопровождается возникновением землетрясений) только на отрезке *xy* между двумя отрезками хребта.

плиты, сложенной породами океанической коры, на глубине от 50 до 100 км приводит к образованию магмы, которая поднимается по направлению к поверхности (рис. 20.14, 20.23). Вулканические излияния могут быть представлены базальтами, андезитами или риолитами, которые формируются в зависимости от того, насколько сильному изменению подвергся первичный состав магмы в результате магматической дифференциации или благодаря ассимиляции сиалического материала на пути к поверхности. Андезиты являются самыми распространенными породами на площади позади островных дуг. При более полном расплавлении массы осадочного материала вблизи основания складчатого комплекса образуются батолиты гранитного или гранодиоритового состава, окруженные типичными метаморфическими ореолами.

Границы плит. В зависимости от характера относительного перемещения плит границы между ними варьируют. Они могут быть 1) дивергентными, или границами растяжения, когда плиты растаскиваются в разные стороны, как это происходит в системе срединно-океанических хребтов; 2) конвергентными, или границами сжатия, когда плиты сталкиваются друг с другом или скользят одна под другую, что наблюдается в зонах субдукции, состоящих из островной дуги и желоба; 3) трансформными в тех случаях, когда плиты скользят относительно друг друга по трансформным разрывам (рис. 20.18, 20.24).

Обычно считается, что основание движущихся плит находится внутри слоя пониженных скоростей сейсмических волн, т. е. в астеносфере (рис. 20.25).

Трансформные разломы. Разломам, по которым происходит смещение срединно-океанических хребтов, Дж. Т. Уилсон в 1965 г. дал название трансформных, поскольку они резко обрываются, уступая место зонам сжатия или растяжения. Обычные разрывы затухают постепенно.

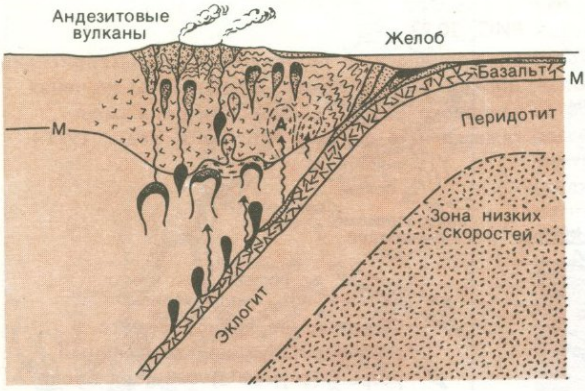


РИС. 20.25
Схематическое изображение гипотезы спрединга океанического дна в модифицированном варианте Рингвуда, 1969. (Из работы Спенсера, 1977; по Рингвуду, 1968.)

Направление относительного движения и резкие окончания трансформного разрыва изображены на рис. 20.24. На рис. 20.24, *а* показано традиционное представление о разрыве, смещающем хребет. При такой ситуации смещение и землетрясения должны были бы происходить по всей длине разрыва. Но трансформные разрывы озадачивали исследователей, так как землетрясения в них ограничены только той частью разрыва, которая заключена между крайними точками смещенных отрезков хребта, что предполагает резкое прекращение относительного перемещения блоков за этими точками. На рис. 20.24, *б* показано такое движение, при котором смещение раздвигающихся плит происходит в противоположных направлениях только в промежутке между хребтами. Смещение хребта трансформным разрывом оказывается, следовательно, лишь видимым (рис. 20.24, *б*). Положением трансформного разрыва маркируется зона, вдоль которой плита была взломана в какой-то момент в прошлом. Позже движение по этому нарушению свелось к смещению, состоящему из чистого спрединга (в хребте) и чистого горизонтального сдвига (трансформный разрыв в промежутке между отрезками хребта).

Столкновение плит. Столкновение может осуществляться при любой комбинации океанических и континентальных плит и островных дуг (рис. 20.26). Анды Южной Америки, Гималаи и Береговые хребты на западе США являются результатом тектоники плит, когда океаническая плита сталкивается с континентальной. Вдоль Тихоокеанского побережья Южной Америки, Центральной Америки и южной Мексики еще протягиваются желоба и активные зоны субдукции, но начиная от Калифорнийского залива и се-

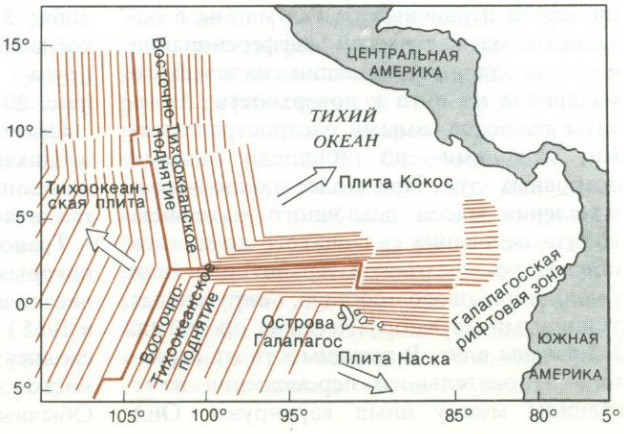


РИС. 20.26
Тройное сочленение плит в восточной части Тихого океана вблизи островов Галапагос. Линиями показана величина спрединга за 1 млн. лет. Обратите внимание на разницу в скорости спрединга: низкой вблизи Галапагосской рифтовой зоны и относительно высокой на Восточно-Тихоокеанском поднятии.

вернее такого рода желоба отсутствуют. Причина заключается в том, что плита Северной Америки – Северной Атлантики в ходе своего дрейфа в западном направлении перекрыла не только зону глубоководного желоба, но также северное продолжение Восточно-Тихоокеанского поднятия (рис. 18.4). При такой интерпретации проясняются многие, прежде непонятные, особенности Калифорнии и района Большого Бассейна. Гималаи являются результатом движения Индийской плиты из ее прежней позиции вблизи Африки и Антарктиды через площадь, занятую в настоящее время Индийским океаном, и затем поддвигания ее под южную окраину Азии (рис. 20.27).

Проведя параллель между мощными осадками прошлых эпох и теми осадками, которые накапливаются сейчас в системах активных островных дуг, на континентальных шельфах или в области континентальных склонов по всему земному шару, мы получаем возможность приложить модель тектоники плит к Аппалачам, Альпам и другим сложным горным сооружениям любого возраста от кайнозоя до докембрия.

МЕХАНИЗМ ДВИЖЕНИЯ ПЛИТ

Конвекция. Конвективные течения в мантии были первоначально предложены в качестве механизма, объясняющего прогибание земной коры, следствием которого является аккумуляция мощных толщ осадков и последующее смятие этих осадков с образованием складчатых горных хребтов.

Применяя идею конвективного круговращения к спредингу океанического дна, поначалу полагали, что в него вовлекается вся мантия. Полученные позже данные показали, однако, что мантия обладает скорее концентрическим распределением плотности, а не является однородной смесью, взболтанной в результате конвекции от основания до кровли. Исходя из этого, многие геологи и геофизики считают, что конвекция происходит только в верхней мантии (рис. 20.4, 20.7, 20.14). Другие все же допускают возможность конвективного подъема небольших порций материала из средних и нижних горизонтов мантии в форме горячих струй.

В одном из вариантов конвективной модели спрединга океанического дна предполагается, что горизонтальная верхняя часть конвективной ячейки переносит на себе литосферу, как если бы это была лента конвейера. В другом варианте допускается более быстрое конвективное движение в верхней мантии под литосферой, благодаря чему возникает сила тяги, действующая на основание подкорового слоя и заставляющая его медленно двигаться вперед. Еще один вариант предусматривает возможность того, что горячие струи, поднимающиеся из мантии в горячих точках, в астеносфере растекаются и передвигают по латерали расположенные над ней плиты.

Проявление конвекции известно только в жидкостях и газообразных материалах. Поэтому некоторые геофизики считают конвекцию в твердом веществе невозможной или по меньшей мере маловероятной. Но с другой стороны, многие ученые полагают, что привычные представления о твердости, прочности и вязкости неприложимы к веществу мантии и что породы в недрах Земли текут за счет высокотемпературного крипа, как это происходит в горячих металлах. В породах, смятых в складки, обнаруживаются доказательства пластичного течения, происходившего на умеренных глубинах, так что время (наряду с температурой и давлением) служит, вероятно, важным фактором, обеспечивающим конвекцию в твердых мантийных породах. Расчеты, сделанные для переноса тепла внутри Земли, свидетельствуют, по-видимому, о несоразмерности низкой теплопроводности пород и действительного распределения тепла в недрах, так что конвективное течение в той или иной форме оказывается просто необходимым.

Оппоненты тех теорий, в которых принимается постулат о наличии в ман-

тии конвективных течений, сомневаются в существовании на глубине соразмерных источников тепла, поскольку можно думать, что в мантии, сложенной породами ультраосновного состава, содержится очень мало урана или других радиоактивных элементов.

Источники энергии. Возможными источниками энергии для предполагаемого конвективного течения являются следующие: 1) радиоактивность; 2) тепло, выделяемое при фазовых превращениях, таких, как переход базальта в эклогит; 3) гравитационное оседание определенных компонентов, как, например, опускание железа из мантии в ядро; 4) тепло, выделяемое при кристаллизации железа на границе внешнего и внутреннего ядра; 5) воздействие на твердые оболочки Земли лунных и солнечных приливов.

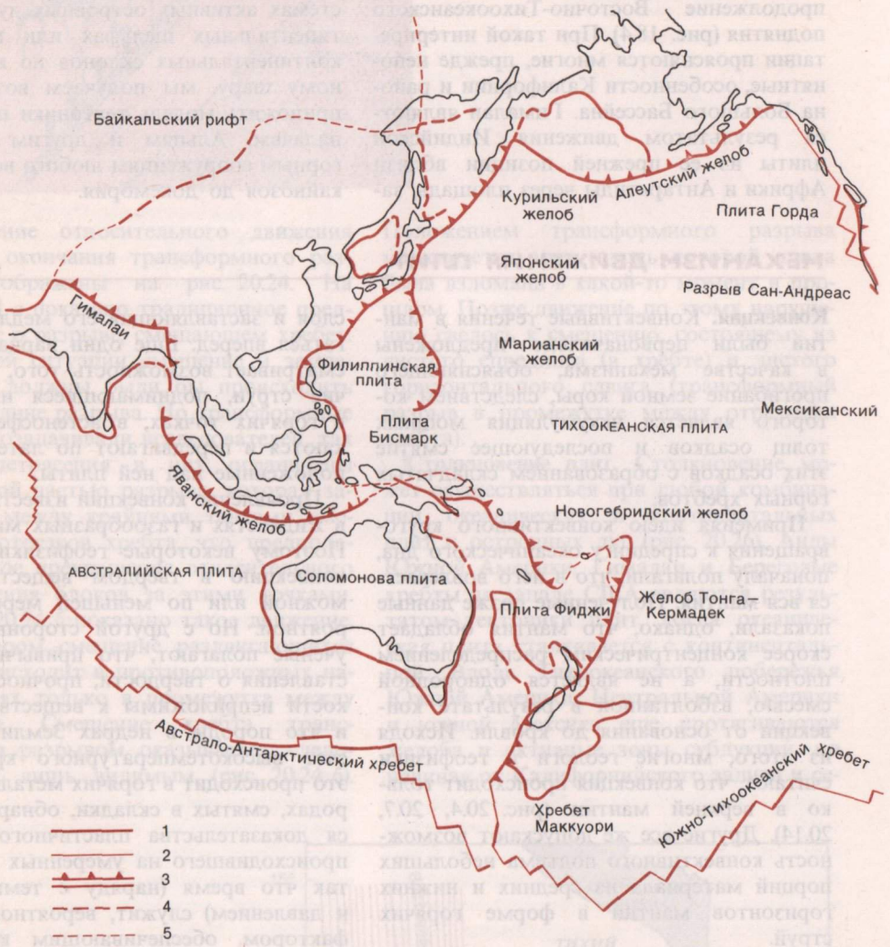
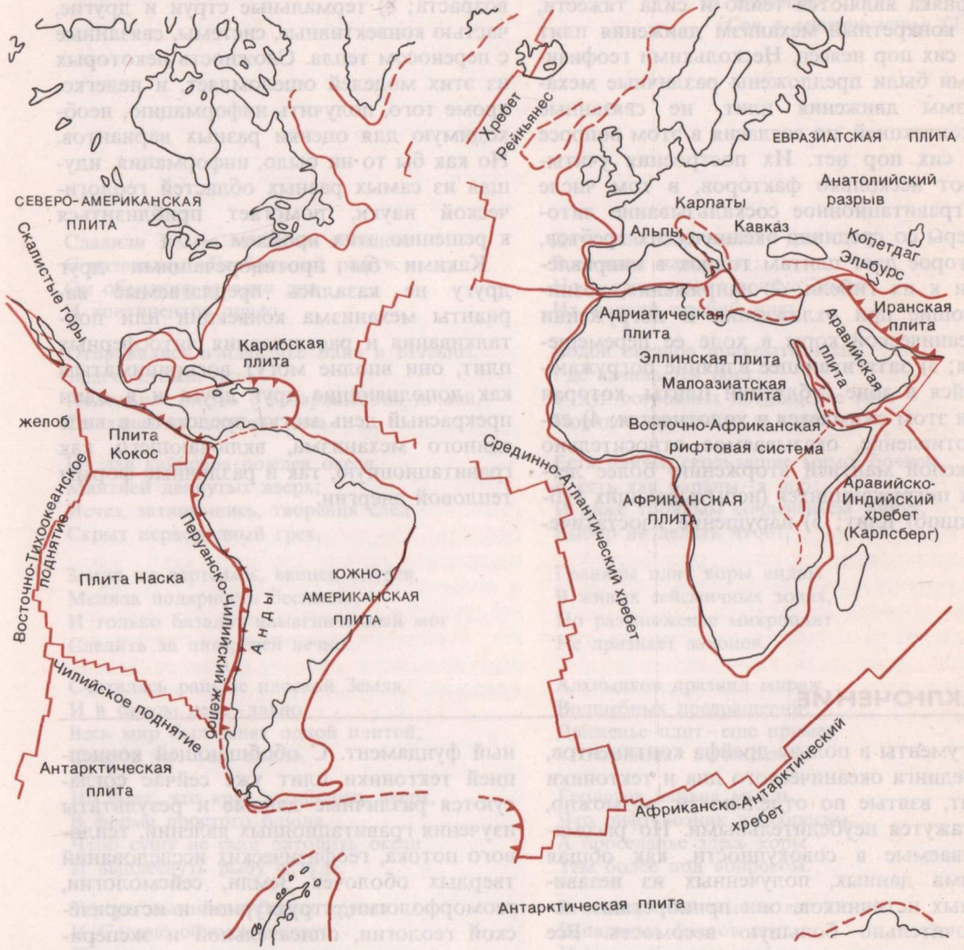


РИС. 20.27

Размещение на поверхности земного шара плит, находящихся в движении относительно друг друга. Границы плит относятся к одному из трех типов: 1) *оси срединно-океанических хребтов или поднятий, где происходит дивергенция плит с образованием новой базальтовой океанической коры*; 2) *трансформные разрывы, где плиты скользят относительно друг друга*; 3) *зоны субдукции, где происходит конвергенция (столкновение) плит, одна из которых уходит под фронтальный край другой плиты. Фронтальные части плит отмечены линиями с зубчиками. 1*–оси хребтов; *2*–трансформные разломы; *3*–зоны субдукции; *4*–зоны растяжения внутри континентов; *5*–предполагаемые границы плит. (Из работы Дьюи: *Dewey, Plate Tectonics, Sci. Amer., vol. 226, N°.5, pp. 56–58, 1972.* © 1972 by Scientific America, Inc. All right reserved.)



Защитники и оппоненты имеются у каждого из этих возможных источников энергии.

Причины движения плит, не связанные с конвекцией. Если главными движущими силами при перемещении плит почти наверняка являются тепло и сила тяжести, то конкретный механизм движения плит до сих пор неясен. Несколькими геофизиками были предложены различные механизмы движения плит, не связанные с конвекцией, но согласия в этом вопросе до сих пор нет. Их построения учитывают несколько факторов, в том числе 1) гравитационное соскальзывание литосферы со срединно-океанических хребтов, которое дает плитам толчок в направлении к их гибели; 2) напряжения, возникающие при охлаждении и погружении океанической коры в ходе ее перемещения; 3) затягивающее влияние погружающейся в зоне субдукции плиты, которая при этом сжимается и уплотняется; 4) сопротивление, оказываемое относительно тяжелой мантией вторжению более легких погружающихся (испытывающих субдукцию) плит; 5) нарушение изостатического равновесия, которое может быть вызвано эрозией на континентах или накоплением добавочного груза мощных толщ осадков; 6) возможность больших различий между плитами с точки зрения их состава, строения и геологического возраста; 8) термальные струи и другие, частью конвективные, системы, связанные с переносом тепла. Сложность некоторых из этих моделей ошеломляет, и нелегко, кроме того, получить информацию, необходимую для оценки разных вариантов. Но как бы то ни было, информация, идущая из самых разных областей геологической науки, помогает приблизиться к решению этих проблем.

Какими бы противоречащими друг другу не казались предлагаемые варианты механизма конвекции или подталкивания и растягивания литосферных плит, они вполне могут восприниматься как дополняющие друг друга и в один прекрасный день могут предстать в виде единого механизма, включающего как гравитационную, так и различные формы тепловой энергии.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Аргументы в пользу дрейфа континентов, спрединга океанического дна и тектоники плит, взятые по отдельности, возможно, покажутся неубедительными. Но рассматриваемые в совокупности, как общая сумма данных, полученных из независимых источников, они приобретают исключительно большую весомость. Все время поступает дополнительная информация о мантии, океанической коре и породах океанического дна. Продолжающиеся работы по определению изотопного возраста горных пород, вероятно, подведут под эти идеи еще более прочный фундамент. С обобщающей концепцией тектоники плит уже сейчас согласуются различные данные и результаты изучения гравитационных явлений, теплового потока, геофизических исследований твердых оболочек Земли, сейсмологии, геоморфологии, структурной и исторической геологии, описательной и экспериментальной петрологии.

В журнале «Nature» в 1971 г. был помещен очень своеобразный обзор геотектонических идей, изложенных в стихах Б. К. Кингом и Дж. К. П. Кингом:

ГЛОБАЛЬНЫЙ РИФТ И ТЕКТОНИКА ПЛИТ

«За сорок минут я смогу накинуть
ожерелье вокруг всей Земли.»

В. Шекспир.
«Сон в летнюю ночь» (1599)

Сдавили Землю изящным кольцом
С названьем «Глобальный рифт».
Он объяснил загадки дна
И континентов дрифт.

Отправились в плаванье Вайн и Мэтьюз,
Задача стояла одна –
Подольше тянуть с возвращеньем домой,
Ссылаясь на спрединг дна.

Из лав кайнозоя рожден океан,
Мантией двинутых вверх;
Исчез, затянувшись, творения след –
Скрыт первородный грех.

Земля же вертелась, вконец одурев,
Меняла полярность беспечно,
И только базальт намагниченный мог
Следить за инверсией вечно.

Считалась раньше плоской Земля,
И в самом деле – давно
Весь мир был занят одной плитой;
Споров же было полно.

Но факт, что края загибались вверх,
В форме простого блюда,
Чтоб сушу не смог затопить океан
И выплеснуть рыбу оттуда.

Теперь мы знаем – Земля кругла
И Солнце обходит вокруг;
Поэтому в сказку о спрединге дна
Не просто поверить вдруг,

Если только Земля не растет как пузырь,
Раздувая себя беспрестанно.
Но тяжести сила мешает и здесь –
Значенье ее постоянно.

И вот опять плита в ходу
В тектонике, как встарь,
Хотя по-прежнему в коре
Есть сима и сиаль.

Двух этих кор хватает для
Всех плит наперечет;
Но в странствиях вокруг Земли
Их жалкий жребий ждет.

Водой океанов прикрыты края,
Где начинается рост;
У дуг островных поглощенье идет –
Порядок практичен и прост.

Есть плиты, скользящие мимо, бочком,
А есть как бараны – в лоб;
И даже тройным сочлененьем живут,
Выбор не делать чтоб!

Границы плит коры видны
В живых сейсмичных зонах,
Но размноженье микроплит
Не признает законов.

Алхимиков дразнил мираж
Волшебных превращений;
Движенье плит – еще пример
«Точнейших» вычислений.

Геологов наивна мысль,
Что рифт возник по сбросам,
А проседанье здесь коры
Тем более под вопросом.

В основу этой мысли лег
Банальных фактов круг
Немодной стратиграфии
И иже с ней наук.

Намного прогрессивней взгляд,
Что каждая «mañana»
Толкает Африку на путь,
Которым шла Гондвана.

Мак-Кензи верит: пара плит,
Послушавшись команды,
Раскроет рифт, и поплывут
Суда к портам Уганды.

Аномальную тяжесть стремясь объяснить,
Хан и Гердлер увидели с чувством тоски:
В рифте Грегори втиснулась мантии пасть
И Африку рвет на куски.

Но люди Африки против раскола.
Их голос над миром несется грозно:
Уймите дрифт! Заткните рифт!
Пока еще не поздно!

Б. К. Кинг
Факультет геологии Бедфордского колледжа, Лондон

Дж. К. П. Кинг
Факультет геодезии и геофизики, Кембридж

Источник: Nature, vol. 232, July 2, 1971. Перепечатывается с разрешения авторов и журнала «Nature».

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ

Идея континентального дрейфа, не пользовавшаяся популярностью в течение десятилетий, завоевала теперь, когда она подкрепляется теорией спрединга океанического дна, широкое признание. Согласно этой концепции, поднимающаяся магма проникает по рифтовым структурам срединно-океанических хребтов, кристаллизуется и намагничивается во время охлаждения; затем ее масса раскалывается и перемещается в результате спрединга в обе стороны от хребта в виде новой океанической коры, движущейся со скоростью нескольких сантиметров в год. В соответствии с происходящими время от времени инверсиями магнитного поля Земли в расширяющейся коре возникает полосчатое расположение магнитных аномалий, которые поддаются датировке. Во многих местах хребты и полосовые магнитные аномалии смещаются трансформными разрывами. В зонах островных дуг и океанических желобов или у континентальных окраин океаническая кора и подкоровый слой изгибаются вниз и по зонам субдукции опускаются в глубь Земли. Но по крайней мере часть груза морских осадков, накопившихся за время движения плит, вследствие их меньшей плотности остается на относительно неглубоких уровнях.

В пользу концепции спрединга океанического дна говорят такие особенности срединно-океанических хребтов, как высокие значения теплового потока, скудные осадки, неглубокие землетрясения, пиллоу-базальты и изредка перидотиты, рифтовые структуры растяжения, положительные аномалии силы тяжести. Она дополнительно подтверждается рядом черт океанического дна (парные магнитные аномалии разного знака; отсутствие осадков древнее юры; перемещение осадков, образовавшихся в тропическом климате, в другие климатические пояса) и особенностями, связанными с системами желобов (пониженный тепловой поток; отрицательные аномалии силы тяжести; промежуточные и глубокие землетрясения, сосредоточенные в наклонных зонах; вулканизм островных дуг).

Концепция спрединга океанического дна переросла в концепцию тектоники плит, которая предполагает, что как континентальная, так и океаническая кора разделены на некоторое количество плит; плиты разъезжаются в разные стороны, сталкиваются друг с другом или проскальзывают относительно друг друга вдоль трансформных разрывов. Причина движения неизвестна, но предпочтение отдается конвекции в верхней мантии.

Тектоника плит в совокупности со спредингом океанического дна объясняет соответствие очертаний краев разъединенных ныне континентов, их стратиграфии, тектонических структур, а также сходство их палеонтологических характеристик. Объяснение получают аномалии в размещении палеоклиматов, как, напри-

мер, оледенение в тропиках и кораллы в арктических широтах, большие горизонтальные смещения по трансформным разрывам, разъединенные местонахождения однотипных ископаемых фаун и флор и другие, ранее ставившие в тупик геологические загадки.

Складчатые горные сооружения приурочены к вытянутым поясам, характеризующимся интенсивным смятием, тектоническим надвиганием, региональным метаморфизмом и во многих случаях батолитовыми интрузиями. Их история обычно состоит из медленного накопления мощных толщ осадочных пород, сложных процессов прогрева во время орогенеза и деформации, вызванной столкновением плит, эрозии в различной степени. Очевидное сокращение поперечных размеров толщ осадочных пород в результате складчатости и надвигания может достигать, как это наблюдается в горных хребтах, сотен километров. По возрасту складчатые горные системы уходят в глубь геологической истории до раннего докембрия, примером чему служат некогда гористые, теперь же снивелированные структуры Канадского щита. Представляется, что подход с позиций тектоники плит может служить той общей меркой, которая приложима ко всем таким складчатым горным системам.

ВОПРОСЫ

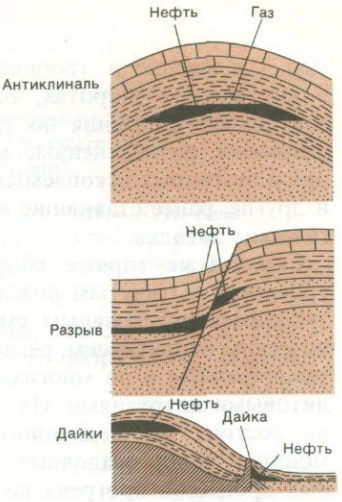
1. Какая совокупность данных приводит к предположению о существовании дрейфа континентов?
2. Каким образом изучение ископаемых организмов наводит на мысль об относительном перемещении континентов?
3. Какие данные по строению океанического дна подтверждают идею движения континентов?
4. Какие три типа относительного движения соседних плит возможны?
5. Какие типы пород и структур формируются на дивергентных границах плит?
6. Сравните типы пород и структур, которые формируются в зонах субдукции и на дивергентных границах.
7. Долгое время разрыв Сан-Андреас в Калифорнии считался сдвигом. Теперь его называют трансформным разрывом. Что в действительности означает это различие?
8. С течением времени плита может увеличиваться или уменьшаться в размерах либо сохранять прежние размеры. Последний случай доказать трудно, но увеличение или уменьшение отдельных плит установить можно. Приведите какие-нибудь примеры того и другого случая и расскажите, каким образом можно установить изменение размеров плит.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Marvin U., 1973, Continental Drift: The Evolution of a Concept, Smithsonian Institution Press, Washington, D.C.

Sullivan W., 1974, Continents in Motion: The New Earth Debate, McGraw-Hill Book Company, New York.

Wilson J. T. (introductions), 1976, Continents Adrift and Continents Aground. (Readings from Scientific American), W. H. Freeman and Company, San Francisco.



21 ПРИРОДНЫЕ РЕСУРСЫ ЗЕМЛИ

Природные ресурсы Земли издавна подразделяются на две категории. Первая включает фундаментальные ресурсы, которые необходимы для развития и продолжения жизни на Земле,–это биологические системы Земли, почвы, подземные и поверхностные воды, стабильная нетоксичная атмосфера и океан. Даже при самом естественном ходе событий не исключены местные аномалии, которые могут привести к катастрофическому воздействию на отдельные группы организмов. Такие изменения могут быть в основе своей геологическими (например, взрывные извержения вулканов), климатическими (наступание ледников) или биологическими (эпидемия чумы), однако на Земле в целом условия были благоприятными для жизни в течение сотен миллионов лет.

Вторая категория природных ресурсов включает те ресурсы, которые используются для развития и обеспечения культуры и цивилизации. При этом используются как материалы биологического происхождения, такие, например, как древесина, так и естественные энергетические системы на поверхности Земли, как, например, энергия рек. Однако основное место в использовании природных ресурсов для улучшения условий жизни человека принадлежит эксплуатации тех материалов Земли, которые мы называем *полезными ископаемыми*. Развитие ранних цивилизаций сопровождалось, а некоторых, как полагают, начиналось с от-

крытия, извлечения и создания специфических материалов. На всем протяжении истории человечества развитие традиционных путей сообщения, распространение идей и культуры, расположение центров политической и экономической власти определялись размещением природных ресурсов и контролем над ними.

Как фундаментальные, так и эксплуатируемые ресурсы необходимы для жизни в известных нам формах. Крупные изменения в химическом составе атмосферы и гидросферы несомненно вызвали бы существенные изменения жизни на Земле. Подобным же образом изменения в обеспечении энергией и материальными ресурсами могут оказать глубокое воздействие на нашу жизнь. В зависимости от благоразумия, с которым мы будем управлять этими изменениями, их влияние может быть незначительным или опустошительным.

Роль геологических наук в изучении природных ресурсов связана с изучением как фундаментальных ресурсов в недрах и на поверхности Земли, которым была посвящена бóльшая часть этой книги, так и полезных ископаемых, которые являются главным предметом этой главы. В круг вопросов, изучаемых геологами, входит также влияние эксплуатации природных ресурсов на окружающую среду. Здесь геологи объединяются с биологами и экологами в постановке и решении проблем, возникающих в связи с добычей полезных ископаемых, размещением электростанций, крупным строительством, удалением отходов. Мы будем обращаться к некоторым из этих проблем в нужных местах на протяжении всей главы.

Природные ресурсы обычно подразделяются на *энергетические* и *минеральные ресурсы*. Несмотря на естественность такого деления, обе категории тесно связаны между собой. Так, многие материалы, используемые человеком, применяются для транспортировки энергии. Например, медь, серебро и золото используются при передаче электрической энергии, а железо и алюминий – при транспортировке горючих полезных ископаемых. С другой стороны, большая доля потребляемой энергии расходуется непосредственно на процесс извлечения полезных ископаемых или на превращение добытых материалов в дороги, здания, мосты, которые служат столь яркими приметами нашего общества.

ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ РЕСУРСЫ

Энергетические ресурсы включают горючие и негорючие источники энергии. К горючим относятся энергетические ресурсы, которые уничтожаются при производстве энергии; они включают как ископаемые, так и неископаемые материалы. К ископаемым относятся концентрированные скопления органических остатков форм древней жизни. Сегодня они составляют основную часть источников энергии. Они включают такие наиболее важные горючие полезные ископаемые, как нефть, природный газ и уголь. Неископаемые горючие ресурсы представлены энергией ядерных реакций и материалом биологического происхождения.

Наиболее важными негорючими источниками энергии являются гидроэнергия, солнечная и геотермальная энергия. Все они черпают энергию из тех фундаментальных источников, которые являются движущей силой геологических процессов, – силы тяжести, солнечной энергии и внутреннего тепла Земли.

НЕФТЬ

Состав. Нефть – это встречающаяся в естественном виде сложная смесь жидких углеводородов. Углеводородные соединения состоят в основном из углерода и водорода с небольшой примесью азота, кислорода и серы. Бóльшая часть нефтей содержит углерода от 82 до 87% по весу и кислорода от 11 до 15%. При отделении

легких компонентов из неочищенной нефти остается светлоокрашенный парафиновый воск, темный смолистый асфальт или смесь этих двух веществ. В соответствии с этим неочищенная нефть иногда подразделяется на парафиновую, нафтеновую (в американской литературе асфальтовую.– *Перев.*) и смешанную. Чаще всего встречаются нефти нафтенового или смешанного типа.

Происхождение. И геологи, и химики согласны с тем, что нефть образуется из растительных и животных остатков, накапливающихся на морском дне вместе с осадками, из которых образуются осадочные породы. Доказательства органического происхождения представляются убедительными: соединения, из которых состоит нефть, имеют специфические оптические свойства, характерные только для органических соединений; в них содержатся определенные пигменты, называемые порфиринами (эти соединения сходны с хлорофиллом растений или гемоглобином в крови животных); более 99% всей встречающейся нефти ассоциируется с морскими осадочными породами. Лишь изредка нефть находят в изверженных и метаморфических породах или в пресноводных осадках, но и то только тогда, когда эти породы ассоциируются с осадочными породами морского происхождения. Сосредоточенная в таких породах нефть, по-видимому, проникает в них путем миграции из расположенных поблизости морских пород. Углеводороды, сходные с углеводородами нефти, находят на небольшой глубине в современных морских осадках.

Процесс превращения исходного органического материала в нефть понят еще не полностью. Способствующими факторами, как полагают, являются жизнедеятельность бактерий, возрастание давления при уплотнении пород, высокая температура и естественная дистилляция на глубине, возможный дополнительный привнос водорода из глубинных источников, присутствие катализаторов и, наконец, время.

Анаэробные бактерии могут извлекать кислород, азот, фосфор и серу из органического вещества и таким способом увеличивать относительное содержание остающихся углерода и водорода. Некоторые бактерии производят природный газ метан (CH_4), но значение метана в образовании нефти не определено достаточно ясно. Роль времени также еще с полной очевидностью не установлена. Неизвестно, происходит ли преобразование органического вещества в нефть во время образования вмещающих осадков или после их захоронения, но еще до консолидации, или же намного позже. Многие геологи отдают предпочтение раннему образованию.

Материнские породы – это породы, из которых образуется нефть (или природный газ). Во многих нефтепроизводящих районах встречаются мощные толщи темно-серых, шоколадно-коричневых, голубовато-серых или черных глин, окрашенных в темный цвет благодаря присутствию органического вещества; предполагается, что они являются материнскими породами. На других площадях источником могли быть, по-видимому, известковистые глины, алевролиты, тонкозернистые песчаники или известняки. В современных морских осадках содержится в среднем 2,5 (вес. %) органического вещества. В тонкозернистых осадках содержится больше органического вещества, чем в грубозернистых. Это дает основания для вывода, что тонкие темноокрашенные глины и известняки являются, видимо, наиболее подходящими нефтематеринскими породами.

Коллекторы. Коллекторами называют проницаемые породы, в которых скапливается нефть. Нефть обычно не может быть получена в промышленных количествах из глин, даже если она образуется в них, потому что глины недостаточно проницаемы. Хорошие коллекторы должны иметь высокую пористость и высокую проницаемость, для того чтобы обеспечивалась как аккумуляция, так и свободная отдача нефти.

В последние годы в связи с растущей потребностью в нефти в качестве ее потенциально возможных источников изучаются горючие сланцы запада США и слоистые битуминозные песчаники в Альберте. Но высокая стоимость добы-

чи и необходимость применения специального оборудования ограничивают возможность их использования в современных условиях.

Нефть обычно скапливается в песчаниках с открытой структурой или в пористых известняках и доломитах. В продуктивных горизонтах эти породы имеют пористость более 10% и мощность в десятки метров. Некоторые пачки песчаников, служащие резервуарами для нефти, представляют собой протяженные пласты, в то время как другие являются небольшими линзами, образовавшимися на древних пляжах, или узкими прослоями («шнурковыми песками»), которые изначально были береговыми песчаными барами. Прекрасными коллекторами могут быть также известняковые рифы и полости растворения внутри рифов. На некоторых площадях нефть содержится в сильно раздробленных породах почти любого состава, включая глины, базальты, кремнистые породы, кристаллические сланцы.

По-видимому, когда колонка осадочных пород уплотняется под воздействием веса слоев, накопившихся над ними позже, нефть, природный газ и вода отжимаются из пластичных материнских глин в более проницаемые породы коллекторов, где эти флюиды могут свободно мигрировать. В процессе уплотнения пористость материнских глин (ила) уменьшается от величин, достигающих 90%, до 35% и меньше, и они становятся практически непроницаемыми в связи с мельчайшими размерами пор между частицами.

Миграция нефти. При переходе нефти из материнских пород в коллектор она может перемещаться по горизонтали или в вертикальном направлении в зависимости от строения вмещающих пород. Вода, на поверхности которой она плавает, облегчает ее движение. Если коллекторские породы залегают наклонно, нефть, скапливающаяся у кровли резервуара, всплывает по наклонной поверхности вверх до тех пор, пока не очутится

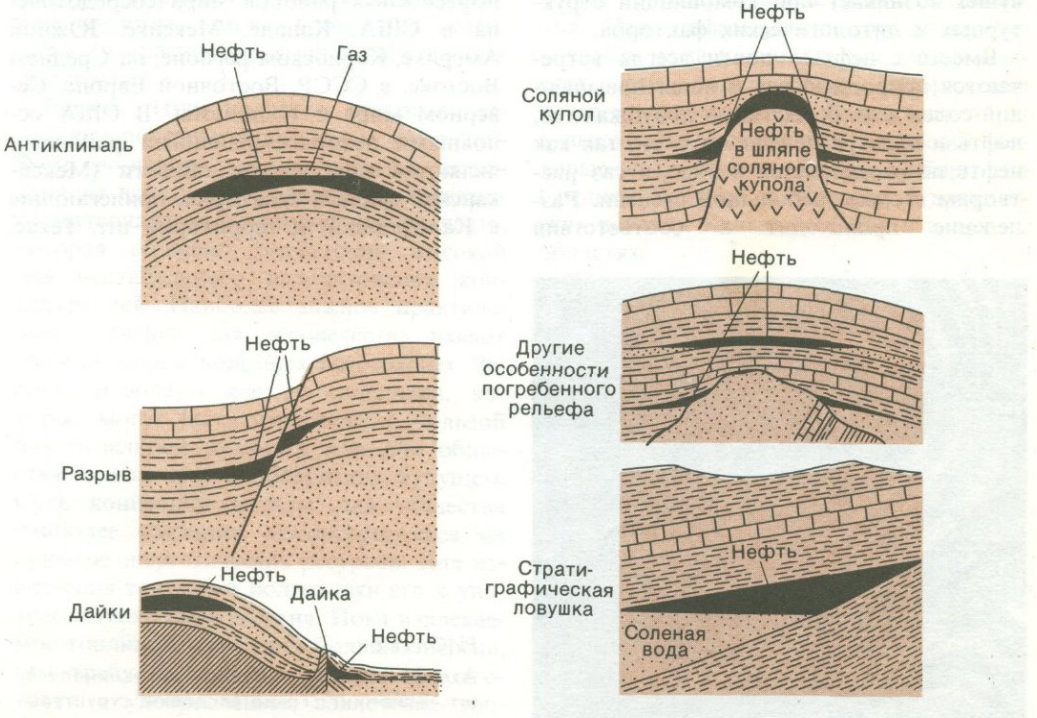


РИС. 21.1
Типы ловушек, удерживающих скопления нефти и природного газа. (По Хейланду, 1946.)

в структурной ловушке. Скопления нефти, приуроченные к краевым частям некоторых структурных впадин, образовались, вероятно, в результате перемещения нефти на несколько десятков или больше километров по горизонтали, прежде чем нефть попала в ловушку.

Ловушки. Нефтяная ловушка – это тело коллекторских пород, окруженных непроницаемыми породами таким образом, что вместе они создают естественным образом закрытый резервуар, в котором скапливается нефть (рис. 21.1). Нефть удерживается под непроницаемыми перекрывающими породами. Некоторые ловушки возникают благодаря особенностям тектонической структуры, как, например, в слоях антиклинального или куполовидного строения (рис. 21.2). Другие – стратиграфические и литологические ловушки – являются результатом разной проницаемости песчаных линз и прослоев, вариаций в степени цементации, фациальной изменчивости, присутствия известняковых рифов. Еще один тип ловушек возникает при комбинации структурных и литологических факторов.

Вместе с нефтью почти всегда встречаются природный газ и воды повышенной солености. В нефтяных ловушках газ, нефть и вода разделены на слои, так как нефть не растворяется в воде, а газ растворим в очень небольшой степени. Разделение происходит в соответствии с удельным весом: газ (как наиболее легкий) скапливается в верхней части, нефть – в середине и вода (наиболее тяжелая) – внизу. Газ может присутствовать в небольшом или значительном количестве, но в свободном виде появляется над нефтью только тогда, когда последняя насыщена газом. Соленая вода в нефтяных ловушках представляет собой, как полагают, морскую воду, заполнявшую поры в осадках во время их образования в морской обстановке.

Нефтеносные районы. Поскольку нефть в коллекторах пропитывает породу, заполняя пространство между минеральными зернами, то при бурении нефть из такого скопления может извлекаться на поверхность. Нефтеносный район – это территория с подземными скоплениями нефти, экономически выгодными для разработки. Отдельный нефтеносный район может содержать несколько различных типов скоплений (залежей) нефти, находящихся в разных стратиграфических и структурных условиях. Большая часть нефтеносных районов мира сосредоточена в США, Канаде, Мексике, Южной Америке, Карибском регионе, на Среднем Востоке, в СССР, Восточной Европе, Северном море и Индонезии. В США основными нефтедобывающими районами являются прибрежные области (Мексиканский залив и акватории, прилегающие к Калифорнии) и территории шт. Техас,



РИС. 21.2
Аэрофотоснимок нефтяной антиклинали в шт. Вайоминг. Такие сводовые структуры благоприятны для образования скоплений нефти. (Фотография Геологической службы США.)

Луизиана, Калифорния, Оклахома, Канзас, Нью-Мексико, Пенсильвания, Вайоминг, Мичиган, Арканзас и Аляска.

Использование. Существуют три сферы использования нефти: топливо, смазочные материалы и химическое сырье. На нефть приходится около половины всех горючих материалов, используемых для производства энергии. Основные очищенные продукты (расположенные в порядке валового объема их производства) – это бензин (50%), дистилляционное топливо (25%) и далее мазут, керосин, асфальт, топливо для реактивных двигателей, нефтяной кокс. Менее значительные (с точки зрения объема продукции) вещества, получаемые из нефти, – это смазочные материалы, сжиженные очищенные газы, нефть для дорожных покрытий, воск. Кроме того, в нефти заключены тысячи химических соединений, называемых нефтехимическими соединениями. Они используются для производства таких материалов, как каучук, синтетическое волокно, пластмассы, краски, растворители, красители, очищающие средства, смолы, удобрения, пестициды и разнообразные лекарственные препараты.

Запасы. При подсчете ресурсов отдельных полезных ископаемых мы различаем, во-первых, *общие ресурсы*, включающие всю сумму концентраций данного материала, и, во-вторых, ту их часть, которая обладает достаточно высокой для рентабельного использования концентрацией. Наиболее важное практическое значение для человечества имеют именно *запасы* полезных ископаемых. Запасы включают все те скопления, которые могут быть извлечены с пользой для отдельной личности или для общества, сейчас или в обозримом будущем. Суть концепции пользы для общества наиболее наглядно демонстрируется на примере энергетических ресурсов. Для извлечения топлива и подготовки его к употреблению нужна энергия. Пока извлекаемое топливо может дать больше энергии, чем требуется для его добычи и подготовки к употреблению, извлечение топлива может быть выгодным. При неблагоприятных обстоятельствах, однако, при производстве топлива энергии потребляется больше, чем получается в итоге его сжигания. В этом случае концентрация топлива (нефти, угля, урана) такова, что добыча его оказывается невыгодной. Такое топливо хотя и входит в состав общих ресурсов, но не входит в состав запасов. Таким образом, для человечества важны именно запасы, потому что ими измеряются пригодные к употреблению количества полезных ископаемых.

В недавно опубликованной сводке, составленной наиболее осведомленными специалистами, перечисляются выявленные запасы нефти: Средний Восток (Саудовская Аравия, Кувейт, Иран, Ирак, Объединенные Арабские Эмираты) – 367,7 млрд. баррелей[1)], социалистические страны – 101,1, Африка – 60,6, Северная Америка – 37,1 (США – 30,9), Латинская Америка – 29,6, Западная Европа – 24,5, район Юго-Восточной Азии и Тихого океана – 19,4 млрд. баррелей. Суммарные запасы составляют около 640 млрд. баррелей, которых хватит приблизительно на 30 лет при современном уровне потребления. Эти цифры могут оказаться неточными из-за национальных, экономических или политических соображений и могут, кроме того, измениться в результате дополнительных открытий, которые возможны в Китае, Сибири, на Среднем Востоке, в Мексике, в арктических районах Канады, в США и в других областях.

Достаточно легко оценить запасы единичного нефтяного месторождения, труднее подсчитать запасы для всей страны или континента. Более важными, однако, являются достоверные оценки общих запасов нефти, выявленных и *предполагаемых*, для отдельной страны или для мира в целом. Необходимость таких подсчетов диктуется нашей огромной зависимостью от нефти; любое планирование будущего энергетического баланса в мире должно опираться на знание тех пределов, которые существуют у каждого отдельного источника энергии.

Все эксперты согласны с тем, что коли-

[1] 1 баррель = 159 л. В СССР запасы, как и добычу нефти, измеряют в тоннах. – *Прим. перев.*

чество нефти на Земле ограниченно. Хотя точные цифры зависят от методики подсчета, даже самые оптимистические оценки нефтяных ресурсов не превышают 1100 млрд. баррелей. Следовательно, при современном уровне потребления как выявленные, так и прогнозируемые запасы нефти будут исчерпаны примерно в течение 100 лет. Такой конец нашей зависимости от нефти не наступит, однако, сразу. Вместо этого станет все труднее и труднее добывать нефть, она будет дорожать и вследствие этого неизбежно уступит свою ведущую роль каким-то другим источникам энергии. У человечества пока еще есть время для развития способных заменить нефть источников энергии (таких, как уголь, ядерные реакторы, геотермическая и солнечная энергия), прежде чем добыча нефти начнет сокращаться.

УГЛЕВОДОРОДНЫЕ ГАЗЫ

Природный углеводородный газ встречается либо вместе с нефтью, заполняя те же самые резервуары и структурные ловушки, либо отдельно (рис. 21.1). Если нефть отсутствует, газ в коллекторских породах располагается сразу же над водой. *Природный газ состоит в основном* из бесцветного, без запаха, легко воспламеняющегося метана (CH_4). В нефтяных месторождениях могут также присутствовать этан, пропан, бутан, пентан и пары бензина. Бутан и связанные с ним газы, которые могут быть сжижены под давлением и в баллонах поступать в продажу, широко используются как баллонный газ. Природный газ – это чистое, высокоценимое топливо, которое сейчас передается по трубам почти во все уголки страны. Часть газа превращают в углеродную сажу, которая используется для производства типографской краски и резиновых шин. Ведущее место по производству газа в США занимают шт. Техас, Луизиана, Оклахома, Нью-Мексико, Калифорния и Канзас.

Потенциальные русурсы природного газа изучены еще меньше, чем нефти. *Выявленные запасы размещены следующим* образом (в порядке их уменьшения): социалистические страны – 27,1 триллиона $м^3$, Средний Восток – 15,1, Северная Америка – 7,7 (США – 6,1), Африка – 5,9, Западная Европа – 4,0, район Юго-Восточной Азии и Тихого океана – 3,4, Латинская Америка – 2,5 триллиона $м^3$. При дальнейшем бурении эти цифры будут, несомненно, меняться, но опять-таки общие потенциальные запасы природного газа эксперты оценивают цифрой не более 138,8 триллиона $м^3$, что всего лишь чуть больше, чем в два раза, превосходит уже выявленные запасы (65,1 триллиона $м^3$).

ДРУГИЕ ПРИРОДНЫЕ ГАЗЫ

Среди имеющих большое значение, но негорючих газов в земной коре можно назвать азот и двуокись углерода. В некоторых смесях природных газов азота и двуокиси углерода содержится больше, чем горючих газов. В ряде нефтяных скважин в Колорадо содержание примеси двуокиси углерода настолько велико, что быстрое падение давления превращает газ в сухой лед, а сопутствующую нефть – в смерзшуюся грязь. Ведущее место по добыче двуокиси углерода, предназначенной для использования в виде сухого льда, принадлежит шт. Нью-Мексико, Колорадо, Юта и Калифорния.

Гелий – легкий газ, и вследствие того, что он не воспламеняется, он оказывается очень подходящим для «топлива» космических кораблей и для многих других технических целей. Почти весь используемый в мире гелий поступает из небольшого количества скважин в Канзасе, Техасе, Оклахоме, Нью-Мексико и Аризоне.

УГОЛЬ

Распространение. Угольные пласты широко распространены в США, Канаде, Европе, Китае и Австралии. В США уголь сосредоточен главным образом на следующих площадях: 1) месторождения антрацита в районе Скрантона, шт. Пенсильвания; 2) месторождения на территории Аллеганского плато и Аппалачей, полоса которых протягивается от Пенсильвании до Алабамы; 3) месторождения Иллинойса, полоса которых на западе доходит до шт. Индиана и западных районов шт. Кентукки; 4) месторождения Мидконтинента (центральных районов США), располагающиеся на территории нескольких штатов от Айовы до Техаса; 5) месторождения Скалистых гор – Великих равнин, протягивающиеся в южном направлении от Монтаны и Северной Дакоты до Нью-Мексико (рис. 21.3).

Классы и теплотворная способность. Угли подразделяются на несколько классов в зависимости от их теплотворной способности (калорийности) и химического состава. Наиболее важным в классификации является ряд лигнит – полубитуминозный уголь – битуминозный уголь – антрацит. Теплотворная способность лигнита колеблется в интервале всего 6000–8000 британских тепловых единиц на фунт (около 0,45 кг) веса (одна британская тепловая единица повышает температуру 1 фунта воды на 1° по Фаренгейту). На другом полюсе находятся битуминозные угли и антрациты с высокой теплотворной способностью, измеряемой величинами от 13 000 до 15 000 британских тепловых единиц на фунт. Глина или другие примеси в угле снижают его теплотворную способность, а примесь сернистых соединений приводит к сильному загрязнению воздуха при сжигании угля. Класс угля зависит от глубины, до которой погружались угольные пласты под чехлом вышележащих пород, и величины тектонической деформации, которой уголь подвергся вместе с вмещающими породами. Угли разного класса распро-

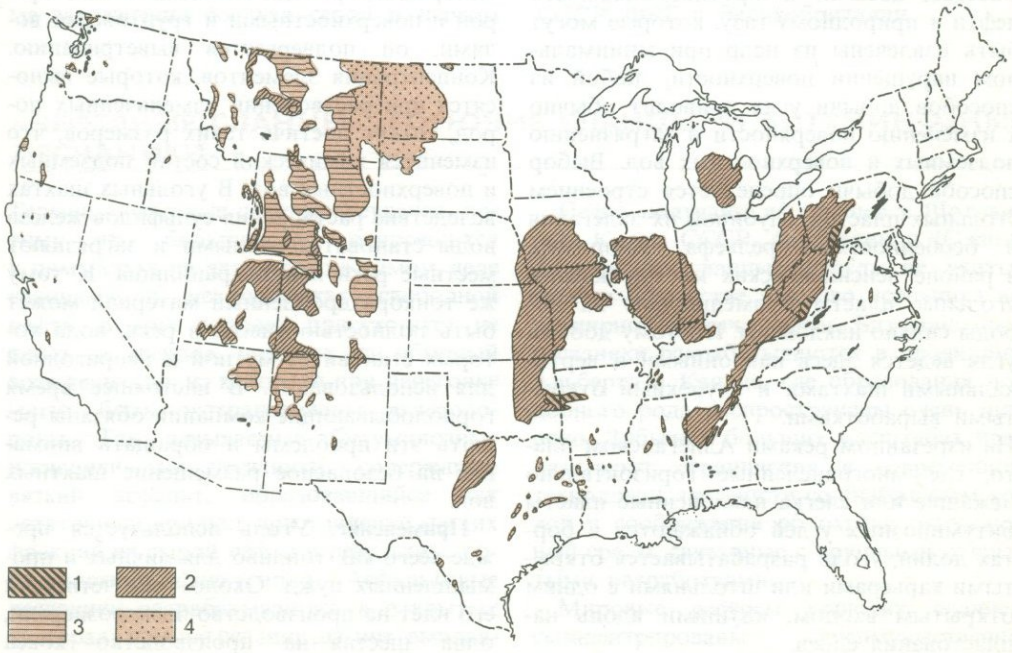


РИС. 21.3

Основные угольные бассейны США. *1* – антрацит; *2* – битуминозный уголь; *3* – полубитуминозный уголь; *4* – лигнит.

странены в США на различных площадях. Месторождения в Пенсильвании являются единственным крупным источником антрацита в Америке, хотя некоторые угли в Колорадо и Арканзасе приближаются к антрацитовой стадии. Месторождения в Пенсильвании занимают площадь меньше 1200 км^2, и большинство из них уже выработано. Угли Аллеганского района и Аппалачей, Иллинойса и центральных районов Мидконтинента являются в основном битуминозными с содержанием серы от умеренного до высокого. Угли месторождений Скалистых гор – Великих равнин изменяются от лигнитов в Дакоте до углей в основном полубитуминозного и битуминозного типа в Скалистых горах. Многие из них отличаются низким содержанием серы и привлекательны тем, что меньше загрязняют воздух. Их можно смешивать с углями восточных районов с высоким содержанием серы, интенсифицируя тем самым производство энергии и одновременно уменьшая загрязнение окружающей среды.

Способы добычи. В противоположность нефти и природному газу, которые могут быть извлечены из недр при минимальном нарушении поверхности, любой из способов добычи угля приводит обычно к изменению поверхности и загрязнению подземных и поверхностных вод. Выбор способа добычи определяется строением угольных пластов, глубиной их залегания и особенностями рельефа. Например, в районе пенсильванских месторождений угольные пласты и вмещающие их породы сильно наклонены. Поэтому добыча угля ведется здесь наклонными и вертикальными шахтами и глубокими открытыми выработками.

На изрезанном реками Аллеганском плато, где многочисленные горизонтально лежащие или слегка наклоненные пласты битуминозных углей обнажаются в бортах долин, уголь разрабатывается открытыми карьерами или штольнями с одним открытым входом, идущими вдоль напластования слоев.

В западных районах, где угли низких классов залегают близко к поверхности, открытая добыча является единственным рентабельным здесь способом.

Ясно, что при добыче открытыми способами поверхность Земли в результате удаления почвы и нарушения рельефа изменяется, но при аккуратном ведении работ и проведении восстановительных мероприятий выработанные площади легко могут быть приспособлены для использования в других целях. Даже подземная добыча угля ставит проблемы, которые могут давать знать о себе много лет спустя после прекращения разработок. Проседание поверхности над заброшенными угольными выработками создает большие трудности в ряде штатов и особенно на территории восточных районов Огайо, Пенсильвании и Западной Виргинии.

Еще большее беспокойство, чем появление площадей с заброшенными выработками, вызывает химическое воздействие, связанное с открытой и подземной добычей угля в больших масштабах. Проходка горных выработок и выбрасывание в отвалы огромных масс пустой породы сопровождаются раздроблением материала; приходя в контакт с атмосферой и поверхностными и грунтовыми водами, он подвергается выветриванию. Концентрация элементов, которые выносятся при растворении измельченных пород, может достичь таких размеров, что изменится химический состав подземных и поверхностных вод. В угольных шахтах вследствие растворения сульфидов железа воды становятся кислыми и загрязняют местные реки и водохранилища. К тому же тонкораздробленный материал может быть полностью унесен в реки, вода которых становится мутной и непригодной для использования. В настоящее время горнодобывающие компании обязаны решать эти проблемы и обращать внимание на безопасное размещение шахтных вод.

Применение. Уголь используется прежде всего как топливо для личных и промышленных нужд. Около трех четвертей его идет на производство электроэнергии, одна шестая – на производство кокса и одна десятая – в различные отрасли промышленности. Огромное количество

угля, которое в прежние годы расходовалось паровозами и пароходами, в последние десятилетия заменено нефтью.

Большая часть углей используется в их естественном состоянии, но часть из них перед использованием в качестве топлива превращают в кокс. Кокс получают путем сжигания угля в специальных печах без доступа воздуха. Летучие компоненты при этом удаляются, и остается обогащенный углеродом кокс. Кокс особенно ценится как топливо высокого качества и восстановитель при плавке железной руды в доменных печах. Побочными продуктами в процессе коксования углей являются горючие газы и смолы, из которых получают сотни химических веществ.

Большие электростанции, работающие на угле, сооружаются сейчас непосредственно на территории угольных месторождений или вблизи них. Затем электроэнергия передается по проводам в районы ее основного потребления. При таком использовании уголь в качестве источника энергии способен конкурировать с атомными электростанциями. Проблеме загрязнения воздуха серой и дымом при сжигании угля противопоставляется общий страх перед ядерными установками, их радиоактивностью и термальным загрязнением окружающей среды. Решающим фактором при выборе является их сравнительная стоимость.

Попытки производства газа и искусственной нефти из угля, хотя они технически и выполнимы, являются по экономическим соображениям сомнительными и сталкиваются, кроме того, с трудностями законодательного характера в связи с охраной окружающей среды.

Запасы. Запасы угля трудно оценить, так как они зависят от постоянно меняющейся технологии и экономических условий его добычи. На оценку влияют определение минимальной допустимой мощности угольных пластов, допустимой глубины залегания и многие другие факторы. По принятым на сегодняшний день стандартам запасы угля в США составляют по крайней мере 450 млн. т. Этого количества при современном уровне потребления хватит на 1000 лет. Мировая добыча угля сосредоточена главным образом в США (около одной трети), СССР, ФРГ и Великобритании.

«НЕФТЯНЫЕ СЛАНЦЫ» (ГОРЮЧИЕ СЛАНЦЫ) И БИТУМИНОЗНЫЕ ПЕСЧАНИКИ

Термин «нефтяные сланцы» неудачен, потому что большинство относящихся к ним пород не являются на самом деле сланцами и не содержат свободной нефти. В этих породах присутствует не нефть, а твердое, похожее на обычный воск вещество, из которого при перегонке могут быть экстрагированы углеводороды. Так называемые битуминозные песчаники – это песчаники, содержащие вязкий асфальт, образовавшийся как остаточный продукт при удалении легких фракций из сырой нефти в результате поверхностной фильтрации. Асфальтовые песчаники разрабатываются в открытых карьерах; при нагревании из них выплавляется асфальт, который затем очищается для получения из него бензина и других продуктов.

Нефть получают из сланцев в Шотландии, Китае, СССР, Австралии и Южной Африке, но сланцы никогда не учитываются в качестве важного источника во всемирной добыче нефти. Битуминозные песчаники разрабатываются в провинции Альберта в Канаде, где образования подобного рода распространены очень широко. Добыче в больших масштабах препятствуют ограничения в современной технологии, трудности со снабжением водой и соображения об охране окружающей среды, связанные с крупными открытыми разработками.

Мировые ресурсы горючих сланцев сконцентрированы преимущественно в США, Бразилии, Заире и СССР. Эти ресурсы очень велики, но современные условия добычи сильно истощают запасы.

Тем не менее на территории шт. Вайоминг, Юта и Колорадо, где развиты горючие сланцы, извлекаемые запасы оцениваются цифрой не менее чем 1,6 млрд. баррелей.

Ресурсы битуминозных песчаников на Земле недостаточно изучены, но извлекаемые запасы в Канаде (300 млрд. баррелей), США (29 млрд. баррелей) и Венесуэле (70 млрд. баррелей) показывают, что в будущем этот источник нефти может приобрести большое значение.

ЯДЕРНОЕ ТОПЛИВО

Главным видом топлива на Земле, не относящегося к категории горючих ископаемых, является уран, который в концентрированном виде встречается в пегматитах и гидротермальных породах, но чаще всего в осадочных породах любого возраста. Уран широко распространен на всех континентах. Главные площади его развития в США – Вайоминг и плато Колорадо, включая часть шт. Колорадо, Юта и Нью-Мексико. Его запасы оцениваются прежде всего в зависимости от цены одного фунта окиси урана (U_3O_8), которая определяется соотношением спроса и предложения. Запасы связывают со стоимостью, потому что требования к содержанию в породе извлекаемого из нее урана могут снижаться при росте цен. Так, при цене 10 долл. за 1 фунт U_3O_8 запасы США составляют приблизительно 315 000 т, тогда как при цене 30 долл. общие запасы оцениваются в 600 000 т.

Когда-то провозгласили, что деление ядра покончит с энергетическими проблемами на земном шаре, однако теперь стало ясно, что атомная энергетика ставит массу новых проблем экологического и политического характера. Одним эти проблемы кажутся преодолимыми, с точки же зрения других, использование урана в качестве топлива представляет совершенно недопустимый для человека риск. Главные проблемы, имеющие отношение к геологии, заключаются в безопасном размещении отвалов горных выработок и отработанных вод и поиск безопасных мест для строительства атомных электростанций и удаления радиоактивных отходов. Все эти проблемы связаны с тем, что при производстве и использовании урана происходит концентрация чрезвычайно ядовитых радиоактивных веществ. Они концентрируются во время добычи и использования урана, а «сжигание» урана дает еще более радиоактивное вещество. Поэтому удаление отходов приобретает первостепенное значение. Предприятия по переработке радиоактивных отходов и их отвалы, так же как сами атомные электростанции, необходимо размещать в геологически стабильных районах. Опускание земной поверхности, вулканическая деятельность, разрушительные землетрясения и разного рода разрушительные эрозионные и градационные процессы способствуют утечке и разносу радиоактивного материала. В сферу геологических исследований входит наблюдение за жизнью активных разрывов и другими стихийными явлениями на поверхности и под землей; избежать их можно, обеспечив стабильность обстановки на время работы электростанций. Для захоронения радиоактивных отходов предлагается использовать глубокие шахты и буровые скважины, но пока что мало кто из геологов удовлетворен таким решением.

Если судить по современным источникам урана, то повсеместно применяемым сейчас атомным реакторам остается работать меньше 100 лет до полного истощения топлива. Создание новых реакторов, воспроизводящих ядерное топливо, может сильно увеличить этот срок. В отличие от обычного реактора, работа которого основана на простом делении ^{235}U на изотопы промежуточного веса, в воспроизводящем реакторе по мере «сгорания» ^{235}U образуется новое топливо благодаря добавлению нейтронов к ^{238}U. В результате образуется новый расщепляющийся изотоп плутония, который может быть извлечен и использован.

Перспективным источником энергии будущего является управляемая *термо-*

ядерная реакция синтеза более тяжелых элементов из более легких. Эта реакция, имитирующая реакции, происходящие на Солнце, может оказаться главным источником электричества в следующем столетии. Пока же условия для стабильной управляемой реакции синтеза еще не осуществлены вследствие необходимой для нее очень высокой температуры (приблизительно 1 000 000°С). Тем не менее определенный прогресс в этом направлении имеется, и в случае успеха в качестве одного из видов топлива для производства энергии может быть использован дейтерий (^{2}H), получаемый из морской воды. Нас не должна, однако, успокаивать перспектива данного способа получения энергии, и следует продолжать поиски более доступных в ближайшее время способов.

НЕГОРЮЧИЕ ИСТОЧНИКИ ЭНЕРГИИ

Основными негорючими энергетическими ресурсами являются *солнечная, геотермальная* и *гидроэнергия*. Хотя сейчас они составляют небольшую часть в общем энергетическом бюджете, ожидается, что их значение будет расти. Их развитие включает улавливание и использование энергии Солнца, гравитационного поля, внутреннего тепла Земли; все эти источники привлекательны тем, что они, по-видимому, неограниченны. О солнечной энергии мы говорили в гл. 2.

Гидроэнергия. Использование энергии текущей воды – способ чрезвычайно древний. Крупномасштабные проекты связаны со строительством плотин для задержания воды и регулирования ее поступления на агрегаты, производящие электроэнергию. Эти плотины позволяют также регулировать расход воды, служат ирригационным и во многих случаях восстановительным целям.

Сооружение крупных плотин неизбежно нарушает режим рек, влияя на транспортировку осадков и эрозию, а также на растительный и животный мир реки. Плотины служат, кроме того, источником опасности в случае возведения их в неблагоприятных геологических условиях. Геологи принимают участие в выборе мест крупного гидротехнического строительства, наблюдая за представляющими опасность природными объектами, такими, как оползни и активные разрывы.

В то время как в США большинство возможных мест строительства плотин уже использовано, на реках развивающихся стран их остается еще достаточно много. Строительство здесь ирригационных плотин и плотин, предназначенных для регулировки стока и производства энергии, может существенно улучшить местные условия.

Геотермальная энергия. Вулканические извержения всегда поражали количеством заключенного в недрах Земли тепла. В конце концов ученые измерили тепловой поток, идущий через поверхность Земли. Он так мал ($1{,}5 \cdot 10^{-6}$ кал/(см^2 · с), что мы не замечаем его, но при суммировании по всей поверхности земного шара его значение оказывается очень велико. Использование геотермальной энергии упирается в поиск таких мест, термические условия которых находились бы в промежутке между двумя крайностями – незаметным общим тепловым потоком, с одной стороны, и вулканическими извержениями – с другой. Такие условия реализуются в районах современного или позднетретичного вулканизма или интрузивного магматизма. Магма или разогретые породы, находящиеся недалеко от поверхности, нагревают подземные воды и вызывают их циркуляцию (рис. 21.4). Горячую воду или пар можно захватывать у поверхности для преобразования в электрическую энергию.

Впервые использованные в Италии, геотермальные источники энергии приобрели в наши дни большое значение в Исландии, Новой Зеландии и США. Большой объем изысканий проводится по всему земному шару для отыскания подходящих мест для геотермальных электростанций. Хотя и не предполагается, что они станут основными поставщиками энергии, все же их вклад в мировой



РИС. 21.4
Идеализированная схема геотермального резервуара. Горячие породы или магма нагревают воду, которая поднимается в резервуар. На ее место поступает более холодная вода, в свою очередь нагревающаяся. Горячая вода или пар скапливаются под непроницаемым слоем, прорываясь сквозь него только в виде отдельных источников, по которым можно судить о местоположении резервуара. По скважинам, проникающим в резервуар, пар может свободно выходить на поверхность или подаваться на турбины электростанций.

энергетический бюджет все увеличивается, а в некоторых районах они наверняка будут со временем доминирующим источником энергии.

МЕТАЛЛИЧЕСКИЕ ПОЛЕЗНЫЕ ИСКОПАЕМЫЕ

Рудой называют концентрацию одного или нескольких минералов с настолько богатым содержанием металлов, что их разработка оказывается выгодной. *Рудным минералом* называется минерал, заключающий какой-либо ценный металл. Некоторые металлы, такие, как золото или платина, встречаются в элементарной форме, но большинство обычных металлических элементов находятся в минералах в соединении с другими элементами, как это наблюдается, например, в сульфидах, окислах или карбонатах.

В большинстве руд рудные минералы сочетаются с большим количеством пустой и вмещающей породы. *Пустая порода* – это не представляющие ценности и обычно не содержащие металла минералы, образовавшиеся вместе с рудой. Вмещающая порода – это порода, окружающая руду. Во многих случаях руда не имеет резких границ. Вместо этого она постепенно переходит во вмещающую породу, большое количество которой извлекается вместе с рудой при разработке месторождений и затем удаляется металлургическим путем.

Многие руды заключают два или больше металлов. Так, в медной руде месторождения Бьютт, шт. Монтана, содержится значительное количество серебра и золота, как, впрочем, во всех медных рудах американского запада. Свинец и цинк или свинец и серебро также являются обычными компонентами этих руд. Содержание дополнительных металлов, в особенности если речь идет о золоте и серебре, делает выгодной добычу руды, которая в остальном является некондиционной.

Генетические типы руд. В зависимости от происхождения представляющие ценность рудные минералы разделяются на восемь групп (табл. 21.1).

Магматические руды формируются путем накопления продуктов дифференциации, выделяющихся из магмы в результате ранней кристаллизации и оседания тяжелых рудных минералов. Большая часть руд этого типа встречается в нижних частях силлов или в дайках.

Пегматиты также относятся к продуктам магматической дифференциации, но с той разницей, что они представляют собой легкие, а не тяжелые компоненты магмы. Как правило, они состоят из крупных кристаллов. В некоторых пегматитах имеются кристаллы турмалина (минерал бора) и апатита с фтором и реже хлором. Полагают, что присутствие бора, фтора и хлора способствует росту кристаллов необычно большого размера. Водяной пар и другие газы поддерживают магматический расплав в жидком

Таблица 21.1

Генетические типы руд и минералов

Генетический тип	Характерные виды полезных ископаемых
Магматические руды (продукты магматической дифференциации)	Магнетит (район Кируна, север Швеции) Хромит (восточные районы Кубы) Ильменит (руды Ti) (озеро Аллард-Лейк, провинция Квебек) Платина (Урал, СССР)
Пегматиты	Неметаллические: слюда, минералы лития, полевой шпат Металлы: бериллий
Контактово-метаморфические руды	Вольфрам, олово, золото, медь, железо, цинк, серебро, свинец
Высокотемпературные руды больших глубин	Золото (месторождение Хомстейк, Лид, южные районы шт. Дакота; Кирклэнд-Лейк и район Холлингер, провинция Онтарио) Олово (Корнуолл, Великобритания)
Руды умеренных температур и умеренных глубин	*Медь (Бингем-Каньон, шт. Юта; Бьютт, шт. Монтана)* Свинец – цинк – серебро (Кер-д'Ален, шт. Айдахо)
Низкотемпературные руды небольших глубин	Золото (Крипл-Крик, шт. Колорадо) Серебро – золото (Комсток-Лоуд, шт. Невада) Серебро (Пачука, Мексика,– сказочно богатые месторождения) Сурьма (Хунань, Китай,– крупнейший производитель сурьмы в мире) Ртуть (Альмаден, Испания)
Низкотемпературные руды, образующиеся вблизи поверхности	Свинец – цинк (район Три-Стейт, шт. Оклахома, Миссури, Канзас) Цинк (шт. Теннесси)
Полезные ископаемые осадочного происхождения	Уран – ванадий (шт. Юта, Колорадо, Нью-Мексико, Аризона) Остаточные продукты выветривания: бокситы, железо, марганец, золото, платина, самородная медь, никель *(Куба, Новая Каледония)*, *барит*, *ртуть (киноварь)*, глины Россыпи: золото (предгорья Сьерра-Невады, шт. Калифорния; Ном и Фэрбенкс, Аляска; Витватерсранд, Южная Африка) Химические осадки: металлы (руды железа и марганца); неметаллические полезные ископаемые (фосфаты, каменная соль, гипс, калиевые соли)

состоянии, облегчая тем самым образование крупных кристаллов. Пегматиты обычно приурочены к кровле батолитов или располагаются близ нее.

Руды зон контактового метаморфизма возникают в результате замещения материала окружающих пород при внедрении интрузии; замещение осуществляется при помощи растворов, выделяющихся из магматической интрузии. Хотя руды этого типа встречаются в приконтактовых зонах как в магматических, так и в осадочных породах, все же преимущественно они развиты в осадочных породах и в особенности в известняках и известковистых глинах (рис. 21.5). Руда обычно сосредоточена около интрузивного тела, редко на удалении от него больше чем на 0,5 км. Минералы сульфидов, такие, как пирит и халькопирит, окислы, такие, как гематит и магнетит, и нерудные минералы пустой породы формируются одновременно и взаимно прорастают друг друга.

Некоторые залежи контактово-метаморфических руд располагаются параллельно слоистости осадочных пород, тогда как другие рудные залежи пересекают

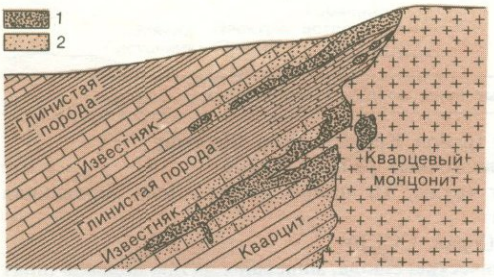


РИС. 21.5
Разрез рудной залежи контактово-метаморфического происхождения. Под влиянием интрузии кварцевых монцонитов произошло изменение вмещающих пород (главным образом известняков) и внедрение в них рудообразующих растворов. *1* – руда; *2* – измененная порода.

слои. Рудообразующие растворы поступают из интрудирующей магматической массы и поэтому имеют высокую температуру и находятся под сильным давлением. Эти особенности позволяют им проникать в мельчайшие трещины и даже по плоскостям спайности минералов.

Металлоносные руды, сформировавшиеся в условиях высокой температуры (300–500°С) на большой глубине, залегают вокруг гранитных штоков и батолитов. Некоторые руды встречаются в виде пластичного заполнения тонких трещин, другие избирательно замещают подходящие для этого вмещающие породы (рис. 21.5). Другая группа руд образуется при умеренной температуре (200–300°С) и на умеренной глубине (1–2 км). Ассоциирующиеся с ними вмещающие породы обычно подвергаются полной гидротермальной переработке.

Руды, выделяющиеся из низкотемпературных магматических растворов (100–200°С) на глубине, вероятно, 1 км и меньше, как правило, распространены в районах молодого (в геологическом смысле) вулканизма. Примыкающие к этим рудам породы обычно сильно изменены. Руды залегают в форме жил (выполнения по трещинам) в брекчиях, сложных систем жил или же замещают породу.

Некоторые руды металлов образуются из гидротермальных растворов на небольшой глубине и при низкой температуре, но при этом на значительном удалении от предполагаемого, хотя и не обнаруженного магматического источника. Частично они могут выделяться и из холодных метеорных вод. Полого лежащие слои осадочных пород изменяются обычно незначительно, однако встречающаяся местами ассоциация минералов, в которую входит флюорит и барит со сфалеритом и галенитом, заставляет предполагать дополнительное поступление в рудообразующие флюиды материала магматического происхождения. Относящиеся к этой группе свинцово-цинковые руды района Три-Стейт (Оклахома, Миссури и Канзас) образовались в результате заполнения трещин и замещения известняков.

Урановые и ванадиевые минералы плато Колорадо встречаются в рассеянном состоянии или в форме небольших линз в песчаниках и конгломератах, в виде тонких инкрустаций по трещинам и плоскостям напластования, тонких пластин протяженностью в несколько сот метров, удлиненных прожилков в погребенных руслах рек. В русловых осадках урановые и ванадиевые минералы замещают древесину и материал окаменевших костей.

Концентрация минералов в осадочных рудах связана с 1) накоплением остаточных продуктов выветривания, 2) образованием россыпей, 3) химическим осаждением. Одна из главных руд, образующихся при выветривании,–это бокситы, основное алюминиевое сырье. Часть бокситов является продуктом химического выветривания сиенитов, но другие, по-видимому, образуются в результате медленного выщелачивания и изменения глинистых минералов в загрязненных известняках. Кислотность вод, с помощью которых происходит выщелачивание известняков, должна быть как раз такой, какая требуется для преобразования глинистых минералов в бокситы.

Более 90% добычи бокситов в США приходится на центральные районы шт. Арканзас, где руды образовались



РИС. 21.6
Алмазоносная перидотитовая трубка и связанное с ней россыпное месторождение алмазов. При выветривании перидотиты превращаются в желтую глину у поверхности и «синюю землю» на более низких горизонтах. Алмазы с выветрелой поверхности вымываются, сносятся водой вниз по склону и отлагаются вместе с песком и галькой в русле реки ниже трубки.

в результате изменения нефелиновых сиенитов – крупнозернистой магматической породы, сложенной в значительной мере полевыми шпатами и лишенной кварца. Интенсивное выщелачивание в условиях тропического климата привело к преобразованию нефелина ($NaAlSiO_4$) и полевых шпатов в глинистые минералы. В ходе дальнейшего выщелачивания и удаления кремнезема глины превратились в бокситы. Большая часть бокситов, используемых в США, импортируется.

Бокситоносные латеритовые почвы широко распространены в тропических странах, но крупные залежи с большим содержанием бокситов встречаются редко. Остров Ямайка в Карибском море является ведущим поставщиком бокситов. Крупные месторождения находятся также в Гвиане и Суринаме в Южной Америке, в СССР, Европе, на Ближнем Востоке и в Австралии.

Все рудные минералы с высоким удельным весом и плохо растворимые способны легко накапливаться в россыпях механического происхождения. На рис. 21.6 показано формирование алмазоносной россыпи при размыве алмазсодержащих пород перидотитовой интрузии. Там, где на поверхности обнажаются золотоносные жилы, минералы могут вымываться и выноситься водой. Частицы золота сносятся вниз по склону и попадают в ложе реки, где в конце концов и оседают. Метод добычи золота в этих условиях называют разработкой россыпей, а золотоносный песок и гальку – россыпями.

Главными рудами металлов, образующимися путем химического выпадения из растворов, являются руды железа и марганца, но осадочное происхождение имеют, кроме того, такие экономически важные неметаллические полезные ископаемые, как известняки, фосфоритоносные породы, каменная соль, гипс, калиевые соли.

Большую часть своего железа США получают из гематитовых осадочных руд района Великих озер (рис. 21.7). Часть добывается из магнетитовых руд контактово-метаморфического происхождения (в основном в шт. Нью-Йорк, Пенсильвания, Юта и Калифорния) и часть импортируется. Около 80% общей добычи железа в США дают шт. Миннесота и Висконсин.

Огромные скопления железных руд в районе озера Верхнего первоначально представляли собой химические осадки. В первичных железистых осадках содержались кремень, гематит, магнетит, сидерит и водные силикаты железа. В неизмененных породах железорудной толщи (называемых таконитами) содержится лишь 25–35% железа. Но при выщелачивании таконита под воздействием выветривания и подземных вод бóльшая часть первичного кремнезема (кремня) выносится и порода обогащается остающимися в ней железистыми минералами. Содержание железа увеличивается таким образом до 50% и больше, что соответствует прежним коммерческим требованиям к сырой руде. В настоящее время разработаны методы обогащения и брикетирования железистых минералов из таконита. Благодаря этому расходы по перевозке сократились, став меньше расходов по перевозке сырой руды. Брикеты с содержанием железа более 60% представляют собой прекрасный материал для доменной плавки; благодаря их небольшому размеру производительность существую-

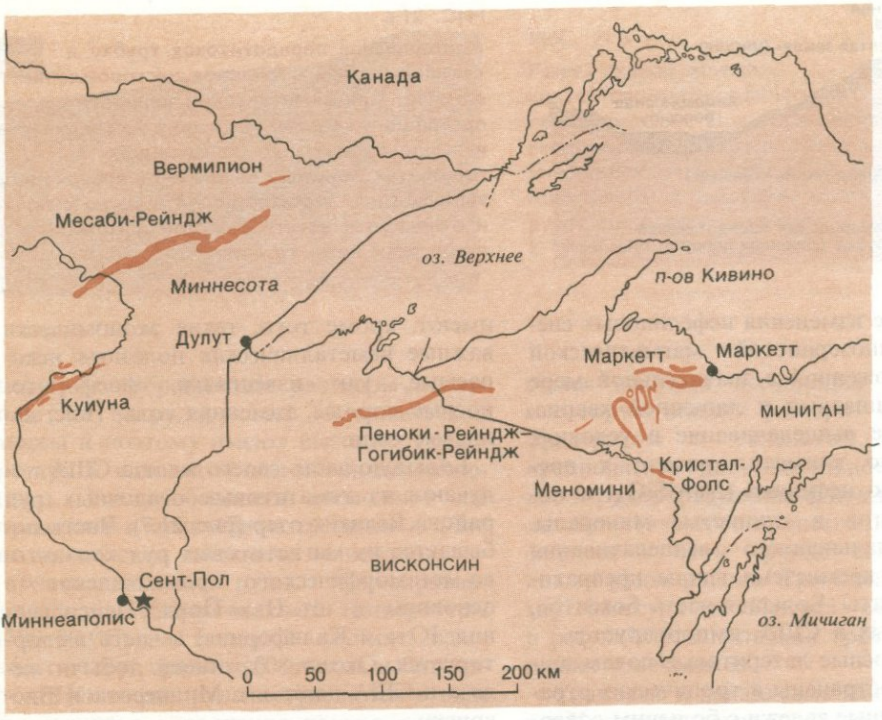


РИС. 21.7

«Железные гряды» в районе озера Верхнего. (По материалам Лейта, Ланда и Лейта, 1935.)

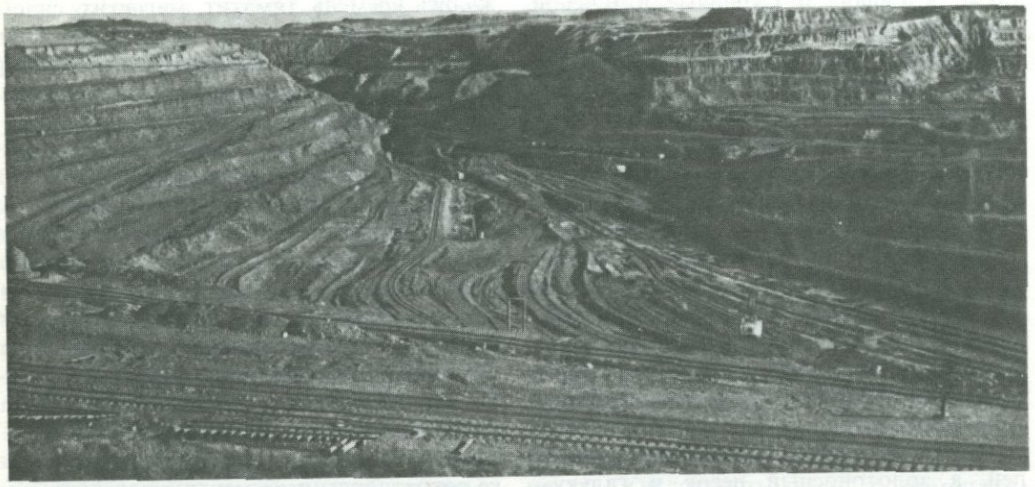


РИС. 21.8

Открытый железорудный карьер Монро в районе Месаби-Рейндж, шт. Миннесота. При выходе на поверхность пологозалегающих слоев железорудной толщи из железисто-кремнистой породы (таконита) в результате выветривания был удален кремнезем. Концентрация *остаточного железа привела к формированию промышленно* важной руды. (Фотография железорудной компании «Оливер айрон майнинг».)

щих доменных печей увеличивается и соответственно уменьшается стоимость выплавляемого чугуна.

В округе Месаби, шт. Миннесота, где добывается примерно две трети всего железа, железные руды разрабатываются открытым способом в огромных карьерах, заложенных в породах, залегающих с небольшим наклоном (рис. 21.8). В горнорудных районах шт. Мичиган и Висконсин, где слои пород наклонены круче, добыча ведется с помощью подземных горных выработок. Железорудный район, интенсивно развивающийся в настоящее время, расположен на востоке Канады вблизи границы Квебека и Лабрадора. Руды здесь также гематитовые, обогащенные вследствие естественного выщелачивания.

Пласты гематита морского происхождения с оолитовой структурой разрабатываются сейчас или разрабатывались в прежние годы на Ньюфаундленде, в Алабаме, во Франции и Англии. Вблизи Бирмингема, шт. Алабама, мощность рудного пласта, называемого Биг-Сим («Большой пласт»), достигает 5–7 м. Первичная порода содержала около 30–35% железа и большой процент карбоната кальция (используемого в качестве флюса при плавке). Гематит частично образовался в результате замещения оолитовых известняков и известковых глин, частично в результате осаждения из коллоидного раствора. Затем руда обогатилась при выщелачивании. Сталелитейные заводы Бирмингема работают теперь на руде, которая доставляется из других мест, так как оолитовые железные руды больше не выдерживают конкуренции с обработанной рудой.

ВТОРИЧНОЕ (ГИПЕРГЕННОЕ) ОБОГАЩЕНИЕ СУЛЬФИДНЫХ РУД

Процесс вторичного (гипергенного) обогащения приводит к естественному повышению качества сульфидных руд. Этот процесс включает растворение, которое происходит в зоне окисления вблизи поверхности земли, и последующее переотложение – уже с более высокой концентрацией – в зоне восстановления непосредственно под зеркалом грунтовых вод.

Почти во всех жилах с рудами меди, серебра, свинца, цинка и других металлов имеются сульфиды этих элементов. При выходе на поверхность они подвергаются воздействию воздуха и воды и в ходе выветривания испытывают ряд преобразований. Примером может служить окисление пирита с образованием серной кислоты и сульфата железа:

$$2FeS_2 + 2H_2O + 7O_2 \rightarrow 2H_2SO_4 + 2FeSO_4$$

пирит вода кислород серная кислота сульфат железа

Образующаяся таким образом серная кислота растворяет медь, цинк и другие металлы, которые выносятся затем вниз. Сульфат железа окисляется дальше и выделяется в форме лимонита. Лимонит нерастворим и поэтому остается на поверхности, образуя выходы ржавого цвета, называемые железными шляпами.

Медь в сульфидных рудах растворима в присутствии воздуха и серной кислоты. Она выносится вниз в ионном виде (ионы меди и сульфатные ионы), благодаря чему в выходящих на поверхность частях медно-сульфидных жил содержание меди очень низкое. Когда вода с серной кислотой и растворимыми в ней сульфатами меди достигает зеркала грунтовых вод, она попадает в бескислородную восстановительную обстановку. Раствор вступает в реакцию с пиритом или другими первичными сульфидами, и из него осаждаются, замещая другие минералы, сульфиды меди (медный блеск). Из вторичных сульфидов меди непосредственно ниже зеркала грунтовых вод образуются богатые руды. Вертикальный разрез такого месторождения показан на рис. 21.9.

Сульфидные руды других металлов также подвергаются изменению около поверхности, но каждый металл ведет себя по-своему в зависимости от его химических свойств. Руды серебра часто подвергаются естественному обогащению, в рудах свинца нередко образуется нерастворимый сульфат свинца, цинк может удаляться в растворенном виде.



РИС. 21.9
Схема вторичного обогащения сульфидной жилы с первоначально небольшим содержанием сульфидов. При выветривании в зоне с кислой средой ценные металлы, такие, как медь, у поверхности растворяются и переоткладываются уже в виде более богатой вторичной руды в зоне со щелочной средой сразу же ниже зеркала грунтовых вод.

ТЕКТОНИКА ПЛИТ И ПОЛЕЗНЫЕ ИСКОПАЕМЫЕ

Генетическая классификация руд напоминает нам, что руды представляют собой не что иное, как необычно высокие концентрации определенных элементов, возникающие в ходе обычных процессов геологического цикла. Теория тектоники плит дала геологам тот необходимый каркас, в который оказалось возможным уложить представления о формировании и пространственном размещении многих минеральных образований.

В 1948 г. была обнаружена очень теплая вода у дна Красного моря. Следствием этого явился ряд научно-исследовательских рейсов в конце 60-х годов. Необычайно высокая, до 58°С температура придонной воды сочеталась с аномально высокой концентрацией железа, цинка и меди. Местами их концентрация достигала промышленных значений, и вследствие непрерывного распространения осадков эти руды сулили заманчивые перспективы в будущем.

Большое научное значение имели работы по изучению размещения осадков в молодой системе рифта Красного моря. Именно здесь родилась мысль о том, что в начальные фазы спрединга океанического дна происходит химическая дифференциация вещества мантии, из которой могут поступать некоторые металлы, так же как и магматические породы, идущие на образование новых порций океанического дна. Эта идея о возможности выделения руд в осевых зонах спрединга позже была подкреплена открытием высокой концентрации металлических элементов на срединно-океанических хребтах и в основании осадочного слоя океанической коры, вскрытого скважинами глубоководного бурения. Медь, свинец, цинк, железо, никель, хром, платина – главные элементы, концентрацию которых можно объяснить этим механизмом. Руды могут иметь признаки магматического, гидротермального и осадочного происхождения.

Пока эти руды остаются на морском дне или в толще океанической коры, их трудно использовать. Однако они могут попасть в континентальную кору в зонах субдукции, где вещество океанической коры и ее осадочного чехла при столкновении плит припаивается к континентальным массивам.

Вторая крупная проблема, решенная в рамках модели тектоники плит, – это объяснение природы поясов минерализации и магматических провинций. Геологами давно уже было установлено существование упорядоченного, закономерного расположения на больших пространствах некоторых характерных рудных элементов. Этот вид крупномасштабной региональной зональности оруденения связывался с геосинклинальным прогревом. В свете представлений тектоники плит мы теперь можем сказать, что литосферные плиты, погружающиеся в зонах субдукции, постепенно разогреваются. По мере увеличения разогрева ионы разных металлов должны приобретать подвижность при разной температуре (рис. 21.10). Эти элементы будут переноситься вверх магматическими или гидро-

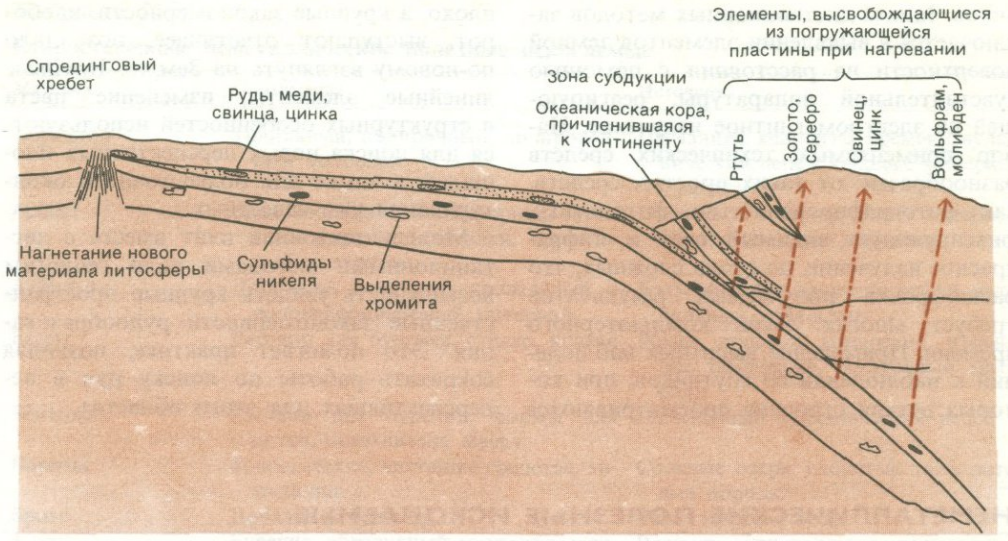


РИС. 21.10

Соотношение между моделью тектоники плит и образованием руд в зоне рождения новой коры и в зоне субдукции. Магматические руды могут формироваться в спрединговых хребтах благодаря магматической дифференциации или взаимодействию гидротермальных и вулканических флюидов с морской водой. Все эти образования вместе с литосферной плитой передвигаются к зоне субдукции, где они могут быть причленены к массе континента. Другая группа руд может формироваться на континенте за счет последовательного высвобождения ионов металлов из погружающейся пластины по мере ее разогревания. В типичном случае первой высвобождается ртуть, затем золото и серебро; за ними следуют медь, свинец и цинк и в конце высокотемпературные металлы, такие, как вольфрам и молибден.

термальными процессами и проникать в лежащую выше континентальную кору. Так как литосферная плита погружается под некоторым углом, мобилизованные элементы поднимаются и размещаются в виде полос или поясов, более или менее параллельных зоне субдукции. Пояса минерализации могут, следовательно, вместе с магматическими и метаморфическими породами служить критерием для выявления древних зон субдукции.

Характерные металлогенические провинции, в которых концентрация одного элемента резко повышена по сравнению со всеми остальными (например, медь в Центральной Африке или Аризоне или олово в Малайзии), своим возникновением могут быть обязаны океанической коре, погрузившейся в результате субдукции под эти районы.

Согласно этой точке зрения, концентрация рудных металлов чрезвычайно тесно связана с циклами разогревания и дифференциации независимо от того, происходит ли это на дивергентных границах плит, где элементы поступают из мантии, или на конвергентных границах, где перераспределяются те элементы, которые выделились из верхних горизонтов литосферных плит.

РУДЫ И ДИСТАНЦИОННЫЕ МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Одновременно с пересмотром вопросов о закономерности рудообразования в рамках модели тектоники плит, геологи начали использовать преимущества новых дистанционных методов исследования с применением искусственных спут-

ников. Задача дистанционных методов заключается в выявлении элементов земной поверхности на расстоянии с помощью чувствительной аппаратуры, реагирующей на электромагнитное излучение. Набор применяемых технических средств разнообразен: от таких простых средств, как фотографирование на фотопленку, фиксирующую видимый свет и инфракрасное излучение, до столь сложных, что расшифровка получаемых результатов требует многих часов компьютерного времени. Применение высотных наблюдений и наблюдений со спутников, при которых детали строения просматриваются плохо, а крупные закономерности, наоборот, выступают отчетливее, позволило по-новому взглянуть на Землю. Крупные линейные элементы, изменение цвета и структурных особенностей используются для поиска новых перспективных площадей, а также для более точного оконтуривания уже известных.

Модель тектоники плит вместе с дистанционными методами дали геологам возможность увидеть крупные пространственные закономерности рудообразования. Это помогает практике, позволяя сократить работы по поиску руд в неперспективных для этого областях.

НЕМЕТАЛЛИЧЕСКИЕ ПОЛЕЗНЫЕ ИСКОПАЕМЫЕ

Неметаллические полезные ископаемые (не считая горючих полезных ископаемых) включают огромное разнообразие пород и минералов. Сведения о главных из них приведены в табл. 21.2. Но кроме этих, наиболее важных полезных ископаемых имеется много других экономически ценных неметаллических материалов. Они перечислены в табл. 21.3.

Таблица 21.2

Главные неметаллические полезные ископаемые
(кроме горючих полезных ископаемых)

Материал	Происхождение	Применение
Известняк	Осадочное	Строительный камень, цемент, щебень, металлургический флюс
Дробленый камень	Различное	Наполнитель бетона, щебеночное покрытие дорог, разнообразные насыпи
Штучный камень	Различное	Строительный камень
Песок, галька	Осадочное	Наполнитель бетона (крупные сооружения, мостовые, строительные блоки), стекло, стекловолокно, стеклянное литье
Фосфатные породы	Осадочное	Удобрения, химикалии, чистящие средства
Соль	Эвапорит	Источник получения хлора и кальцинированной соды
Глины	Из остаточного или перенесенного материала	Кирпич, черепица, гончарное производство, керамика, огнеупорный кирпич, наполнители, обесцвечивающие вещества
Сера	Вулканическое, окисление H_2O и восстановление сульфатов	Производство бумаги, химикалии, удобрения, отбеливатели
Калиевые соли	Эвапорит	Удобрения, химикалии, боеприпасы
Гипс	Эвапорит	Штукатурка, замедлитель в портландцементе, строительный материал

Таблица 21.3

Второстепенные неметаллические полезные ископаемые

Материал	Применение	Источник
Абразивы	Точильный, обдирочный, полировочный материал	Песчаники, кварциты, кремень, вулканический пепел, твердые минералы (гранат)
Асбест	Теплоизоляционный материал, бумага, тормозные накладки, кровельный материал	Прожилки в серпентините и серпентинизированном доломите
Асфальт	Дорожное покрытие, кровельный и водонепроницаемый материал	Битуминозные вещества нефти, натуральный асфальтит
Барит	Раствор для бурения, стекло, краски	Жилы, прослои, конкреции, вторичное замещение, остаточный материал
Бентонит	Раствор для бурения, формы для литья, осветлитель масел	Измененный вулканический пепел
Бораты	Флюс, стекло, чистящие средства, химикалии	Соленые озера, слоистые эвапоритовые породы
Бром	Добавка к бензину	Рапа, морская вода
Алмаз	Бурение, абразивный материал, ювелирные изделия	Россыпи, кристаллы в перидотитовых трубках
Диатомит	Фильтры, изоляционный материал, абсорбенты, абразивный материал	Морские и озерные слоистые породы
Полевой шпат	Стекло, фарфор, эмаль, черепица, глазурь, абразивный материал	Пегматиты
Флюорит	Кислота, флюс, стекло, эмаль, химикалии	Жилы, вторичное замещение
Гранат	Абразивный материал, ювелирные изделия, часы	Метаморфические породы, пегматиты, россыпи
Графит	Облицовочный материал при литье, плавильные тигли, смазочный материал	Измененные органические осадки, жилы, линзы в метаморфических породах
Магнезит	Огнеупорный кирпич	Гидротермальное изменение серпентинита
Слюда	Радиолампы, электроизоляторы	Пегматиты, промытые глины
Оливин	Огнеупорный материал, ювелирные изделия	Перидотиты
Перлит	Изоляционная замазка, легкий заполнитель	Потоки обсидиана (вулканического стекла)
Пемза	Легкий бетон, изоляционный и абразивный материал	Вулканические выбросы
Кварц	Радиопромышленность, кварцевое стекло	Жеоды в пегматитах и жилах, россыпи
Натрий	Стекло, чистящие средства, химикалии	Эвапориты, рапа
Тальк	Наполнитель в красках, резина, керамика, кровельный материал	Измененный мыльный камень или доломит
Вермикулит	Звукоизолятор в штукатурке и рыхлой засыпке, пластмассы	Гидротермальное изменение пироксенита

МИНЕРАЛЬНОЕ СЫРЬЕ В БУДУЩЕМ

Запасы полезных ископаемых в доступных частях земной коры ограниченны и, за исключением воды, невозобновляемы. Некоторые материалы, такие, как железный лом или свинец аккумуляторных батарей, могут быть использо-

ваны повторно, но многие ценные металлы пропадают безвозвратно – распыляются, теряются или уходят в отходы. Например, бóльшая часть использованного железа в конце концов выбрасывается и попадает в землю, а свинец, добавляемый в этилированный бензин, безвозвратно рассеивается, загрязняя при этом воздух и почву. Так же рассеиваются свинец, цинк и титан, используемые в красках.

Промышленные концентрации руд металлов распределены на земном шаре очень неравномерно (табл. 21.4). Ни одна страна, даже такая крупная, как США, не обеспечивает себя полностью собственными полезными ископаемыми, и каждая страна с развитой промышленностью во все возрастающей степени зависит от иностранных источников минерального сырья.

Таблица 21.4

Полезные ископаемые разных континентов

Континент	Полезные ископаемые
Африка	Золото, платина, кобальт, алмазы, фосфаты, нефть
Азия	Олово, вольфам, сурьма, кобальт, хром, марганец, уголь, нефть, сера
Австралия	Золото, свинец, цинк, железо, марганец, уголь
Европа	Свинец, цинк, ртуть, марганец, бокситы, калий, сера, уголь, природный газ, нефть
Северная Америка	Железо, никель, молибден, золото, серебро, свинец, цинк, вольфрам, фосфаты, сера, калий, уголь, природный газ, нефть
Южная Америка	Олово, медь, железо, марганец, бокситы, нефть

В США за счет собственных ресурсов достаточно полно удовлетворяется часть потребностей (молибден, магний, сера, уголь, калий, фосфориты), но часть других материалов, как, например, олово, почти полностью отсутствует. Во все возрастающей степени США импортируют многие виды минерального сырья; к ним относятся нефть, природный газ, железная руда, медь, марганцевая руда, бокситы, никель, хром, вольфрам, ртуть, свинец, цинк, сурьма, платина, графит, асбест, слюда, флюорит, технические алмазы – перечень весьма впечатляющий.

При ежегодном росте добычи на несколько процентов выявленные запасы полезных ископаемых быстро истощаются. Рост населения и промышленности приводит к тому, что требования к мировым запасам минерального сырья растут по экспоненте, далеко превосходя тот прирост запасов, который обеспечивается новыми открытиями. За исключением железа, алюминия и магния (извлекаемого главным образом из морской воды) запасы руд с промышленным содержанием металлов приблизятся к истощению в течение немногих десятилетий. Для того чтобы противостоять этому кризису, потребуются новые открытия, использование низкосортных руд, более интенсивное использование вторичного сырья, улучшение технологии добычи и металлургической переработки, более полная свобода международной торговли, более широкое применение заменителей.

ПРОБЛЕМЫ ЗАГРЯЗНЕНИЯ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ

Любой человек, небезразличный к судьбе окружающей нас природной среды, понимает, что с использованием минерального топлива и руд металлов связаны свои проблемы. Загрязнение может идти, начиная с момента бурения на нефть или добычи угля и руды и кончая временем, когда эти продукты действительно используются человеком. Рассмотрение немногих примеров покажет нам значительность возникающих проблем.

Добыча угля открытым способом на

территории Аппалачей в США превратила живописный ландшафт в пустыню с зияющими выемками, грудами отвалов и бесплодной голой землей. В процессе добычи и обогащения выбрасывается масса отходов. Часть их смывается дождевыми водами в реки, и это серьезно отражается на органической жизни рек и их водном режиме. Особенно трудной задачей является удаление загрязненных вод горных выработок (и добавим – нефтяных скважин) без загрязнения поверхностных и грунтовых вод.

Бурение на нефть в море. Из многочисленных публикаций можно узнать, что ряд крупных проблем, связанных с загрязнением нефтью, возник при бурении скважин у берегов Калифорнии, в Мексиканском заливе и в Северном море.

Перевозка нефти. Открытие нефтяных месторождений на северном шельфе Аляски оказалось великим благом для США, которые были серьезно обеспокоены нехваткой собственной нефти и суровой зависимостью от импорта. Однако перевозка нефти супертанкерами к местам потребления, с неизбежной при этом ее перекачкой, представляет опасность для окружающей среды. Острота этих проблем выявилась особенно ярко, когда было завершено строительство Аляскинского нефтепровода до Валдиза. Намеченная прокладка газопровода через тундру Канады создает еще одну дополнительную угрозу окружающей природе.

Загрязнение атмосферы. Серьезных размеров достигло загрязнение атмосферы за счет сжигания ископаемых горючих материалов независимо от того, сгорают ли они на электростанциях или в двигателях автомобилей. Выброс сернистых соединений из труб металлургических заводов, перерабатывающих сульфидные руды, или работающих на угле и нефти электростанций загрязняет воздух, воду и почву. Частично остроту этой проблемы можно смягчить, либо применяя топливо с низким содержанием серы, из которого сера извлекается заранее, еще до сжигания, либо улавливая серу из отработанных газов.

Фтор, выделяющийся на заводах по производству алюминия, также оказывает вредное воздействие на естественную растительность, фруктовые деревья, фермерские поля и домашний скот. Усовершенствование технологии, несмотря на неизбежные дополнительные затраты, представляется совершенно необходимым, если только мы хотим предотвратить нанесение Земле непоправимого ущерба.

Контроль за загрязнением окружающей среды. Каковы же пути решения проблемы загрязнения окружающей среды? Часть из предложенных для этого мероприятий заключается в следующем: прекратить добычу угля открытым способом, объявить вне закона добычу нефти в море, разработать новые способы перевозки нефти, прекратить сжигание ископаемых горючих материалов, заменив их другими источниками энергии. Ясно, что некоторые из этих предложений совершенно нереальны.

В настоящее время многие лицензии на разработку месторождений и добычу угля предусматривают обязательное последующее восстановление почвенного слоя и растительности в виде, возможно более близком к прежнему. Оплата стоимости этих и других мер перекладывается на конечных потребителей соответствующих товаров и услуг.

В то же время в максимально возможной по экономическим соображениям степени следует сохранять минеральные ресурсы и практиковать повторное, циклическое использование металлов.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ

Минеральные ресурсы Земли подразделяются на энергетические ресурсы и минеральное сырье. Энергетические ресурсы включают горючие полезные ископаемые – нефть, природный газ, уголь, горючие сланцы, битуминозные песчаники и ядерное топливо – и негорючие источники энергии – солнечной, геотермальной и гидроэнергии. К минеральному сырью относятся руды металлов и многие неме-

таллические минералы и горные породы.

Нефть и природный газ возникли в морских горных породах, таких, например, как черные глины, затем они переместились в коллекторы, например в песчаники или рифовые известняки, и, наконец, скопились в структурных или неструктурных – стратиграфических, литологических и прочих ловушках. Нефть используется преимущественно как топливо, смазочный и нефтехимический материал. Выявленные запасы (в порядке убывания) размещаются на Среднем Востоке, в социалистических странах, Северной Америке, Латинской Америке, Западной Европе, на шельфе Тихого океана. Запасы отличаются от ресурсов тем, что в них входят только те ресурсы, извлечение которых экономически рентабельно в настоящее время.

Уголь встречается в изобилии во многих странах земного шара. Достаточными запасами обладают и США; они сосредоточены в Аппалачах, на Среднем Западе, на территории Великих равнин и Скалистых гор. Угли разделяются на классы от антрацитов, характерных для восточных районов Пенсильвании, и битуминозных углей, развитых во многих областях страны, до лигнитов на территории шт. Южная и Северная Дакота. Классы углей различаются теплотворной способностью, которая варьирует от 13 000–15 000 до 6000 британских тепловых единиц на один фунт угля.

Открытые выработки, штольни, наклонные или вертикальные шахты используются для добычи угля в зависимости от условий залегания и строения угольных пластов, мощности перекрывающей их толщи пород и рельефа местности.

Уголь используется для производства электроэнергии, кокса (применяемого обычно при выплавке железа) и как топливо разного назначения. Угольные смолы – побочный продукт коксования углей – служат для производства многочисленных химических веществ.

Запасов угля при современном уровне потребления хватит на много веков.

Породы типа горючих сланцев и битуминозных песчаников развиты на огромных площадях, но в настоящее время они эксплуатируются только местами.

Уран – один из главных видов топлива, не относящегося к категории горючих полезных ископаемых. Он используется в ядерных реакторах для производства электроэнергии. Дальнейшее расширение атомной энергетики упирается в проблемы, связанные с обращением с радиоактивными элементами, технологией их «сжигания» и обращением с отходами ядерных реакций.

Реакции, работающие на принципе синтеза, в которых топливом служит дейтерий из морской воды, пока еще далеки от практического воплощения, и поэтому от них не приходится ожидать решения энергетических проблем сегодняшнего дня.

Главными негорючими источниками энергии являются солнечная, геотермальная и гидроэнергия. Геологи участвуют в выборе мест для строительства плотин и электростанций, работающих на внутреннем тепле Земли. Оба этих источника будут приобретать все большее значение в будущем по мере развития сейчас еще слабо освоенных площадей.

Руды металлов формируются в результате магматической дифференциации, в пегматитах, при контактово-метаморфических и гидротермальных процессах, осадочным путем (остаточные продукты выветривания, россыпи, химические осадки). Некоторые типы руд могут образоваться при выветривании или непосредственно ниже зеркала грунтовых вод при вторичном, гипергенном обогащении.

Модель тектоники плит дает хорошую основу для выяснения пространственной и временно́й связи оруденения с образованием других горных пород. Руды могут формироваться в осевых зонах спрединга и в зонах субдукции.

Дистанционные методы, т. е. изучение поверхности Земли со спутников, позволили геологам по-новому взглянуть на Землю. Изучение рудных залежей и полей в будущем в значительной степени будет опираться на использование этих методов.

Неметаллические полезные ископаемые – минералы и породы – используются

в виде песка, гравия и гальки, бутового и строительного камня, кирпича, кровельного материала, пластмасс, изоляционного материала, стекла, фарфора, абразивного материала и многих других полезных веществ.

Руды многих металлов ожидает печальная судьба в будущем, поэтому все более необходимым становится повторное (циклическое) использование металлов, применение заменителей и уменьшение отходов.

Проблемы загрязнения окружающей среды связаны, в числе прочих причин, с открытой разработкой угольных месторождений, присутствием в рудах, угле и нефти соединений серы, морским бурением на нефть, перевозкой нефти, утечкой фтора с заводов по производству алюминия, радиоактивными отходами. В большинстве случаев эти проблемы требуют особого внимания и принятия необходимых мер.

ВОПРОСЫ

1. На какие группы можно разделить природные ресурсы Земли?
2. Какие стадии различаются в процессе образования нефти?
3. Расскажите о проблемах, возникающих при разных способах разработки угольных месторождений.
4. При добыче каких полезных ископаемых могли бы возникнуть те же самые проблемы, о которых вы только что говорили?
5. Негорючие источники энергии, такие, как гидроэнергия и геотермальная энергия, связаны с водой. Расскажите о характере этой связи.
6. Руды формируются в процессе образования горных пород, описанных в гл. 5, 7 и 8. Почему образуется руда, а не пустая порода?
7. Какая связь существует между тектоникой плит, с одной стороны, и источниками энергии и доступного для использования минерального сырья – с другой?
8. Какие из основных природных ресурсов, описанных в данной главе, являются возобновляемыми и какие невозобновляемыми?
9. Какие предложения, касающиеся необходимости продуманного отношения к минеральным ресурсам, вытекают из вашего ответа на предыдущий вопрос?

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Bates R. L., 1960, Geology of the Industrial Rocks and Minerals, Harper and Row, Publishers, New York.

Degens E. T., Ross D. A., 1969, Hot Brines and Recent Heavy Metal Deposits in the Red Sea, Springer-Verlag, Inc., New York.

Flawn P. T., 1966, Mineral Resources: Geology, Engineering, Economics, Politics, Law, Rand McNally and Company, Chicago.

Frashche D. F., 1962, Mineral Resources, National Research Council Publication 1000-C, Washington, D. C.

Gillson J. L. (ed.), 1960, Industrial Minerals and Rocks, 3d ed., American Institute of Mining, Metallurgical, and Petroleum Engineers, New York.

Heiland C. A., 1946, Geophysical Exploration, Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs, N. I.

Hubbert M. K., 1962, Energy Resources, National Research Council Publication 1000-D, Washington, D. C.

Leith C. K., Lund R. J., Leith A., 1935, Precambrian Rocks of the Lake Superior Region, U. S. Geol. Surv. Prof. Paper 184.

Levorsen A. I., 1967, Geology of Petroleum, 3d ed., W. H. Freeman and Company, San Francisco.

Mouzon O. T., 1966, Resources and Industries of the United States, Appleton-Century-Crofts, New York.

National Research Council, 1975, Mineral Resoures and the Environment, National Academy of Sciences, Washington, D. C.

Park C. F., Jr., MacDiarmid R. A., 1970, Ore Deposits, 2d ed., W. H. Freeman and Company, San Francisco.

Riley C. M., 1959, Our Mineral Resources, John

Wiley and Sons, Inc., New York.

Sabins F. F., 1978, Remote Sensing, Principles and Interpretation, W. H. Freeman and Company, San Francisco.

Sawkins F. J., 1972, Sulfide Ores and Plate Tectonics, Jour. Geology, vol. 80, pp. 377–397.

Skinner B. J., 1969, Earth Resources, Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs, N. J.

Smith H. (ed.), 1971, Conservation of Natural Resources, 4th ed., John Wiley and Sons, Inc., New York.

Sullivan W., 1974, Continents in Motion: The New Earth Debate, esp. pp. 320–447, McGraw-Hill Book Company, New York.

U. S. Bureau of Mines, 1970, Mineral Facts and Problems, Bulletin 650, Washington, D. C.

U. S. Bureau of Mines, 1970, Minerals Yearbook, published annually.

Walker W., 1976, Metallogeny and Global Tectonics, Dowden, Hutchinson and Ross, Inc., Stroudsburg, Pa.

ЭПИЛОГ

«Взгляни на Природу во всех ее проявлениях. Изменение – великий закон Природы.»

Роберт Бёрнс

Мы завершили нашу беседу о геологии – науке о вечно меняющейся Земле. Надеемся, что наши читатели смогли оценить справедливость приведенных выше слов Роберта Бёрнса. В каких других науках, кроме геологии, можно найти столь убедительную демонстрацию закона постоянного изменения? Мы не только свидетели тех изменений, которые происходят на наших глазах сегодня, но располагаем также результатами изменений, происходивших сотни миллионов лет назад. Не приходится сомневаться, что утверждение Джеймса Геттона, высказанное им в 1795 г., о том, что «нет ни следов начала, ни признаков конца», значит для нас теперь больше, чем когда-либо раньше.

Темы, обсуждавшиеся в этой книге, были выбраны с целью показать бесконечное разнообразие изменений: кристаллизация минералов; образование, изменение и разрушение горных пород; вулканическая деятельность и другие формы магматизма; деформация пород в процессе складчатости и формирование разрывов; последствия внезапных землетрясений и та информация, которую они дают о внутреннем строении Земли; движение плит; природные ресурсы Земли. Мы рассмотрели также разнообразные результаты действия силы тяжести, воды, ветра и льда в их неустанной работе по созданию вечно изменяющегося ландшафта земной поверхности.

Создание этой книги было для ее авторов увлекательным приключением, сопровождавшимся непрерывным поиском новых фактов, новых интерпретаций, новых ответов на старые вопросы и постоянно возникающими из новых данных многочисленными новыми вопросами. Мы будем удовлетворены, если сумели взбудоражить пытливые умы наших читателей, которые были нашими спутниками в этом долгом путешествии. На прощание желаем вам удачи в ваших будущих дерзаниях в геологии или на любом другом поприще.

ПРИЛОЖЕНИЕ А

Свойства наиболее распространенных минералов

Название	Состав	Цвет	Блеск	Спайность и излом	Твердость	Удельный вес	Сингония	Некоторые другие свойства
Авгит	$Ca(Mg, Fe, Al)(Al, Si)_2O_6$, сложный алюмосиликат железа и магния	Темно-зеленый до почти черного	Стеклянный, тусклый	Призматическая спайность под углами 87 и 93°; отдельность по пинакоиду				
Алебастр	(См. гипс)							
Альбит	(См. плагиоклаз)							
Амфибол	(См. роговая обманка)							
Андезин	(См. плагиоклаз)							
Ангидрит	$CaSO_4$, сульфат кальция	Белый, серый, слабоокрашенный	Стеклянный, перламутровый	Спайность по трем перпендикулярным направлениям	3–3,5	2,7–3,0	Ромбическая	Обычно встречаются в виде зернистой массы
Анортит	(См. плагиоклаз)							
Асбест	(См. серпентин)							
Биотит	$K(Mg, Fe)_3AlSi_3O_{10}(OH)_2$, сложный железомагниевый силикат	Темно-зеленый, коричневый, черный	Стеклянный, перламутровый, полуметаллический	Весьма совершенная спайность по одному направлению	2,5–3	2,7–3,2	Моноклинная	Легко раскалывается на гнущиеся пластинки; прозрачный или полупрозрачный; часто встречается в виде рассеянных чешуек
Битовнит	(См. плагиоклаз)							
Кальцит	$CaCO_3$, карбонат кальция	Бесцветный, белый, серый, любого другого цвета	Стеклянный, землистый	Спайность совершенная по ромбоэдру – по трем направлениям	3	2,72	Гексагональная	Легко вскипает в разбавленной соляной кислоте; от прозрачного до непрозрачного; часто встречается в виде кристаллов
Халькопирит	$CuFeS_2$	Латунно-желтый до золотисто-желтого	Металлический	Излом неровный	3,5–4	4,1–4,3	Тетрагональная	Хрупкий; цвет черты зеленовато-черный; выцветы голубого, пурпурного или черного цвета
Хромит	$FeCr_2O_4$	Коричневато-черный до железисто-черного	Смолистый полуметаллический	Излом неровный	5,5	4,3–4,6	Кубическая	Цвет черты темно-коричневый; встречается в виде зернистой массы или в рассеянном виде в основных породах; от полупрозрачного до непрозрачного
Корунд	Al_2O_3, окись алюминия	Коричневый, серый, красный, голубой, желтый, бесцветный	Стеклянный	Спайность отсутствует; отдельность по пинакоиду	9	3,9–4,1	Гексагональная	Гексагональные кристаллы часто бочонкообразной формы; от прозрачного до полупрозрачного; драгоценные разновидности – рубин и сапфир
Алмаз	С, углерод	Бесцветный, желтый, красный, голубой, зеленый, серый, черный	Алмазный	Спайность совершенная по октаэдру – по четырем направлениям	10	3,2–3,5	Кубическая	От прозрачного до непрозрачного; встречается в виде октаэдрических кристаллов или в виде гальки в россыпях
Доломит	$CaMg(CO_3)_2$, карбонат кальция и магния	Белый, розовый, серый, желтый, коричневый, черный	Стеклянный, перламутровый	Спайность по ромбоэдру – по трем направлениям	3,5–4	2,85	Гексагональная	Слабо вскипает в сильной соляной кислоте; поверхность кристаллов часто изогнутая; от прозрачного до полупрозрачного; встречается в виде зернистой массы
Флюорит	CaF_2, фтористый кальций	Зеленый, фиолетовый, белый, желтый, бесцветный, голубой, коричневый	Стеклянный	Спайность совершенная по октаэдру – по четырем направлениям	4	3,0–3,2	Кубическая	Часто встречается в виде кубических кристаллов; от тонко- до крупнокристаллической массы; от прозрачного до полупрозрачного

Название	Состав	Цвет	Блеск	Спайность и излом
Галенит	PbS, сульфид свинца	Свинцово-серый	Металлический, тусклый	Спайность совершенная по кубу – по трем перпендикулярным направлениям
Гранат	$(Ca, Fe, Mg, Mn)_3 \times$ $\times (Al, Fe, Cr)_2 \cdot (SiO_4)_3$, сложный силикат	Красный, коричневый, желтый, зеленый	Стеклянный, смоляной	Раковистый излом
Графит	C, углерод	Стально-серый до черного	Тусклый землистый или металлический	Спайность совершенная в одном направлении; чешуйки
Гипс	$CaSO_4 \cdot 2H_2O$, водный сульфат кальция	Бесцветный, белый, серый, желтый, красный, голубой	Стеклянный, перламутровый, атласный	Спайность совершенная по одному направлению, средняя – по другому и несовершенная – по третьему
Галит	NaCl, хлористый натрий	Бесцветный, белый, *любого* другого цвета	Стеклянный	Спайность весьма совершенная по кубу – по трем перпендикулярным направлениям
Гематит	Fe_2O_3, *окись железа*	Красно-коричневый до стально-серого и железисто-черного; землисто-красный	Металлический или тусклый	Раковистый излом
Роговая обманка	$Ca_2(Mg, Fe, Al)(Al, Si)_8 \times$ $\times O_{22}(OH)_2$, сложный железомагниевый силикат	От светло- до темно-зеленого, коричневый, черный	Стеклянный, шелковистый	Совершенная призматическая спайность под углами 56 и 124°
Гиперстен	$(Mg, Fe)SiO_3$	Зеленый, коричневый, черный	Перламутровый, металловидный	Средняя призматическая спайность
Каолинит	$Al_2Si_2O_5(OH)_4$, водный алюмосиликат	Белый (если без примесей), желтый, красный, коричневый	В массе тусклый, землистый; чешуйки перламутровые	Чешуйки (редко); излом землистый
Лабрадор	(См. плагиоклаз)			
Лимонит	$Fe_2O_3 \cdot nH_2O$ (варьирует), водная окись железа	Желтый, коричневый, черный	Тусклый землистый, полуметаллический	Спайность отсутствует; излом раковистый или землистый
Магнетит	Fe_3O_4, окись железа	Железисто-черный	Металлический, полуметаллический, тусклый	Излом неровный
Микроклин	$KAlSi_3O_8$, калиевый алюмосиликат	Белый, розовый, красный, желтый, зеленый, серый	Стеклянный, перламутровый	Спайность по двум приблизительно перпендикулярным направлениям

Твердость	Удельный вес	Сингония	Некоторые другие свойства
2,5	7,3–7,6	Кубическая	Тяжелый; непрозрачный; обычны кубические кристаллы; цвет черты серовато-черный; свинцовая руда
6,5–7,5	3,4–4,3	Кубическая	Встречается в виде хорошо образованных кристаллов или зернистой массы; прозрачный или полупрозрачный; используется как абразивный материал
1–2	1,9–2,3	Гексагональная	Непрозрачный; жирный на ощупь; пачкает бумагу; цвет черты свинцово-серый; встречается в виде плотной массы или гибких чешуек
2	2,2–2,4	Моноклинная	Хорошие, часто сдвойникованные кристаллы – селенит, в случае волокнистого строения – атласный шпат, в случае массивного строения – алебастр; от прозрачного до непрозрачного
2–2,5	2,1–2,3	Кубическая	Соленый на вкус; кубические кристаллы или зернистая масса; прозрачный или полупрозрачный
5,5–6,5	4,9–5,3	Гексагональная	Цвет черты красный или красно-коричневый; непрозрачный; множество разновидностей; стально-серые слюдоподобные и сланцеватые разновидности – спекулярит; основная железная руда
5–6	2,9–3,3	Моноклинная	Кристаллы часто призматические; зернистая масса или волокна; непрозрачный или полупрозрачный
5–6	3,1–3,5	Ромбическая	Часто переливающегося цвета или бронзовый
1–2,5	2,2–2,6	Моноклинная	Гладкий или немного жирный на ощупь; во влажном виде имеет землистый запах; пластичный во влажном состоянии; непрозрачный или полупрозрачный
1–5,5	3,4–4,0	Аморфный	Цвет черты всегда желто-коричневый; непрозрачный; массивный; конкреционное строение, есть другие разновидности; железная руда
5,5–6,5	4,9–5,2	Кубическая	Сильные магнитные свойства; цвет черты черный; обычно массивно-зернистого строения или в виде рыхлого черного песка
6–6,5	2,55	Триклинная	Кристаллы или раскалывающаяся по спайности масса

Название	Состав	Цвет	Блеск	Спайность и излом
Мусковит	$KAl_2AlSi_3O_{10}(OH)_2$	Бесцветный или слабоокрашенный	Перламутровый, стеклянный	Спайность весьма совершенная
Олигоклаз	(См. плагиоклаз)			
Оливин	$(Mg, Fe)_2SiO_4$, железо-магниевый силикат	Светло-зеленый, оливково-зеленый; коричневато-зеленый – в зависимости от содержания железа	Стеклянный	Излом раковистый
Опал	$SiO_2 \cdot nH_2O$, водный кремнезем	Бесцветный, белый, или любого цвета	Стеклянный, тусклый, жирный	Излом раковистый
Ортоклаз	$KAlSi_3O_8$, калиевый алюмосиликат	Белый, розовый, красный, серый, бесцветный	Стеклянный, перламутровый	Спайность совершенная по двум перпендикулярным направлениям
Плагиоклаз	$NaAlSi_3O_8 - CaAl_2Si_2O_8$, группа натрий-кальциевых алюмосиликатов	Бесцветный, белый, серый, голубоватый, зеленоватый	Стеклянный, перламутровый	Спайность совершенная по двум направлениям под углом 86°; излом неровный
Пирит	FeS_2, сульфид железа	Бледный, латунно-желтый, тускло-коричневый	Металлический	Излом раковистый или неровный
Пироксен	(См. авгит)			
Кварц	SiO_2, кремнезем	Обычно бесцветный или белый, но может быть любого цвета	У кристаллов стеклянный, на изломе жирный	Спайность отсутствует; излом раковистый
Серпентин	$H_4Mg_3Si_2O_9$, водный силикат магния	Оливково-зеленый, желто-зеленый, коричневато-зеленый, коричневый; часто пятнистый	Жирный, восковой, тусклый; шелковистый или волокнистый	Излом раковистый, занозистый; может быть волокнистым
Сфалерит	ZnS, сульфид цинка	Белый (если без примесей), желтый, коричневый, черный (с железом)	Смоляной, алмазный	Спайность по шести направлениям
Тальк	$H_2Mg_3(SiO_3)_4$, водный силикат магния	Белый, серый, светло-зеленый	Перламутровый, тусклый, жирный	Спайность совершенная по одному направлению; хлопьевидный

Твердость	Удельный вес	Сингония	Некоторые другие свойства
2–3	2,8–3,1	Моноклинная	Легко расщепляется на очень тонкие, прозрачные, упругие лепестки
6,5–7	3,2–3,6	Ромбическая	Обычно встречается в виде зернистой массы или рассеянных кристаллов; от прозрачного до полупрозрачного
1–6,5	2,1–2,3	Аморфный	Может быть переливающегося цвета; форма варьирует
6	2,5–2,6	Моноклинная	От прозрачного до непрозрачного; встречается либо как породообразующий минерал, либо в виде зернистой или раскалывающейся по спайности массы
6–6,5	2,6–2,7	Триклинная	Изоморфный ряд включает альбит, олигоклаз, андезин, лабрадор, битовнит, анортит; кристаллы со штриховкой; некоторые разновидности лабрадора обладают синей опалесценцией
6–6,5	4,9–5,2	Кубическая	Хрупкий; непрозрачный; цвет черты зеленоватый до коричневато-черного; часто встречается в виде кубиков с исштрихованной поверхностью
7	2,65	Гексагональная	От прозрачного до полупрозрачного; обычна гексагональная призматическая форма кристаллов; существует множество разновидностей; скрытокристаллическая форма – халцедон
2,5–5	2,5–2,8	Моноклинная	Гладкий или жирный на ощупь; полупрозрачный; массивный, пластинчатый или волокнистый (асбест)
3,5–4	3,9–4,2	Кубическая	Цвет черты бледно-желтый; от прозрачного до непрозрачного; основная цинковая руда
1	2,6–2,8	Моноклинная	Жирный на ощупь; массивный или расслоенный; чешуйки легко гнутся, но не упруги; тальковая порода носит название «мыльный камень»

ПРИЛОЖЕНИЕ Б

Метрическая система и переход к другим системам

Меры длины

1 км $= 10^3$ м
$= 0{,}621$ статутной мили
$= 0{,}540$ морской мили
1 м $= 10^2$ см
$= 39{,}4$ дюйма
$= 3{,}28$ фута
$= 1{,}09$ ярда
1 см $= 10$ мм
$= 0{,}394$ дюйма

Меры площади

1 см^2 $= 0{,}155$ кв. дюйма
1 м^2 $= 10{,}8$ кв. фута
1 км^2 $= 0{,}386$ кв. статутной мили

Меры объема

1 км^3 $= 10^9$ м^3
$= 10^{15}$ см^3
$= 0{,}24$ куб. статутной мили
1 м^3 $= 10^6$ см^3
$= 10^3$ л
$= 35{,}3$ куб. фута
$= 264$ галлона США
1 л $= 10^3$ см^3
$= 1{,}06$ кварт
$= 0{,}264$ галлона США
1 см^3 $= 0{,}061$ куб. дюйма

Меры массы

1 т $= 10^6$ г
$= 2205$ фунтов
1 кг $= 10^3$ г
$= 2{,}205$ фунта
1 г $= 0{,}035$ унции

Меры скорости

1 м/с $= 2{,}24$ статутной мили в час
$= 1{,}94$ узла
1 см/с $= 0{,}33$ фута в секунду

Меры температуры

Формулы перехода:

$$^\circ C = \frac{^\circ F - 32}{1{,}8}$$

$$^\circ F = 1{,}8(^\circ C) + 32$$

Меры энергии

1 грамм-калория (кал) $= \frac{1}{860}$ Вт в час

$= \frac{1}{252}$ британской тепловой единицы

СЛОВАРЬ ТЕРМИНОВ[1]

Аа-лава (Aa). Лава базальтового состава с неровной шлаковой поверхностью.

Абиссальный (Abyssal). Относящийся к наиболее глубоким частям океана; абиссалью называют область океана, глубина которой превышает 2000 м (1000 фатомов).

Абляция (Ablation). Удаление льда с поверхности ледников в результате таяния и испарения.

Абразия (Abrasion). Стачивание и истирание пород и минералов под воздействием песка или других твердых частиц.

Авгит (Augite). Широко распространенный железомагниевый силикат (из группы пироксенов); обычно встречается в основных магматических породах.

Агат (Agate). Скрытокристаллический кварц или халцедон с полосами или отчетливо выраженными участками разного цвета.

* **Аггрaдация** (Aggrade). Отложение осадков в ложе реки или на дне долины.

Агломерат (Agglomerate). Угловатые обломки вулканических пород. Грубая вулканическая брекчия.

Агоническая линия (Agonic line). Линия на поверхности Земли, на которой магнитное склонение (т. е. отклонение магнитного меридиана от географического) равно нулю.

Актуализм (Uniformitarianism). См. Закон актуализма.

Алебастр (Alabaster). Плотная тонкозернистая разновидность гипса.

Алеврит (Silt). Обломочные (кластические) осадки с размером частиц большим, чем у глин, и меньшим, чем у песка, т. е. имеющие диаметр от 1/256 до 1/16 мм.

Аллювий (Alluvium). Речные обломочные осадки любого типа.

Алмаз (Diamond). Минерал углерода кубической сингонии, С. Самый твердый из известных естественных веществ.

Альбит (Albite). Плагиоклаз с высоким содержанием натрия.

Альпийский, альпийского типа (Alpine). Похожий на Альпы или другие высокие горы.

Альфа-частица (Alpha particle). Атом гелия, утративший два электрона и вследствие этого несущий два положительных заряда.

Аморфный (Amorphous). Термин применяется для обозначения минералов или пород, не имеющих ясной кристаллической структуры и упорядоченного расположения атомов.

[1] Звездочкой отмечены термины, которые не употребляются или очень редко употребляются в отечественной геологической литературе. – *Прим. ред.*

Амфиболит (Amphibolite). Метаморфическая порода, сложенная главным образом минералами групп амфиболов и плагиоклазов.

Амфиболов группа (Amphibole group). Группа силикатных минералов, содержащих железо и магний. Наиболее распространенный минерал – роговая обманка.

Ангидрит (Anhydrite). Минерал из группы сульфатов, подобный гипсу, но не содержащий воды; безводный сульфат кальция ($CaSO_4$).

Ангстрем (Angstrom unit). Единица длины, равная одной стомиллионной доле сантиметра (10^{-8} см).

Андезит (Andesite). Тонкозернистая магматическая порода, состоящая в основном из андезина (минерала из группы плагиоклазов), но содержащая также железомагниевые силикаты.

Анион (Anion). Атом, захвативший один или больше добавочных электронов и превратившийся в отрицательно заряженный ион.

Анортит (Anorthite). Полевой шпат из группы плагиоклазов с высоким содержанием кальция.

Антецедентная река (Antecedent stream). Река, русло которой, возникшее до начала поднятия, сохраняет свое положение во время поднятия и после него.

Антиклиналь (Anticline). Обычно дугообразно изогнутая складка с более древними породами в ядре и наклоном (падением) слоев в противоположные стороны от оси складки.

Антициклон (Anticyclone). Состояние атмосферы с высоким атмосферным давлением над какой-либо областью, от которой ветер дует в стороны по спирали.

Антрацит (Anthracite). Твердый уголь.

Апатит (Apatite). Минерал из группы фосфатов.

* **Арет** (Arête). Узкий, изрезанный хребет, образовавшийся в результате разрушения (стачивания) противоположных склонов ледниками.

Аркозовый песчаник (Arkose). Обломочная осадочная порода, состоящая из зерен кварца и ортоклаза песчаной размерности. В основном образуется при разрушении гранитов.

Арктика (Arctic). Область, заключенная внутри Северного полярного круга (66°33′ с. ш.).

* **Арройо** (Arroyo). Промоина с плоским дном и вертикальными стенками, образованная временными потоками в полуаридных районах на юго-западе США.

Артезианский бассейн (Artesian basin). Подземная (погребенная) геологическая структура в которой вода находится под гидростатическим давлением.

Асбест (Asbestos). Группа отчетливо волокнистых минералов, например хризотил – разновидность серпентина, а также ряд амфиболов, например актинолит и тремолит.

Астеносфера (Asthenosphere). Пластичный, податливый слой, расположенный непосредственно под литосферой, по которому происходит перемещение литосферных плит.

Астероид (Asteroid). Одно из большого множества мелких тел, вращающихся вокруг Солнца, в основном между орбитами Марса и Юпитера.

Асфальт (Asphalt). Вязкий битум коричневого до черного цвета, встречающийся совместно с нефтью.

Атмосферные осадки (Precipitation). Выпадение воды из атмосферы в виде дождя, снега, мокрого снега и града.

Атолл (Atoll). Кольцеобразный коралловый остров, окаймляющий или почти окаймляющий лагуну.

Атомное число (Atomic number). Число положительно заряженных частиц в ядре атома.

Атомный вес (Atomic weight). Средний относительный вес ядра атома по отношению к атомному весу углерода (12,000), принятому за эталон.

Атомы (Atoms). Мелкие частицы, из которых состоит любое вещество. В атомах имеются протоны, нейтроны и электроны.

Афанитовая порода (Aphanite). Плотная тонкозернистая магматическая порода, мелкие кристаллические минеральные зерна которой не различимы невооруженным глазом.

Базальный конгломерат (Basal conglomerate). Конгломерат, отложившийся на древней эрозионной поверхности; примером могут служить прибрежные осадки медленно наступающего моря.

Базальт (Basalt). Тонкозернистая магматическая порода от черного до серого цвета, с высоким содержанием железомагниевых минералов; базальты являются широко распространенной породой лавовых потоков.

Бар (Bar). Песчаная гряда, намытая на дне моря волнами и течениями; бары могут встречаться также в руслах рек.

Бараний лоб (Roche moutonnée). Скала, обточенная и сглаженная ледником.

Бар входа в бухту (Bay-head bar). Бар, возникший на небольшом расстоянии от берега у входа в бухту.

Барит (Barite). Минерал ромбической сингонии, сульфат бария ($BaSO_4$).

Барометр (Barometer). Прибор для измерения атмосферного давления.

Бархан (Barchan). Серповидная дюна, «рога»

которой ориентированы в направлении движения ветра.

Барьерный риф (Barrier reef). Коралловый риф, параллельный берегу; отделен от берега лагуной.

Батиальный (Bathyal). Относящийся к глубоким частям океана, глубоководный; батиалью иногда называют область подводного континентального склона.

Батолит (Batholith). Огромная интрузия магматических пород, выступающая из глубины и, по-видимому, не имеющая дна, с площадью выхода на поверхность больше 100 км^2.

* **Бахада** (Bajada). Сложно построенный аллювиальный конус выноса, сливающийся с днищем долины.

Бедленд (Badlands). Рельеф, характеризующийся запутанной сетью оврагов и острых водораздельных гребней между ними.

Бентос (Benthos). Обитающие на дне моря организмы.

Бергшрунд (Bergschrund). Глубокая дугообразная трещина (или система трещин), протягивающаяся вдоль границы ледника со стенками цирка в долинных ледниках.

Береговой бар (Barrier beach). Песчаная гряда, вытянутая параллельно берегу и немного возвышающаяся над уровнем прилива; обычно отделяется от берега лагуной.

Береговой бриз (Land breeze). Слабый ветер, дующий с суши в направлении моря или озера; возникает вследствие неодинакового охлаждения суши и водной массы.

Бета-излучение (Beta radiation). Излучение ядром атома электронов или позитронов.

Биогенный (Biogenic). Относящийся к необломочным осадкам, образовавшимся за счет жизнедеятельности организмов.

Биотит (Biotite). Слюда черного цвета. Широко распространенный железомагниевый силикат с прекрасной спайностью по одному направлению, раскалывающийся на очень тонкие, прозрачные, упругие пластинки или листы.

Битум (Bitumen). Смесь смолистых углеводородов, растворимых в дисульфиде углерода.

Битуминозный уголь (Bituminous coal). Мягкий уголь с содержанием углерода около 80% и кислорода около 10%. Вопреки названию не содержит битумов.

Боковая морена (Lateral moraine). Морена, образующаяся по краям долинных ледников и состоящая из неокатанных, угловатых обломков, падающих на ледник со склонов долины.

Боксит (Bauxite). Основная алюминиевая руда. Состоит преимущественно из гидроокислов алюминия.

Болотный газ (Marsh gas). Метан. Присутствует в природных газах; образуется в результате частичного разложения растительного вещества. Шахтеры называют его гремучим газом.

Болотный ил (Muck). Вещество, похожее на торф, но отличающееся от него бóльшим содержанием минералов почв.

Бор (Bore). Приливная волна, движущаяся против течения вверх по реке или эстуарию.

Бородообразный приток (Barbed tributary). Приток, впадающий в главную реку в направлении, обратном направлению ее течения.

Брекчия (Breccia). Порода, состоящая из обломков горных пород, но в отличие от конгломерата обладающих угловатой, а не округлой формой.

Брекчия течения (Flow breccia). Куски затвердевшей лавы, спаянные друг с другом или сцементированные лавой; часто приурочены к верхней части лавовых потоков.

Бухта (Cove). Маленький залив или заливообразное углубление в береговой линии.

Вадозная вода (Vadose water). См. Подвешенная вода.

Валунная (моренная) глина (Boulder clay, Till). Несортированные, неслоистые ледниковые осадки, заключающие обломки горных пород размером до валунов.

Вандерваальсова связь (Van der Waals bond). Слабая химическая связь, возникающая благодаря тому, что ионы или атомы оказываются частично заряженными вследствие неравномерного размещения в них электронов.

Вентифакт (Ventifact). Термин, применяемый для обозначения гальки или валунов, приобретающих определенную форму под влиянием абразивного воздействия песка, переносимого ветром.

Вермикулит (Vermiculite). Пластинчатый слюдоподобный минерал заметно разбухающий при нагревании.

Вертикальное смещение, смещение по вертикали (Throw). Вертикальная компонента смещения по разрыву.

Взброс (Reverse fault). Разрыв, при котором висячее крыло смещается вверх по отношению к лежачему крылу.

Висячая долина (Hanging valley). Долина, днище которой расположено значительно выше днища главной долины, в которую она впадает.

Висячее крыло (Hanging wall). Масса горных пород, расположенная над плоскостью разрыва.

Висячий бок (Hanging wall). Масса горных пород, расположенная над жилой или рудной залежью.

Витрофир (Vitrophyr). Консолидированная стекловатая магматическая порода с редкими *фенокристаллами*.

Включение (Inclusion). Фрагмент более древней породы, заключенный внутри магматической породы.

Водный (Aqueous). Относящийся к воде или содержащий воду, например водный раствор.

Водобойный колодец (Plunge pool). Большая впадина, выдалбливаемая водой в основании водопада.

Водобойный котел (Pothole). Выемка цилиндрической формы, образующаяся у порогов или под водопадами.

Водоносный горизонт (Aquifer). Проницаемые горные породы или подпочва с более или менее свободной циркуляцией воды.

Водопроницаемая порода (Pervious rock). Слой или толща горных пород или осадка, содержащая полости, через которые вода может проходить в обстановке нормального гидростатического давления.

Водораздел (Watershed, Divide). Хребет или какой-нибудь другой элемент рельефа, разделяющий бассейны смежных рек.

Водосборная площадь (Catchment area). Площадь питания артезианского бассейна.

Водосборный бассейн (Watershed). Речной бассейн – площадь, дренируемая одной речной системой.

Возгонять, возгонка (Sublimate). См. Сублимировать, сублимация.

Волнонамывная терраса (Wave-built terrace). Аккумулятивная терраса, образующаяся вдоль берега или вблизи берега в результате намывного действия волн.

Волноприбойная терраса (Wave-cut terrace). Выровненная поверхность, образующаяся при отступании берегового уступа, разрушаемого волнами. Ее называют также береговой платформой, волновой платформой, морской абразионной поверхностью.

Восстановление (Reduction). Процесс удаления кислорода из химических соединений.

Врезание и заполнение (Scour and fill). Процесс врезания и повторного заполнения осадками русел рек; врезание происходит в ранее накопившиеся осадки в связи с изменением скорости течения реки, а также в связи с поднятием территории и отливными течениями.

Врезанная меандра (Entrenched meander). *Меандра, врезанная в днище долины. Врезание* происходит при поднятии местности, когда имеет место сильное углубление долины меандрирующей реки.

Вулкан (Volcano). Гора, сложенная лавой и обломочным пирокластическим материалом, выброшенными через жерло из недр Земли.

Вулканизм (Vulcanism). *Процесс возникновения* и перемещения магмы и лавы и формирования образующихся при этом горных пород и минералов.

Вулканическая брекчия (Volcanic breccia). Затвердевшая пирокластическая порода, состоящая в основном из угловатых обломков размером больше 32 мм в поперечнике.

Вулканические бомбы (Volcanic bombs). Эллипсовидные или веретенообразные куски вязкой лавы, выброшенные из вулкана; их размер колеблется от долей сантиметра до метра и более.

Вулканические выбросы (эжективный материал) (Ejecta). Материал горных пород, извергнутый из земных недр вулканами.

Вулканическое стекло (Volcanic glass). Стекло естественного происхождения, образующееся при быстром остывании лавы, когда не успевает произойти кристаллизация. Примерами могут служить обсидиан, смоляной камень, пемза, шлак.

Вулканический некк (Volcanic neck, Plug). Масса магматических пород грубо цилиндрической формы, заполняющая жерло потухшего вулкана. Поперечник вулканических некков может колебаться от немногих сотен метров *до километра и больше.*

Вулканический пепел (Volcanic ash). Несцементированный материал вулканических выбросов, состоящий из обломков, диаметр которых редко превышает 4 мм.

Выветривание (Weathering). Сложная совокупность естественных процессов, как химических, так и механических, приводящих к разрушению и распадению горных пород.

Выдувание (Deflation). См. Дефляция.

Выровненная река (Graded stream). Река, продольный профиль которой находится в равновесии, вследствие чего не происходит ни врезания, ни аккумуляции.

Выщелачивание (Leaching). Процесс растворения просачивающимися грунтовыми водами и удаления более легко растворимых минеральных соединений.

Вязкость (Viscosity). Внутреннее трение в жидких телах, которое оказывает противодействие их течению.

Габбро (Gabbro). Крупнозернистая магматическая *порода основного состава, состоящая* преимущественно из пироксена и кальциевого плагиоклаза.

Галактика (Galaxy). Скопление сотен миллиардов звезд, относящееся к числу тех основных единиц, из которых состоит Вселенная.

Галенит (Galena). Минерал, сульфид свинца. Основная свинцовая руда.

Галечник (Shingle). Галька, образующая галечный пляж; галька обычно окатанная, уплощенная, приблизительно одинакового размера.

Галит (Halite). Каменная соль. Широко распространенный минерал хлорида натрия; относится к минералам эвапоритового происхождения.

Галька крупная (Cobble). Обломок породы крупнее обычной гальки и меньше валуна, т. е. от 64 до 256 мм в поперечнике («булыжник»).

***Гамбо** (Gumbo). Почва, при размокании превращающаяся в очень липкую грязь.

Гамма-лучи (Gamma ray). Коротковолновое излучение, возникающее при ядерных реакциях.

Гейзер (Geyser). Горячий источник с периодическими (с перерывами) выбросами.

Гейзерит (Geyserite). Кремнистые осадки, формирующиеся около горячих источников.

Гематит (Hematite). Основная железная руда, окись железа.

Геоморфология (Geomorphology). Наука, изучающая возникновение и развитие рельефа континентов.

Геосинклиналь (Geosyncline). Удлиненный прогиб, заполненный особенно мощными толщами осадочных пород, которые накапливались в течение длительного времени.

Геотермальная энергия (Geothermal energy). Энергия, получаемая за счет использования глубинного тепла Земли.

Геотермический градиент (Geothermal gradient). Изменение температуры Земли с глубиной.

Геофизика (Geophysics). Одна из отраслей геологии, в которой изучение Земли ведется с позиций физики.

Геохимия (Geochemistry). Все области геологии, имеющие дело с изучением химических преобразований.

Геохронология (Geochronology). Изучение истории Земли методами определения относительного возраста горных пород и изотопного датирования.

Гидравлический градиент (Hydraulic gradient). Градиент, обусловленный гидростатическим давлением.

Гидратация (Hydratation). Химическая реакция соединения какого-либо вещества с водой.

Гидрогенные осадки (Hydrogenic sediments). Осадки, образующиеся путем осаждения из водных растворов.

Гидрологический цикл (Hydrologic cycle). Цикл, в котором вода вначале испаряется с поверхности моря, затем выпадает в виде атмосферных осадков на поверхность суши и, наконец, возвращается в море реками. Часть воды испаряется снова, прежде чем она достигнет моря.

Гидрология (Hydrology). Наука, изучающая поведение воды на Земле.

Гидростатическое давление (Hydrostatic pressure). Давление, производимое водой в каждой точке покоящегося объема воды.

Гидросфера (Hydrosphere). Водная оболочка Земли.

Гийот (Guyot). Подводная гора с плоской вершиной.

Гипс (Gypsum). Широко распространенный минерал, водный сульфат кальция. Разновидности: атласный шпат, селенит, алебастр.

Глауконит (Glauconite). Зеленый минерал зернистого строения, водный железокалиевый силикат.

Глауконитовый песок (Greensand). Песок с большим содержанием глауконита.

Глина (Clay). 1. Осадок, состоящий из обломочных частиц диаметром не больше 1/256 мм. 2. Группа глинистых минералов, состоящих в основном из водных силикатов алюминия с возможной добавкой катионов калия, натрия, магния и кальция. Глинистые минералы обладают листоватым строением; они образуются при выветривании и в процессе гидротермального изменения.

Глинистая порода (уплотненная глина) (Shale). Слоистая обломочная осадочная порода, состоящая из частиц глинистой размерности. Глинистая порода может быть, однако, сложена не только глинистыми минералами, но содержать также частицы кварца, полевого шпата, кальцита, доломита и других минералов алевритовой размерности.

Глинистый (Argillaceous). Термин применяется для обозначения пород со значительным содержанием глинистого материала.

Глинистый сланец (Slate). Тонкозернистая метаморфическая порода с хорошо развитым вторичным кливажом (сланцеватостью), благодаря которому она раскалывается на пластины с гладкой поверхностью.

Гнейс (Gneiss). Крупнозернистая, нечетко сланцеватая полевошпатовая порода обычно метаморфического происхождения.

Годичный слой (Varve). Образующаяся в течение года пара тонких осадочных слоев, один из грубого, другой из тонкого материала; отложение происходит в ледниковых озерах, где грубый материал накапливается летом, тонкий – зимой.

Голубой ил (Blue mud). Разновидность глубоководных илов, состоящая преимущественно из тонкого алевритового и глинистого материала, поступающего с суши. При окислении становится красным.

Голубые сланцы (Blue schist). Метаморфическая порода или метаморфическая фация, характеризующаяся ассоциацией низкотемпературных минералов высокого давления; считается, что голубые сланцы формируются главным образом в холодных литосферных плитах в зонах субдукции.

Гомогенный (Homogeneous). Одной и той же природы; однородный во всех частях; противопоставляется термину «гетерогенный».

Гондвана (Gondwanaland). Гипотетический суперконтинент, состоявший из континентальных масс южного полушария и Индийского субконтинента.

Горизонт А (A horizon). Верхний слой почвы, в котором аккумулируется органический материал и из которого выщелачиваются растворимые соли и коллоиды; верхний пахотный слой почвы.

Горизонт В (B horizon). Слой почвы (лежащий под горизонтом А), в котором аккумулируются коллоиды, растворимые соли и тонкие минеральные частицы.

Горизонт С (C horizon). Зона выветрелых пород, лежащая ниже горизонта В в разрезе почвы. Вниз переходит в невыветрелые коренные породы.

Горная мука (Rock flour). Тонкие обломочные частицы глинистой и алевритовой размерности, образующиеся при ледниковой эрозии, переносимые и откладываемые ледниковыми водами.

Горная порода (Rock). Минерал или минеральный агрегат, слагающие земную кору.

Горнблендит (Hornblendite). Крупнозернистая магматическая порода основного состава, сложенная роговой обманкой.

Горст (Horst). Блок земной коры, обычно удлиненной формы, приподнятой по разломам по отношению к смежным породам.

Горькое озеро (Bitter lake). Озеро, отличающееся от соленого озера высоким содержанием растворенных в воде сульфатов и карбонатов щелочей.

Горючие полезные ископаемые (Fossil fuel). Энергетические ресурсы, образовавшиеся в результате концентрации органического материала.

Горючий сланец (Oil shale). Глинистая порода с высоким содержанием органического материала; при медленной перегонке из нее выделяется нефть.

Горячая точка (Hot spot). Площадь с аномально высоким тепловым потоком, связанным с повышенной магматической и гидротермальной активностью.

Грабен (Graben). Ограниченный разрывами ров или блок, опущенный по разрывам относительно смежных с ним участков.

Градационная слоистость (Graded bedding). Постепенное изменение размера зерен в слое осадочной породы от крупных внизу до тонких в верхней части слоя.

* **Градация (выравнивание)** (Gradation). Процесс, который стремится выровнять поверхность Земли путем эрозии и осадконакопления.

Гранаты (Granets). Группа силикатных минералов, используемых как драгоценные камни и как абразивный материал.

Гранит (Granite). Крупнозернистая интрузивная магматическая порода, состоящая из ортоклаза, кварца и железомагниевого минерала.

Гранитизация (Granitization). Процесс образования гранита путем преобразования (в твердом состоянии) ранее существовавших пород.

Гранитоидная структура (Granitoid). Крупнокристаллическая структура магматических пород.

Грань (Facet). Плоская (сточенная) поверхность обломка горной породы.

Грауваккa (Graywacke). Обломочная осадочная порода серого цвета, состоящая из обломков гранитов и других пород и минералов, заключенных в глинисто-алевритовом цементе (матриксе).

Графит (Graphite). Минерал углерода.

* **Грит** (Grit). Грубозернистый песок.

Гряда (Hogback). Хребет, сложенный крепкими породами и образовавшийся при эрозии слоев, залегающих с сильным наклоном.

Грязевой вулкан (Mud volcano). Грязевой гейзер, обычно образующийся в результате выбросов битуминозной грязи из центрального жерла.

Грязевой поток (Mudflow). См. Сель.

* **Гуано** (Guano). Осадок, образовавшийся из экскрементов летучих мышей и птиц.

Дайка (Dike). Плоское тело магматической породы, внедрившееся по трещине.

Дамба (Levee). Естественная или искусственная насыпь, не позволяющая реке выходить за пределы своего русла.

Дарси (Darcy). Единица проницаемости, используемая при изучении подземных вод.

Дацит (Dacite). Тонкозернистый эквивалент кварцевого диорита.

Движение масс (Mass movement). Движение материала на поверхности Земли под действием силы тяжести.

Двууглекислая соль (Bicarbonate). Соль, содержащая металл и радикал HCO_3, например $Ca(HCO_3)_2$.

* **Деградация** (Degradation). Выравнивание и понижение земной поверхности путем эрозии.

Дельта (Delta). *Скопление осадков в месте впадения реки в водоем со спокойной водой, приводящее к выдвиганию вперед береговой линии.*

Денудация (Denudation). Удаление материала с поверхности Земли путем эрозии.

Депрессионная воронка (Cone of depression). Депрессия конической формы в зеркале подземных вод, образующаяся вокруг скважины или колодца при выкачивании из них воды.

Детрит (Detritus). Материал, образующийся при разрушении ранее существовавших пород.

Детритовый, обломочный (Detrital). Термин применяется для обозначения обломочных частиц, образовавшихся при разрушении ранее существовавших пород.

Дефляция (Deflation). Удаление тонкого обломочного материала ветром (выдувание).

Диабазовая структура (Diabasic). Термин применяется для обозначения структуры определенной категории магматических пород основного состава.

Диаспор (Diaspore). *Минерал, гидроокисел* алюминия.

Диастрофизм (Diastrophism). См. Тектонические движения.

Диатомит (Diatomaceous earth). *Кремнистый* осадок землистого вида, состоящий преимущественно из скелетов диатомовых водорослей.

Дивергентная граница (Divergent boundary). Граница литосферных плит, от которой две плиты расходятся – движутся в стороны друг от друга, в результате чего образуется новая кора.

Динамометаморфизм (Dynamic metamorphism). Изменение структуры и минерального состава пород под влиянием деформации.

Диорит (Diorite). Крупнозернистая магматическая порода, состоящая в основном из среднего плагиоклаза и железомагниевых минералов.

Дискордантное залегание (Discordance). Отсутствие параллельности в залегании смежных слоев или между слоистой толщей и прорывающей ее магматической интрузией.

Дифракция (Diffraction). Огибание волной препятствия. При изучении строения кристаллов с помощью рентгеновских лучей *дифракция вызывается электронами; получающаяся* дифракционная картина может быть использована для определения кристаллической структуры. Термин используется также для описания поведения волн в воде, огибающих препятствие, например волнорез или остров.

Дифракция рентгеновских лучей (X-ray diffraction). Рассеяние рентгеновских лучей *в кристаллах, позволяющее определять* кристаллическую структуру минералов.

Долинный шлейф (Valley train). Длинная узкая лента ледниковых осадков, накапливающихся ниже (по течению) конечной морены.

Доломит (Dolomite). Минерал, состоящий из сложного карбоната кальция и магния – $CaMg(CO_3)_2$. Также горная порода, по составу приближающаяся к минералу доломиту.

Донная морена (Ground moraine). Морена со сглаженным рельефом, состоящая преимущественно из несортированной валунной глины; накапливается в виде тонкой оболочки на поверхности коренных пород.

Донное противотечение (Undertow). Предполагаемый обратный сток воды в море, идущий ниже зоны действия волн.

Донный лед (Anchor ice). Лед, образующийся на дне реки.

Драйкантер (Dreikanter). Галька с тремя гранями (трехгранник), образующаяся в результате ее полировки песком, переносимым ветром.

Древовидная речная сеть (Dendritic drainage pattern). Ветвистая система притоков главной реки.

Древовидный, дендритовый (Dendrite). *Термин* применяется для обозначения ветвящейся системы, напоминающей ветви дерева.

Дресва (Grus). Осадок, состоящий из грубозернистого песка или мелкого гравия.

Друза (Druse). Скопление кристаллов, выполняющих полость в горной породе.

Друмлин (Drumlin). Небольшой сглаженный холм овальной формы, сложенный ледниковой валунной глиной, длинная ось которого вытянута в направлении движения ледника.

Дунит (Dunite). Магматическая или метаморфизованная магматическая порода, состоящая в основном из оливина, часто с небольшим количеством пироксена.

Дюна (Dune). Бугор навеянного ветром песка.

Железистый песчаник (Brownstone). Песчаник, зерна которого обволакиваются и цементируются окислами железа.

Железная шляпа (Gossan). Железистый остаточный материал, образующий поверхностную оболочку на сульфидных жилах.

Железомагниевый (Ferromagnesian). *Термин* применяется для обозначения темноцветных минералов и пород, содержащих железо и магний.

Жеода (Geode). *Полость в горной породе, обычно заполненная кристаллами различного состава, образовавшимися за счет материала окружающих пород.*

Жила (Vein). Трещина, заполненная мине-

ральным веществом, отложенным из растворов подземных вод.

Закон актуализма (Law of uniform change). Принцип, согласно которому изменения на Земле происходили медленно и под влиянием тех же самых процессов, которые мы наблюдаем сегодня.

Закон последовательности напластования (Law of superposition). Правило, утверждающее, что более молодые осадочные породы залегают выше более древних.

Западинная зандровая равнина (Pitted plain). Равнина, сложенная ледниковыми наносами, с многочисленными небольшими впадинами (западинами).

Затопленная долина (Drowned valley). Долина, низовья которой были затоплены морем и превратились в залив или эстуарий.

Землетрясение (Earthquage). Серия упругих волн в твердых оболочках Земли, возникающих в результате нарушения упругого равновесия; следствием является разрыв горных пород или их смещение по ранее существовавшим разрывам.

Земная кора (Crust). Твердые породы внешней части Земли от поверхности до глубины 5–40 км.

Зеркало грунтовых вод (Groundwater level, Water table). См. Уровень грунтовых вод.

Зеркало скольжения (Slickenside). Отполированная и покрытая штрихами поверхность, образующаяся благодаря трению вдоль плоскости разрыва.

* **Зигзагообразные гряды** (Zigzag ridges). Зигзагообразные в плане гряды или хребты, сложенные крепкими породами; образуются при эрозии групп чередующихся антиклиналей и синклиналей.

Знаки ряби (Ripple marks). Мелкие неровности, возникающие на поверхности неконсолидированного материала под воздействием волн и течений воды и ветра.

«Золото дураков» (Fool's gold). Минерал пирит – сульфид железа.

Зона аэрации (Zone of aeration). Часть грунта, в которой поровое пространство в водопроницаемых породах не заполнено водой. Зона, лежащая выше зоны насыщения.

Зона насыщения (Zone of saturation). Часть грунта, в которой все полости заполнены водой. Сверху зона насыщения ограничивается зеркалом грунтовых вод; на глубину простирается до тех пор, пока могут существовать сообщающиеся полости.

Зона пластичного течения (Zone of flowage). Часть ледника, оползня, а также недра Земли, где материал деформируется путем течения в твердом состоянии, а не путем разрыва.

Зона прибоя (Surf zone). Полоса между наиболее удаленной от берега границей прибоя и границей наката.

Зона раскалывания (Zone of fracture). Приповерхностный, внешний слой земной коры, в котором земная кора деформируется с образованием разрывов.

Зона субдукции (Subduction zone). Область, где одна литосферная плита погружается под другую у конвергентной границы плит.

Зональный минерал (Zoned mineral). Минерал, состав которого изменяется от внутренней части к краю в соответствии с теми изменениями физических и химических условий, которые происходили во время кристаллизации.

Зыбучий песок (Quicksand). Перенасыщенный водой и легко подвижный песок. На его поверхности не удерживаются тяжелые предметы.

Игнимбрит (Ignimbrite). Вулканическая магматическая порода, образующаяся при затвердевании потоков пепла и материала палящих туч.

Игольчатый (Acicular). Термин применяется для обозначения тонкой или игольчатой формы объектов.

Избирательное выветривание (Differential weathering). Неравномерное выветривание поверхности горных пород, обусловленное различиями в характере слагающих поверхность материалов. В результате избирательного выветривания возникают изолированные скалы-останцы, морские столбчатые утесы, гофрированные поверхности.

Известковистый (Calcareous). Содержащий то или иное количество карбоната кальция.

Известняк (Limestone). Осадочная порода, состоящая преимущественно из карбоната кальция.

Изгибание, коробление (Warping). Пологие изгибы земной коры, не приводящие к формированию отчетливо выраженных складок или разрывов.

Изогипса (Contour line). Линия, соединяющая точки с одинаковой величиной поднятия или опускания относительно определенного уровня, например уровня моря.

Изоклинальная складка (Isoclinal fold). Складка с параллельными крыльями.

Изоморфный (Isomorphous). Обладающий сходным строением или сходной формой кристаллов.

Изопахита (Isopach). Линия на геологических картах, соединяющая точки равной мощности геологической формации или стратиграфического подразделения.

Изосейста (Isoseismal). Воображаемая линия на поверхности Земли, соединяющая точки с одинаковым сейсмическим воздействием.

Изостазии теория (Isostasy, theory of). Гипотеза, согласно которой разные массы земной коры гравитационно уравновешены на определенной глубине внутри Земли.

Изотерма (Isotherm). Воображаемая линия, соединяющая точки с равной температурой.

Изотопы (Isotopes). Атомы одного и того же элемента, различающиеся атомным весом вследствие различий в строении ядер.

Изотропный (Isotropic). Обладающий одинаковыми физическими свойствами по всем направлениям.

Изохрона (Isochron). Линия, соединяющая точки одинакового геологического возраста.

Ил (Ooze). Тонкозернистые глубоководные осадки, содержащие более 30% остаточного органического материала.

Инверсия магнитного поля (Magnetic reversal). Инверсия (перемена) полярности магнитного поля Земли.

Инсоляция (Insolation). Воздействие солнечного тепла на горные породы, лежащие на поверхности, а также получаемая Землей солнечная радиация.

Интрузивная порода (Intrusive rock). Порода, образующаяся при застывании магмы ниже земной поверхности.

Инфильтрация (Infiltration). Просачивание воды в почву и горные породы по порам. Также отложение минерального вещества, растворенного в просачивающейся воде.

Ион (Ion). Атом или группа атомов, несущая электрический заряд.

Ионная связь (Ionic bond). Химическая связь, возникающая между двумя противоположно заряженными ионами, один из которых утратил свои электроны, а другой захватил добавочные электроны.

Ионосфера (Ionosphere). Самый верхний слой атмосферы, в котором происходит ионизация.

Исландский шпат (Iceland spar). Прозрачная разновидность кальцита, обладающая двупреломлением.

Истирание (Corrasion). См. корразия.

***Каличе** (Caliche). Пустынный обломочный материал, сцементированный заполняющим поры карбонатом кальция.

Кальдера (Caldera). Крупная вулканическая депрессия, поперечник которой намного превышает ее глубину, образовавшаяся в результате обрушения или взрыва.

Кальцит (Calcite). Минерал, карбонат кальция; главный породообразующий минерал известняков.

Кам (Kame). Холм конической формы, сложенный стратифицированными ледниковыми наносами, которые отлагались в виде аллювиального конуса выноса у внешнего края ледникового щита из потоков воды, стекающей с тающего льда.

Каменный глетчер (Rock glacier). Языковидная масса, состоящая из угловатых обломков, медленно стекающая с возвышенных расчлененных участков; течение облегчается благодаря льду, заключенному между обломками.

Каолинит (Kaolinite). Фарфоровая глина. Широко распространенный глинистый минерал, водный алюмосиликат. Глина, жирная на ощупь и пластичная во влажном состоянии.

Карбонат (Carbonate). Соль или минерал, содержащий радикал CO_3.

Карбонатизация (Carbonation). Химический процесс, идущий при выветривании, при котором происходит окисление оснований с образованием карбонатов.

Каровое озеро (Tarn). Небольшое горное озеро, расположенное в цирке.

Карстовая воронка (Sinkhole). Воронкообразная впадина на поверхности земли, возникающая при растворении таких пород, как соль, гипс или известняк, и обрушении кровли образующихся при этом полостей.

Карстовый рельеф (Karst topography). Расчлененный рельеф, состоящий из сети многочисленных коротких оврагов и промоин, заканчивающихся карстовыми воронками, возникшими в результате растворения известняковых слоев. (Название произошло от плато Карст в Югославии, расположенного к северо-востоку от северного побережья Адриатического моря.)

Катион (Cation). Ион, движущийся по направлению к катоду; положительно заряженный ион.

Катод (Cathode). Положительный полюс в электрическом элементе.

Квадратурный прилив (Neap tide). Прилив с минимальной разницей между высоким и низким положением.

Кварц (Quartz). Минерал, двуокись кремния; характерны шестигранные кристаллы, заканчивающиеся на концах пирамидами. Бесцветный или белый, если не содержит примесей, но обычны также окрашенные разности. Спайность отсутствует.

Кварцевый песчаник (Silica sand). Песчаник с высоким содержанием кварца (двуокиси кремния).

Кварцит (Quartzite). Кварцевый песчаник, полностью сцементированный кремнеземом, который в виде непрерывной в оптическом отношении массы обволакивает песчаные зерна.

Кислая порода (Acidic rock). Магматическая порода с содержанием двуокиси кремния более 66%.

Кластические осадки (Clastic sediments). См. Обломочные осадки.

Кливаж (Cleavage). Способность горных пород раскалываться по параллельным, близко расположенным плоскостям.

Ковалентная связь (Covalent bond). Химическая связь, при которой два связанных между собой атома сообща «владеют» общими для них электронами. Связь является направленной.

Кольцевая дайка (Ring dike). Дугообразная в плане дайка с крутыми стенками.

Комета (Comet). Небесное тело обычно небольшой массы, обращающееся вокруг Солнца по сильно вытянутой эллиптической орбите и состоящее из легких элементов.

Конвергентная граница (Convergent boundary). Граница плит, у которой две литосферные плиты движутся навстречу друг другу и сталкиваются.

Конгломерат (Conglomerate). Обломочная осадочная порода, состоящая из сцементированной гальки и валунов.

Конец ледника (Terminus). Окончание или внешний край ледника.

Конечная морена (Terminal moraine, End moraine). Расчлененная гряда или пояс несортированного моренного материала, маркирующего положение внешнего края ледника.

Конкреция (Concretion). Тело или стяжение различной формы с концентрическим строением, образующееся при отложении материала из раствора вокруг какого-нибудь ядра.

Консеквентная река (Consequent stream). Река, направление течения которой зависит от первоначального уклона и неровностей поверхности, на которой она заложилась.

Контактовый метаморфизм (Contact metamorphism). Изменение горных пород у контакта с магмой или лавой.

Континентальное подножие (Continental rise). Пологий скат, идущий от более крутого континентального склона к океанической абиссальной равнине.

Континентальный склон (Continental slope). Часть окраины континента, лежащая между континентальным шельфом и континентальным подножием.

Континентальный шельф (Continental shelf). Часть континента, погруженная ниже уровня моря. Континентальный шельф постепенно понижается от береговой линии к перегибу приблизительно на глубине 200 м, от которого начинается континентальный склон.

Конус в конусе (Cone-in-cone). Термин применяется для обозначения системы маленьких, входящих друг в друга концентрических конусов с морщинистой или рифленой поверхностью.

Конус выноса (Fan). Обломочный материал, отлагающийся в форме веера (в плане), как, например, аллювиальный конус выноса.

Конус разбрызгивания (Spatter cone). Невысокий бугор с крутыми склонами или маленький холм, состоящий из спекшихся брызг, выброшенных фонтанами лавы.

Коренная порода (Bedrock). Любая твердая порода, выходящая на поверхность или подстилающая почву, песок или иные виды наносов.

Корразия (Corrasion). Механическая эрозия, производимая текущей водой или другими агентами эрозии с использованием в качестве истирающего материала обломочных частиц горных пород.

Корреляция (Correlation). Установление идентичного геологического возраста и стратиграфического положения двух или более осадочных толщ в удаленных друг от друга районах.

Коррозия (Corrosion). Эрозия путем химического растворения.

Корунд (Corundum). Минерал гексагональной сингонии, Al_2O_3. Драгоценные разновидности – сапфир и рубин.

Коса (Spit). Узкий бар, который в виде песчаной гряды выдается от полуострова в море или озеро.

Косая слоистость (Cross-bedding). Текстура слоистых осадочных толщ, характеризующаяся параллельным расположением слоечков, пакеты которых залегают косо по отношению к главному направлению напластования.

Котловина выдувания (Blowout). Неглубокая блюдцеобразная выемка, образующаяся в результате ветровой эрозии в дюнах или других видах эоловых осадков.

Кратер (Crater). Воронкообразное углубление на вершине или склонах вулкана.

Кремень (Chert). Плотная тонкозернистая кремнистая порода, состоящая из кремнезема в форме халцедона. Флинт – одна из разновидностей кремня.

Кремнистый туф (Siliceous sinter). Гейзерит. Водная разновидность двуокиси кремния, осаждающаяся из воды горячих источников и гейзеров.

Крип (Creep). Медленное движение вниз по склону почвы и обломков горных пород.

Кристалл (Crystal). Твердое вещество с упорядоченным расположением атомов. Обычно

кристаллы ограничены плоскими поверхностями (гранями).

Крючковидная коса (Hook). Коса, имеющая форму крюка.

Ксенолит (Xenolith). Обломок горной породы, отчленившийся от стены или кровли магматической камеры и в виде включения сохранившийся в массе магматической породы.

Купол (Dome). Грубо симметричная выгнутая вверх (антиклинальная) складка, слои которой падают во все стороны от свода.

Куэста (Cuesta). Асимметричный хребет с одним длинным, пологим, ровным склоном, идущим по поверхности напластования пород, и другим, крутым склоном, выработанным поперек слоистости.

Лабрадор (Labradorite). Кальциевый плагиоклаз.

Лава (Lava). Жидкий материал горных пород, изливающийся из вулкана или трещины на поверхности Земли. Магма, поднимающаяся к поверхности.

Лавина (Avalanche). Большая масса снега или льда, срывающаяся с верхних склонов гор вниз.

Лавовый конус (Lava cone). Вулканический конус, образованный почти целиком потоками лавы.

Лавразия (Laurasia). Гипотетический суперконтинент, состоявший из континентальных масс северного полушария.

Лагуна (Lagoon, Backwater). Полоса спокойной воды между берегом и береговым баром.

Лакколит (Laccolith). Линзообразное интрузивное тело, приподнимающее в виде купола вышележащие слои осадочных пород и имеющее плоское, обычно горизонтальное днище.

Ламинарный поток (Laminar flow). Поток, в котором отсутствует турбулентное течение.

Лапилли (Lapilli). Вулканические выбросы в виде округлых кусков лавы размером от 4 до 32 мм в поперечнике.

Латерит (Laterite). Остаточный продукт выветривания в жарком влажном климате. Состоит из гидроокислов железа и алюминия. Залегает в виде пористой, имеющей конкреционное строение оболочки красного цвета на коренных породах.

Левосторонний сдвиг (Left-lateral fault). Сдвиг, при котором перемещение удаленного от наблюдателя крыла направлено против часовой стрелки (в левую сторону).

Ледниковый котел (Kettle). Впадина в ледниковых наносах, образовавшаяся в результате таяния массы ледникового льда, погребенного под наносами.

Ледниковая штриховка (Glacial striae). Штрихи, царапины, оставляемые ледником на гладкой поверхности горных пород.

Ледниковое молоко (Glacial milk). Талая вода ледников, окрашенная взвешенными в ней частицами глины и алеврита.

Ледниковые наносы, ледниковые отложения (Glacial drift). Материал, отложенный ледником.

Ледниковый покров, ледниковый щит (Ice sheet). Ледник, который в виде сплошного покрова покрывает большую территорию и движется в стороны от центра по многим направлениям.

Ледниковый стол (Glacier table). Большой камень или каменная глыба, поддерживаемые колонной льда на поверхности ледника.

Ледовая шапка (Icecap). Небольшой ледниковый покров.

Ледяной затор (Ice jam). Глыбы и обломки речного льда, закупоривающие русло реки в его узкой части.

Лежачая складка (Recumbent fold). Складка с горизонтальной или почти горизонтальной осевой плоскостью.

Лежачее крыло (Footwall). Масса горных пород, расположенных ниже плоскости разрыва.

Лежачий бок (Footwall). Масса горных пород, расположенных ниже жилы или рудной залежи.

Лёсс (Loess). Неслоистый алеврит желтоватого цвета, отлагаемый главным образом ветром. Состоит из свежих остроугольных частиц кварца, полевого шпата, кальцита и других минералов, смешанных с некоторым количеством глины.

Лигнит (Lignite). Низкосортный уголь коричневого цвета, по виду напоминающий древесину.

Лимонит (Limonite). Гидроокись железа коричневого цвета. Важная железная руда.

Линейность (Lineation). Наличие вытянутых линейных элементов в породе или на ее поверхности, которые могли возникнуть как во время деформации, так и до нее.

Липарит (Rhyolite). См. Риолит.

Листоватость (Foliation). Расслоенная текстура горных пород, образующаяся при метаморфизме. Листоватостью обладают кристаллические сланцы.

Литификация (Lithification). Сложная совокупность процессов, в результате которых неконсолидированные осадки превращаются в твердые породы.

Литоральная зона (Littoral zone). Зона, тянущаяся вдоль берега и заключенная между средними уровнями высокого и низкого приливов.

Литосфера (Lithosphere). Верхняя часть твердой Земли, расположенная над астеносферой и со-

стоящая из земной коры и верхней мантии.

Лополит (Lopolith). Крупная интрузия с дном, прогнутая в центральной части.

Магма (Magma). Горячий жидкий породообразующий материал, формирующийся внутри Земли и способный интрудировать (внедряться) на глубине или изливаться на поверхность. При остывании и затвердении магмы из нее образуются магматические породы.

Магматическая порода. (Igneous rock). Порода, образующаяся при остывании и затвердении горячего подвижного минерального материала, называемого магмой.

Магматическая дифференциация (Magmatic differentiation). Процесс, в ходе которого из первичного единого магматического расплава выделяются разные типы магматических пород.

Магматическая вода (Magmatic water). Вода, заключенная в магме или выделяющаяся из нее.

Магнезит (Magnesite). Минерал, карбонат магния.

Магнетит (Magnetite). Магнитный минерал черного цвета, окись железа. Важная железная руда.

Магнитосфера (Magnetosphere). Часть космического пространства, заполненная магнитным полем Земли.

Магнитуда (Magnitude). Единица измерения энергии землетрясений.

* **Маскег** (Muskeg). Болото, покрытое мхом.

Маттерхорн (Matterhorn). См. Пирамидальный пик.

Меандра (Meander). Петлевидный изгиб речного русла.

Мел (Chalk). Разновидность мягкого известняка, состоящего из раковин микроорганизмов.

Мельница ледниковая (Moulin). Круглое отверстие на поверхности ледника, в которое низвергается талая ледниковая вода.

* **Меридиональная пограничная линия, граница меридианного ряда тауншипов** (Range line). В системе Службы землеустройства США пограничная линия тауншипов, проходящая в меридиональном направлении.

Металлическая связь (Metallic bond). Химическая связь, возникающая между атомами, легко отдающими электроны. Ионы металлов заряжены положительно и связаны друг с другом свободными электронами.

Метаморфическая порода (Metamorphic rock). Порода, структура или состав которой подверглись изменению под влиянием тепла, давления или химически активных растворов.

Метеор (Meteor). Небольшой фрагмент межпланетного вещества, раскаленный вследствие трения при прохождении через атмосферу Земли. Метеоры часто называют падающими звездами.

Метеорит (Meteorite). Метеор, достигший земной поверхности прежде, чем тепло, возникающее в результате трения в атмосфере, смогло уничтожить его.

Метеорная вода (Meteoric water). Вода, содержащаяся в атмосфере или поступающая из атмосферы.

Метеорология (Meteorology). Наука, изучающая атмосферу.

Миграция пляжа (Beach drifting). Перемещение пляжных осадков вдоль берега.

Миллидарси (Millidarcy). Одна тысячная доля дарси. Единица измерения проницаемости.

Миндалекаменная порода (Amygdaloid). Порода с многочисленными миндалинами.

Миндалина (Amygdale). Газовая пустота или пузырек в вулканических породах, заполненные вторичными минералами.

Минерал (Mineral). Встречающееся в природе, однородное неорганическое кристаллическое вещество.

Многолетняя («вечная») мерзлота (Permafrost). Постоянно замороженная подпочва.

* **Монаднок** (Monadnock). Гора или скала, возвышающиеся посреди равнины как останец, сохранившийся после эрозии.

Моноклиналь (Monocline). Слоистая толща, падающая в одном направлении или смятая в виде ступенеобразного изгиба на фоне в целом горизонтального залегания.

Монцонит (Monzonite). Крупнозернистая магматическая порода с равным количеством ортоклаза и плагиоклаза.

Морена (Moraine). Ледниковые осадки (валунная глина), откладываемые непосредственно самим ледником.

Мрамор (Marble). Метаморфическая порода, состоящая в основном из зерен кальцита или доломита. Образуется в результате перекристаллизации известняков.

Мусковит (Muscovite). Слюда белого цвета; минерал из группы слюд.

Мыльный камень (Soapstone). Массивная, содержащая примеси разновидность талька.

Нагрузка (Load). См. Твердый сток.

Надвиг (Thrust fault). Разрыв, по которому висячее крыло перемещается вверх относительно лежачего крыла. Как правило, характеризуется пологим наклоном плоскости разрыва вплоть до горизонтального ее положения.

Накат (Swash). Накатывание воды прибойной волны на пляж.

Наклонение, магнитное наклонение (Inclination). Угол между горизонтальной поверхностью и направлением вектора магнитного поля Зе-

мли или вектора остаточной намагниченности горной породы.

Наложенная речная сеть (Superimposed drainage). Речная сеть, которая в результате размыва или удаления тех толщ, в которых она заложилась, переходит – накладывается на более древние подстилающие породы, обладающие другим строением.

Наносы (Overburden, Mantle rock). Верхняя часть разреза осадочной толщи или рыхлый материал, лежащий над коренными породами.

Нейтрон (Neutron). Элементарная частица, не несущая электрического заряда, с массой, приблизительно равной массе протона.

Непроницаемый (Impervious). Термин применяется для обозначения таких пород, как, например, глина, которые не пропускают растворы, нефть или природный газ.

Неритовая зона (Neritic zone). Область морского дна от линии отлива до глубины 120–180 м.

Несогласие (Unconformity, Nonconformity). Древняя эрозионная поверхность, отделяющая более молодые слои от более древних, а также от пород плутонического происхождения.

Нунатак (Nunatak). Вершины гор или выступы скал, возвышающиеся над поверхностью снежных и ледниковых полей.

Обезглавленная река (Beheaded stream). Нижняя часть реки, верховья которой перехвачены другой рекой.

Обломочные (кластические) осадки (Clastic sediments). Осадки, сложенные обломочным материалом ранее существовавших горных пород.

Обломочный материал (Debris). Материал, образующийся при дезинтеграции и разрушении горных пород.

Обнажение (Exposure, Outcrop). Выход горных пород на поверхность Земли.

Обсидиан (Obsidian). Вулканическое стекло. Характеризуется стеклянным блеском и раковистым изломом; по химическому составу обсидиан близок к риолитам и гранитам.

* **Ограненный отрог** (Faceted spur). Отрог хребта, срезанный эрозией или разрывом.

Одногранная галька (Einkanter). Галька с одной гранью, пришлифованной переносимым ветром песком.

Оз (Esker). Извилистая в плане гряда, сложенная неправильно слоистым песком и галькой; приурочена к области развития донной морены.

Озерный вал (Ice rampart). Гряда, сложенная песком, галькой и валунами, тянущаяся параллельно берегу озера. Образуется в результате наползания льда на низкий берег озера.

Окаменелости (Fossils). Остатки животных или растений или следы их жизнедеятельности, сохранившиеся в горных породах.

Окаменение (Petrifaction). Превращение органического вещества в камень.

Океанические течения (Ocean currents). Циркуляция океанической воды, не связанная с приливами; примерами могут служить Гольфстрим и экваториальные течения.

Окисление (Oxidation). Реакция соединения с кислородом.

Окремнение (Silicification). Замещение первоначально твердых частей животного или растения кремнеземом. Также пропитывание или замещение кремнеземом материала горных пород.

Оливин (Olivine). Породообразующий минерал зеленого цвета.

Омоложение (Rejuvenate). Процесс оживления эрозионной деятельности реки, например, вследствие поднятия.

Оникс (Onyx). Полосчатая разновидность скрытокристаллического кварца. Мексиканский оникс – прозрачный полосчатый кальцит.

Оолитовый (Oölite). Термин применяется для обозначения пород, состоящих из сферичесих зерен известкового материала песчаной размерности; реже зерна состоят из железистого, кремнистого или фосфатного материала; вещество оолитов отлагается концентрическими слоями вокруг ядра, чаще всего – зерен кварца.

Опал (Opal). Аморфная разновидность кремнезема, содержащего воду. Представляет собой твердый гель кремнезема.

Оползание (Slump). Один из механизмов гравитационного переноса в виде связного движения крупной массы материала по вогнутой вниз поверхности.

Оползень (Landslide). Масса земли или горных пород, соскальзывающая в виде единого массива вниз по склону.

Опробование (Assay). Исследование минерала или руды для установления содержания в них определенных компонент (в отличие от полного анализа).

Опускание (Subsidence). Опускание участка земной коры.

Орбита (Orbit). Траектория, по которой одно небесное тело вращается вокруг другого, например Луна вокруг Земли.

Орогенез (Orogeny). Процесс складкообразования и формирования разрывов, приводящий в итоге к формированию горных хребтов.

Ортоклаз (Orthoclase). Минерал из группы полевых шпатов, алюмосиликат калия. Один из основных породообразующих минералов в гранитах.

Осадконакопление (Sedimentation). Процесс накопления в виде осадка минерального и органического вещества.

Основная масса (Groundmass). Тонкозернистая или стекловатая масса (матрикс) магматических пород с порфировой структурой.

Основная порода (Basic rock). Магматическая порода, породообразующие минералы которой относительно бедны кремнеземом и богаты основаниями металлов, как, например, железомагниевые минералы.

Остаточная глина (Residual clay). Глинистый осадок, образующийся при выветривании горных пород и остающийся на месте.

Остаточная намагниченность (Remanent magnetism). Характеристика магнитного поля Земли, зафиксированная в ориентировке вектора намагниченности магнитных минералов в изучаемой породе.

Остаточный гравий (Lag gravel). Остаточный материал, состоящий из относительно грубых обломков, из которого ветром вынесены более тонкие частицы.

Остроконечная вершина («игла») (Needle). Резко выступающий, острый пик в горном рельефе; возникает в результате избирательной эрозии.

Осыпь (Talus). Скопление грубых обломков горных пород в основании скал.

Ось складки (Axis, Fold axis). Линия, маркирующая место перегиба складки, т. е. линия, проходящая вдоль гребня антиклинали или мульды синклинали.

Отвердение (Induration). Затвердевание осадка в ходе его уплотнения под влиянием давления, цементации или разогрева.

Отдельность (минералов) (Parting). Раскалывание кристаллов вдоль плоскостей, не являющихся настоящими плоскостями спайности.

Отдельность (горных пород) (Fracture cleavage). Система близко расположенных параллельных трещин, вдоль которых порода легко раскалывается.

Отламывание льда (Calving). Отламывание льда от конца плавающего ледника; откалывание огромных масс льда с образованием айсбергов.

Отражение (Reflection). Возвращение волны, наталкивающейся на препятствие.

Отрог (Spur). Небольшой хребет или гряда, отходящие от более крупного хребта или склона горы.

Отсеивание (Winnowing). Процесс отделения ветром тонких частиц от более крупных или более тяжелых.

Отслаивание, отчешуивание (Spalling, Exfoliation). Отслаивание пластин или чешуй от обнаженной поверхности горных пород; пластины и чешуи часто имеют изогнутую поверхность; иногда отслаивание происходит по концентрическим поверхностям.

Отступание ледника (Glacial retreat). Отодвигание фронтального края (конца) ледника.

Отторгнутая река (Dismembered river system). Затопленная долина реки, прежние притоки которой в результате этого получили прямой выход в море.

Очаг (землетрясения) (Focus). Центр, от которого при землетрясении распространяются сейсмические волны.

Падение (Dip). Угол, на который залегание слоя, жилы, дайки или силла отклоняется от горизонтального.

Паковый лед (Pack ice). Скопление плавающих льдин в виде неправильной формы гряд, покрывающих большую площадь.

Палеоботаника (Paleobotany). Наука, изучающая ископаемые растения.

Палеомагнетизм (Paleomagnetism). Наука, изучающая историю развития магнитного поля Земли и деформаций земной коры по остаточной намагниченности горных пород и осадков.

Палеонтология (Paleontology). Наука, объектом изучения которой является органическая жизнь прошлых геологических эпох.

Палящее облако (Nuée ardente). Вулканический выброс с большим содержанием газа, а также пирокластического материала.

Пангея (Pangaea). Гипотетический суперконтинент, объединявший все континентальные массы земного шара.

Паразитический конус (Parasitic cone). Шлаковый конус на склоне крупного вулкана.

Параллельное несогласие (Disconformity). См. Стратиграфическое несогласие.

Пассаты (Trade winds). Ветры, дующие из субтропических поясов высокого барического давления в направлении экватора.

Пахоехое (Pahoehoe). Потоки базальтовой лавы с волнистой или волокнистой поверхностью.

Пегматит (Pegmatite). Очень крупнозернистый гранит, встречающийся в виде даек. В некоторых пегматитах заключены редкие и драгоценные минералы.

* **Педальфер** (Pedalfer). Почва, образующаяся в районах с гумидным климатом, обогащенная алюминием и железом (алюможелезистая почва).

Педимент (Pediment). Полого наклоненная равнинная поверхность, образующаяся при эрозии у подножия крутых склонов или скал.

* **Педокал** (Pedocal). Почва, образующаяся в районах с аридным климатом, обогащенная кальцием (кальциевая почва).

Пелагический (Pelagic). Термин применяется для

обозначения свободно плавающих и переносимых водой морских организмов.

Пемза (Pumice). Пористая вулканическая пена со стекловатой структурой; плавает в воде.

Пенеплен (Peneplain). Поверхность суши, срезанная эрозией и превращенная в почти плоскую или слабоволнистую равнину.

Передовые дельтовые слои (Foreset beds). Наклонно залегающие слои речных осадков, накапливающиеся на фронтальном склоне дельты или переката в русле реки.

Перекристаллизация (Recrystallization). Образование новых минералов в горной породе при метаморфизме.

Перекрытие стратиграфическое (Overlap). Более широкое распространение вышележащей толщи осадочных пород, выходящей за пределы и перекрывающей края других, лежащих под нею толщ.

Перенос материала вдоль берега (Longshore drift). Перенос осадков течениями параллельно берегу.

Переслаивающийся (Intercalated). Термин применяется для обозначения материала, переслаивающегося с материалом другого типа.

Пересыпь (Tied island, Tombolo). Песчаный бар, соединяющий остров с сушей или другим островом.

Пересыхающая река (Intermittent stream). Река, в которой вода имеется лишь временами. Река, долина которой не врезается до уровня грунтовых вод.

Перехват (Piracy). Перехват верховьев одной реки другой рекой в результате попятной эрозии последней.

Перехваченные верховья (Diverted stream). Верховья реки, отчленившиеся в результате перехвата от обезглавленной реки и текущие в реку, осуществившую перехват.

Перидотит (Peridotite). Крупнозернистая магматическая порода ультраосновного состава, состоящая из оливина и пироксена.

Период полураспада (Half-life). Время, необходимое для распада половины количества радиоактивного элемента до его дочернего изотопа.

Перлит (Perlite). Вулканическое стекло с многочисленными концентрическими трещинками, образовавшимися в результате сжатия при остывании.

Песчаник (Sandstone). Осадочная порода, состоящая из сцементированных зерен минералов и обломков пород песчаной размерности.

Песчанистый (Arenaceous). Термин применяется для обозначения породы, содержащей песчаный материал.

Петрология (Petrology). Наука, изучающая горные породы.

Пидмонт (Piedmont). Область, лежащая у подножия гор. Примерами являются предгорные аллювиальные равнины.

Пиллоу-лава (Pillow lava). Лава с элипсовидной, подушечной текстурой. Особенно широко распространена в базальтовых потоках, изливающихся под водой.

Пирамидальный пик (Horn). Высокий пик в форме пирамиды с крутыми склонами, представляющими собой стенки ледниковых цирков. (Термин берет начало от горы Маттерхорн в Швейцарских Альпах.)

Пирит (Pyrite). Минерал латунно-желтого цвета, сульфид железа. Кристаллы кубической формы, часто со штриховкой. Народное название «золото дураков».

Пирокластический материал (Pyroclastic). Дезинтегрированный обломочный вулканический материал, выбрасываемый при вулканических взрывах.

Пироксенит (Pyroxenite). Крупнозернистая магматическая порода ультраосновного состава, состоящая из пироксена.

Пироксены (Pyroxenes). Группа железомагниевых минералов.

Плавающие льды (Floe ice). Плавающие куски (льдины) морского льда.

* **Плавающий валун** (Float). Кусок породы, отделенный от материнских пород (слоя или рудной жилы) в результате выветривания и эрозии.

Плагиоклазы (Plagioclase). Группа породообразующих минералов из семейства полевых шпатов.

* **Плайа** (Playa lake). Неглубокая пустынная впадина с плоским дном, заключающая пересыхающее озеро.

Пластическая деформация (Plastic deformation). Изменение формы твердого тела без его разрыва или разрушения.

Плитчатость (Fissile). Способность горной породы раскалываться на плитки по близко расположенным ослабленным плоскостям.

Плоскость напластования (Bedding). Плоская поверхность, разделяющая слои или пласты осадочных пород одного и того же или разного типа.

Плотность (Density). Отношение массы вещества к его объему.

Плутон (Pluton). Большая интрузия магматических пород, образовавшаяся ниже земной поверхности при остывании и консолидации магмы.

Плоскостная эрозия (Sheet erosion). Эрозия, производимая сплошным плащом стекающей по поверхности воды.

Пляжные выступы (Beach cusps). Пляжные осадки (песок, галька) в виде серии гряд с острыми концами, обращенными в сторону водоема.

Поверхности раздела (Discontinuities). Слои внутри Земли, где происходит резкое изменение скорости сейсмических волн, обусловленное изменением упругих свойств и плотности пород.

Поверхностная волна (Surface wave). Сейсмическая волна, движущаяся по поверхности Земли в противоположность внутренним волнам, которые распространяются внутри Земли (волны *P* и *S*).

Поверхностные дельтовые слои (Topset beds). Слои, отлагающиеся горизонтально на верхней поверхности дельты. См. также Передовые дельтовые слои и Придонные дельтовые слои.

Поверхностный сток (Runoff). Сток воды по рекам и другим потокам, текущим на поверхности.

Поверхность Мохоровичича (Mohorovičić discontinuity). Поверхность сейсмического раздела на границе земной коры и верхней мантии.

Поверхность скатывания (Slip face). Крутой склон на подветренной стороне песчаной дюны.

Подветренный (Leeward). Расположенный на стороне, противоположной той, откуда дует господствующий ветер.

Подвешенная вода (Vadose water). Подземная вода в зоне аэрации выше зоны насыщения.

Подводная гора (Seamount). Подводная гора, поднимающаяся со дна моря на высоту нескольких сотен фатомов.

Подгорная трещина (Bergschrund). См. Бергшрунд.

Подземные воды (Underground water). Вода, находящаяся в поровом пространстве наносов и коренных пород ниже поверхности Земли.

Подзол (Podsol). Сильно осветленная почва с низким содержанием железа и извести.

Подпитывание (Recharge). Пополнение запасов грунтовых вод естественным или искусственным введением воды с поверхности.

Подстилающая глина (Underclay). Пласт глины, залегающий под пластом угля. Представляет собой почву, на которой когда-то произрастали растения, послужившие материалом для образования угля.

Позитрон (Positron). Элементарная частица с размером и массой электрона, но с положительным зарядом.

Пойма (Floodplain). Часть речной долины, прилегающая к руслу, сложенная осадками, принесенными рекой во время паводков.

Покинутая долина (Wind gap). Понижение в горном хребте, связанное с некогда существовавшим здесь речным ущельем.

Полевые шпаты (Feldspars). Группа минералов, алюмосиликаты с калием, натрием и/или кальцием в качестве основных катионов.

Полосчатый (Banded). Текстурная особенность горных пород, заключающаяся в наличии тонких субпараллельных полос, различающихся минеральным составом, структурой или цветом.

Поперечная волна, *S*-волна (*S* wave). Сейсмическая волна, колебания в которой происходят перпендикулярно к направлению распространения волны.

Попятная эрозия (Headward erosion). Удлинение верховий долины за счет размыва водой, поступающей в ее истоках. Процесс наглядно иллюстрируется продвижением вверх по склону оврагов и промоин.

Пористость (Porosity). Величина пустого пространства в породе или почве, выраженная в процентах.

Поровая вода (Interstitial water). Вода, заключенная в порах между зернами породы.

Порода (Rock). См. Горная порода.

Порфировая структура (Porphyritic). Структура горных пород, в которых крупные фенокристаллы заключены в более тонкой основной массе.

Постоянная распада (Decay constant). Константа, связывающая скорость радиоактивного распада с числом атомов радиоактивного элемента. Знание постоянной распада необходимо для определения возраста материала методами изотопного датирования.

Почвенный профиль (Soil profile). Вертикальный разрез почвы от поверхности вниз через все ее горизонты вплоть до материнской породы.

Правосторонний сдвиг (Right-lateral fault). Сдвиг, в котором перемещение удаленного от наблюдателя крыла направлено по часовой стрелке (в правую сторону).

Предел упругости (Ejecta). Предел упругого поведения материала, после которого напряжение вызывает разрыв или пластичное течение.

Преломление (Refraction). Изменение направления движения волны при прохождении ею поверхности раздела.

Прибойная волна (Breaker). Волна, движение которой затормаживается на мелководье и которая разбивается у берега или вблизи берега.

Придонные дельтовые слои (Bottomset beds). Слои осадков в основании дельты.

Придонный твердый сток (Bed load). Часть общего твердого стока реки, перемещающаяся путем перекатывания или волочения по дну.

Прилив (Tide). Реакция крупных масс воды на гравитационное притяжение Луны и Солнца,

результатом чего является подъем и понижение водной поверхности.

Прирусловой вал (Natural levee). Удлиненная гряда аллювиальных осадков, образующаяся на берегу реки из материала, приносимого во время паводков и наводнений.

Приспособившаяся река (Adjusted stream). Река, текущая параллельно простиранию слоев горных пород.

Продольная волна, *P*-волна (*P* wave). Сейсмическая волна, для которой характерно движение импульса сжатия в направлении распространения волны.

Продольный профиль реки (Long profile). Профиль реки от верховьев до устья, показывающий изменение величины поднятия по всей длине реки.

Проницаемость (Permeability). Способность горных пород пропускать флюиды.

Просачивание (Seepage). Проникновение воды через отверстия в горных породах. См. также Фильтрация.

Простирание (Strike). Направление или азимут линии пересечения наклонно залегающего слоя, дайки или жилы с горизонтальной плоскостью. Простирание всегда перпендикулярно направлению падения.

Протон (Proton). Элементарная частица с единичным положительным зарядом.

Профиль равновесия (Base level). Базисная линия, ниже которой не может происходить дальнейшее врезание реки. Обладает пологим наклоном в сторону моря.

Псевдоморфоза (Pseudomorph). Ложная форма. Минерал, обладающий кристаллической формой другого, замещенного им минерала.

Пузырек (Vesicle). Маленькая полость в тонкозернистых или стекловатых магматических породах, образовавшаяся в виде пузырька газа во время застывания лавы.

Пустая порода (Gangue). Не представляющий ценности минеральный материал, ассоциирующийся с рудными минералами рудной залежи.

Пустыня (Desert). Область с малым количеством атмосферных осадков и скудной растительностью.

Равновесное состояние (Equilibrium). Такое состояние системы, когда она находится в равновесии и в ней со временем не происходит изменений.

Радиоактивность (Radioactivity). Радиоактивный распад. Естественный распад структуры атома, в результате которого один атом превращается в другой путем испускания из ядра заряженных частиц.

Радиоляриевый ил (Radiolarian ooze). Кремнистый ил, сложенный скелетами радиолярий, накапливающимися на дне глубоководных областей океана.

Разветвленная река (Braided stream). Река, разделенная многочисленными валами и грядами песка на сложную систему расходящихся и снова сливающихся русел.

Разрыв (Fault). Трещина в горных породах, по которой происходит смещение.

Разрыв со смещением по падению (Dip-slip fault). Разрыв, смещение по которому происходит в основном в направлении падения. Примерами являются сброс, взброс, надвиг.

Разрывное течение (Rip current). Течение, направленное в сторону моря, возвращающее воду, пригнанную к берегу волнами.

Раковина (Test). Внешняя твердая оболочка (внешний, наружный скелет) многих мелких беспозвоночных.

Раковистый излом (Conchoidal fracture). Изогнутая, напоминающая раковину поверхность, образующаяся при расколе хрупких минералов и горных пород, таких, например, как кварц и вулканическое стекло.

Ракушечник (Coquina). Разновидность известняка, сложенного преимущественно крупными обломками раковин.

Расход воды (Discharge). Объем воды, проходящий в единицу времени через поперечное сечение потока.

Расщепление атома (Fission). Ядерная реакция, в ходе которой атом с большим атомным весом расщепляется на два атома приблизительно равного веса.

Реакционные ряды Боуэна (Bowen's reaction series). Последовательность выделения минералов из магмы при ее дифференциации и кристаллизации. Минералы, выделившиеся раньше, имеют тенденцию вступать в реакцию с остывающей магмой, что приводит к образованию более поздних минералов ряда.

Реакция ядерного синтеза (Fusion). Ядерная реакция, при которой в итоге слияния элементов с небольшим атомным весом образуются более тяжелые элементы.

Региональный метаморфизм (Regional metamorphism). Происходящая в широком масштабе перекристаллизация горных пород без прогрева от конкретных магматических источников.

Реголит (Regolith). Слой из рыхлой массы минералов и обломков горных пород, залегающий над консолидированными коренными породами.

Регрессивная эрозия (Headward erosion). См. Попятная эрозия.

Регрессивное прилегание (Offlap). Соотношение слоев, образующееся при отступании береговой линии в сторону моря; при этом

область отложения все более молодых слоев последовательно сдвигается в сторону моря.

Реликтовая вода (Connate water). Вода, сохранившаяся в порах породы со времени отложения осадка.

Рефракция (Refraction). См. Преломление.

Решетчатая речная сеть (Trellised drainage). Речная сеть, ориентированная параллельно глубоко эродированным, смятым в складки слоям; напоминает систему садовых шпалер.

Риасовый берег (Ria shoreline). Берег, образующийся при частичном затоплении суши, рассеченной многочисленными речными долинами.

Риолит (Rhyolite). Тонкозернистый эквивалент гранита.

Рифтовая долина (Rift valley). Вытянутая долина, образовавшаяся в результате опускания блока земной коры между двумя параллельными разрывами. Рифтовые долины называют также грабенами.

Рифовый атолл (Reef atoll). Кольцеобразный коралловый риф, окаймляющий пространство, заполненное водой. См. также Атолл.

Роговик (Hornfels). Плотная метаморфическая порода с хорошо выраженным зернистым строением. Образуется при контактовом метаморфизме при температуре выше 600°С.

Родник (Spring). Струя грунтовых вод, выходящая на поверхность через естественное отверстие в месте пересечения зеркала грунтовых вод с земной поверхностью.

Россыпь (Placer deposit). Аллювиальные осадки, содержащие частицы или самородки золота, платины, олова и других устойчивых ценных минералов, высвобождающихся при выветривании горных пород или жил.

Руда (Ore). Минеральный материал, из которого с выгодой могут быть извлечены металлы или неметаллические компоненты.

Рукав реки (Distributary). Ветвь реки, которая отходит от реки и не соединяется с ней снова. Особенно характерны для дельт.

Сальтация (Saltation). Подпрыгивание. Процесс, при котором частица подхватывается турбулентным потоком воздуха и перемещается вперед скачками.

Саманная глина (Adobe). Глинисто-алевритовые (суглинистые) осадки пустынных котловин на юго-западе Северной Америки; используются для изготовления кирпича, который сушат на солнце.

Самоизливающаяся скважина (Flowing well). Скважина, из которой вода или нефть выливается на поверхность без выкачивания насосами. Жидкость поднимается к поверхности за счет гидростатического давления.

Самородный (Native). Термин применяется для обозначения элементов, встречающихся в природе в элементарной форме (а не в виде соединений); самородными чаще всего бывают металлы, как, например, серебро или медь.

Сброс (Normal fault). Разрыв, по которому висячее крыло перемещается вниз относительно лежачего крыла.

Сбросовый уступ (Fault scarp). Уступ в рельефе, образовавшийся в результате смещения по разрыву.

Сдвиг (Strike-slip fault). Разрыв со смещением в основном вдоль простирания плоскости разрыва.

Седловина (Col). Понижение на водоразделе, например перевал через горный хребет.

Сейсмическая волна (Seismic wave). Упругая деформация на поверхности Земли или в ее внутренних частях, распространяющаяся с высокой скоростью.

Сейсмограф (Seismograph). Прибор для обнаружения и записи сейсмических волн.

Сейсмология (Seismology). Наука, изучающая землетрясения.

Сейша (Seiche wave). Колебательная волна на поверхности озера, вызванная землетрясением.

Сель (Mudflow). Один из механизмов гравитационного переноса, осуществляемого в виде быстрого течения полужидкой массы грязи и более крупных обломков.

Серпентин (Serpentine). Породообразующий минерал, силикат магния.

Сиаль (Sial). Мощный слой пород земной коры, подстилающий континентальные площади. Термин является производным от первых букв слов «*си*ликон» (кремний) и «*ал*юминиум» (алюминий) и относится к породам, относительно богатым кремнеземом.

Сидерит (Siderite). Минерал, карбонат железа.

Сиенит (Syenite). Крупнозернистая магматическая порода, состоящая преимущественно из ортоклаза и роговой обманки или биотита.

Сизигийный прилив (Spring tide). Прилив, достигающий наиболее высокой и наиболее низкой отметок относительно среднего положения уровня моря.

Сила землетрясения (Intensity). Величина, используемая для измерения ущерба, причиняемого землетрясениями.

Силл (Sill). Интрузия магматических пород, залегающая параллельно слоям тех пород, которые она прорывает.

Сима (Sima). Слой основного состава; под океанами он служит внешней оболочкой Земли, на континентах залегает под слоем сиаля. Термин является производным от

первых букв слов «*си*ликон» (кремний) и «*ма*гнезиум» (магний).

Симметричная складка (Symmetrical fold). Складка, осевая плоскость которой располагается вертикально или почти вертикально, а крылья имеют одинаковую длину и одинаковый наклон.

Синклиналь (Syncline). Складка, выгнутая вниз; слои на крыльях наклонены в ней внутрь – к оси складки, древние породы находятся на крыльях, а более молодые – в ядре. Противопоставляется антиклинали.

Синклинорий (Synclinorium). Крупная региональная структура синклинального строения, осложненная более мелкими складками.

Система трещин (Joint system). Совокупность двух или более пересекающихся трещин, которые могут обладать характерным закономерным расположением.

Складка (Fold). Результат пластической деформации первоначально плоских толщ горных пород, которые сминаются с образованием изгибов или флексур.

Складчатость (Orogeny). См. Орогенез.

Склонение (Declination). Угол между направлением на магнитный полюс и направлением на географический полюс (полюс вращения) Земли.

Сланец (Schist). Метаморфическая порода со сланцеватой текстурой. Видное место в сланцах принадлежит слюдистым минералам.

Слияние рек (Confluence). Место соединения двух рек с образованием одной реки.

Слой (Stratum). Единичный слой или пласт осадочных пород независимо от его мощности.

Слой низких скоростей (Low-velocity zone). Ослабленная зона, иначе называемая астеносферой, характеризующаяся понижением скорости поперечных сейсмических волн (*S*-волн).

Слюда (Mica). Представитель многочисленного семейства слоистых водных алюмосиликатов с пластинчатой текстурой; слюды могут быть как акцессорными (дополнительными), так и основными минералами в магматических и метаморфических породах.

Смещение полюсов (Polar wander). Изменение положения магнитных полюсов Земли; данные об изменении могут быть получены в результате изучения остаточной намагниченности горных пород.

Согласное (залегание) (Conformable). Термин применяется для описания ненарушенной последовательности слоев, параллельно залегающих друг на друге.

Соленость (Salinity). Величина для измерения полной концентрации растворенных в воде твердых веществ.

Солифлюкция (Solifluction). Один из механизмов гравитационного переноса, осуществляемого в виде медленного течения насыщенного водой реголита по замерзшему грунту.

Сольфатара (Solfatara). Вулканическая трещина, из которой выделяются водяной пар и сернистые газы.

Соляной купол (Salt dome). Куполообразная подземная структура, возникающая в результате подъема сквозь окружающие породы соляного тела грубо цилиндрической формы.

Спайность (Cleavage). Тенденция минералов раскалываться с образованием гладких поверхностей, расположенных параллельно потенциально возможным граням кристалла.

Спекулярит (Specularite). Кристаллический гематит (окись железа), встречающийся в виде дискообразных кристаллов с металлическим блеском.

Сплющенный сфероид (Oblate spheroid). Сфероид, уплощенный или вдавленный у полюсов. Земля имеет форму сплющенного сфероида.

Спрединг океанического дна (Sea-floor spreading). Модель развития Земли, согласно которой океаническое дно разрастается благодаря поступлению нового материала в срединно-океанических хребтах.

Срединная морена (Medial moraine). Вал ледниковых наносов, образующийся в результате слияния боковых морен двух соединяющихся долинных ледников.

Срединно-океанический хребет (Mid-ocean ridge). Крупная положительная форма рельефа океанического дна, характеризующаяся непрерывной сейсмической активностью.

Средняя порода (Intermediate rock). Магматическая порода, которая по своему составу является промежуточной между кислой и основной породами. Содержит от 52 до 66% кремнезема.

Стадиальная морена отступающего ледника (Recessional moraine). Скопление ледниковых наносов в виде гряд, тянущихся от внешнего края или конца ледника до места его максимального продвижения.

Сталагмит (Stalagmite). Конусообразный столб натечного материала, растущий от пола пещеры вверх. Сталактиты и сталагмиты часто смыкаются, образуя колонны, идущие от пола до потолка пещеры.

Сталактит (Stalactite). Натечное образование, свисающее с потолка пещеры наподобие сосульки.

Старица (Oxbow lake). Озеро в форме полумесяца, образовавшееся в бывшей излучине, покинутой рекой после прорыва шейки меандры.

Стекловатая структура (Vitreous). Аморфная, некристаллическая структура.

Стеклянный блеск (Vitreous). Блеск, похожий на блеск разбитого стекла.

Столбчатая отдельность (Columnar jointing). Вертикальная трещиноватость в магматических породах, возникающая при сокращении объема материала в ходе его остывания. Ограниченные трещинами колонны или столбы часто имеют гексагональное сечение.

* **Столбчатый утес** (Stack). Изолированный крутостенный скалистый массив, имеющий вид маленького островка, расположенного в море перед береговым уступом или перед выступающим в море мысом.

Столовая гора (Mesa). Низкая гора или горный массив с плоской вершиной, по крайней мере с одной стороны ограниченный крутым уступом.

Стратиграфическое несогласие (Disconformity). Несогласие, разделяющее параллельно лежащие слои.

Стратиграфия (Stratigraphy). Наука, занимающаяся изучением последовательности стратифицированных толщ горных пород и их корреляцией.

Стратификация (Stratification). Залегание осадков и осадочных пород в виде слоев, пластов, толщ.

Стратовулкан (Stratovolcano). Крупный вулканический конус, сложенный чередующимися слоями лавы и пирокластического материала и, следовательно, стратифицированный.

Стратосфера (Stratosphere). Постоянно холодная и сухая область атмосферы, начинающаяся на высоте около 10 км над уровнем моря.

Структура (Structure). Взаимоотношение составных частей вещества, будь то ионы в минерале или породы и более крупные элементы в Земле.

Структура (Texture). Характер геометрического соотношения минералов в горных породах.

Структурный грунт (Patterned ground). См. Узорчатый грунт.

Сублимировать, сублимация (Sublimate). Отложение твердого вещества из пара или газа.

Субсеквентная река (Subsequent stream). Река, которая прокладывает свое русло, приспосабливаясь к тектонически ослабленным зонам.

Сулой (Rip current). См. Разрывное течение.

Тайфун (Typhoon). Циклон в западных тропических областях Тихого океана.

Таконит (Taconite). Железисто-кремнистая порода зернистого строения, в которой в меняющемся количестве содержатся магнетит, гематит, сидерит и водные силикаты железа. В районе озера Верхнего разрабатывается как железная руда.

Тальк (Talk). Очень мягкий минерал, жирный или мыльный на ощупь. Силикат магния.

Твердость (Hardness). Сопротивление минералов и пород абразии (истиранию) или царапанью.

Твердый сток (Load). Количество материала (нагрузка), транспортируемого водой, ветром или ледником.

Твердый сток волочения (Traction load). См. Придонный твердый сток.

Текстура (Structure). Взаимоотношение составных компонент, слагающих горную породу.

* **Тектоген** (Tectogene). Обширный прогиб в пределах геосинклинали под орогенным поясом.

Тектоника плит (Plate tectonics). Модель Земли, объясняющая особенности современного и прошлого состояния этой планеты движением литосферных плит по ее поверхности.

Тектоническая глинка (Gouge). Материал горных пород, раздробленный и перетертый между крыльями разрыва.

Тектонические движения (Diastrophism). Вся совокупность движений земной коры, приводящих к вертикальным или горизонтальным перемещениям и деформации горных пород.

Тектонический блок (Fault block). Блок горных пород, ограниченный разрывами.

Тектонический покров (Nappe). Крупное тело горных пород, перемещенное на большое расстояние от своего первоначального положения в результате надвигания или образования лежачих складок.

Тепловой поток (Heat flow). Поток тепла, идущий из недр Земли и передающийся путем теплопроводности, конвекции и излучения; измеряется в единицах теплового потока [10^{-6} кал/(см^2 · с)].

Теплый фронт (Warm front). Граница между массами более холодного воздуха и продвигающимся вперед и поднимающимся над ним теплым воздухом.

Термоклин (Thermocline). Поверхность (как правило, горизонтальная), разделяющая массы воды с разной температурой в озере или океане.

Терраса (Terrace). Плоская горизонтальная или близкая к горизонтальной поверхность, ограниченная крутым уступом. Может быть сложена аллювием или коренными породами.

Тиллит (Tillite). Порода, сложенная затвердев-

шей и сцементированной валунной (моренной) глиной.

Тонкая слоистость (Lamination). Слоистость в неконсолидированных осадках и осадочных породах с мощностью отдельных слойков менее 1 см.

Торф (Peat). Губчатый темно-коричневый остаточный материал, образующийся при частичном разложении растительного вещества в болотах.

Торфяное болото (Bog). Болото или увлажненный участок, покрытый торфом.

Травертин (Travertine). Пористая или ячеистая разновидность карбоната кальция, отлагающаяся из поверхностных или подземных вод. Накапливается также в форме сталактитов и сталагмитов в подземных пещерах.

Трансформный разрыв (Transform fault). Разрыв с перемещением по простиранию, вдоль которого происходит движение одной литосферной плиты относительно другой.

Трахит (Trachyte). Тонкозернистый эквивалент сиенита.

Трещина (Joint, Fissure). Разрывное тектоническое нарушение в горных породах без признаков перемещения.

Трещина (ледниковая) (Crevasse). Широкая и глубокая трещина в леднике.

Тройное сочленение (Triple junction). Место соприкосновения одновременно трех литосферных плит.

Тундра (Tundra). Безлесная равнина или заболоченная территория арктических областей, в основном в районах вечной мерзлоты.

Турбидитное течение (Turbidity current). Течение, обусловленное разной плотностью чистой воды и воды, насыщенной взвешенным глинисто-алевритовым материалом.

Турбулентный поток (Turbulent flow). Поток с беспорядочным, непредсказуемым движением воды.

Туф вулканический (Tuff). Консолидированный вулканический пепел. Размер обломочных частиц в основном меньше 4 мм в поперечнике.

Туф (Tufa). Пористый осадок, выделяющийся из воды источников и состоящий из карбоната кальция или кремнезема.

Углеводород (Hydrocarbon). Вещество, состоящее из углерода и водорода, как, например, нефть.

Углерод-14 (Carbon 14). Радиоактивный изотоп углерода с атомным весом 14. Используется для определения возраста углеродсодержащих материалов моложе 38 000 лет.

Углеродистый (Carbonaceous). В значительной степени состоящий из углерода.

Угол естественного откоса (Repose, angle of). Угол склона, при котором данный осадочный материал может удерживаться на склоне, не перемещаясь вниз.

Угол падения (Dip). См. Падение.

Удельный вес (Specific gravity). Отношение массы тела к массе такого же объема воды при температуре 4°С.

Узорчатый грунт (Patterned ground). Поверхность грунта с характерным узором в виде многоугольников, кругов или полос, которые образуются в неконсолидированном материале, подвергающемся продолжительному и интенсивному воздействию мороза.

Уклон (Gradient). Любое отклонение от горизонтального положения.

Ультраосновная (ультрабазитовая, ультрамафическая) порода (Ultramafic). Порода, сложенная в основном темноцветными минералами, такими, как оливин и пироксен.

Уплотнение (Compaction). Уменьшение объема осадка под действием веса вышележащих слоев.

Упругое восстановление (Elastic rebound). Упругое возвращение пород после разрыва в то первоначальное положение, которое они занимали до деформации.

Ураган (Hurricane). Циклонический ветер огромной силы в областях низкого атмосферного давления.

Уранинит (Uraninite). Минерал, в основном окись урана. Урановая руда.

Уровень (зеркало) грунтовых вод (Groundwater level, Water table). Верхняя граница зоны насыщения, т. е. верхняя поверхность зоны, ниже которой полости в горных породах заполнены водой.

Уровень (зеркало) подвешенных грунтовых вод (Perched water table). Грунтовая вода, расположенная над региональным уровнем (зеркалом) грунтовых вод и отделенная от него водонепроницаемыми породами.

Усеченный отрог (Truncated spur). Резко обрезанный или круто оканчивающийся водораздельный отрог, разделяющий притоки ледниковой долины, образовавшийся в результате расширения главной долины за счет эрозионной деятельности ледника.

Устье (Débouchure). Устье реки. Также место выхода на поверхность подземной реки, например, из пещеры.

Усыхание (Desiccation). Испарение воды из неконсолидированного осадка, сопровождающееся его уплотнением и сокращением объема. В ходе этого процесса могут развиваться трещины растяжения.

Ущелье (Narrows, Water gap). Узкая, с крутыми стенами, часть широкой долины. Теснина, образующаяся там, где река, текущая по наклонно залегающим или смятым

в складки породам, прорезает более крепкие слои.

Фазовое изменение (Phase change). Изменение минеральной структуры, вызываемое изменением температуры или давления.

* **Фанеритовая порода** (Phaneritic). Магматическая порода с крупнокристаллической структурой.

Фация (Facies). Особенности горных пород, отражающие обстановку их формирования.

Фельзит (Felsite). Тонкозернистая магматическая порода светлого цвета.

Фенокристалл (Phenocryst). Относительно крупный и резко выделяющийся кристалл, окруженный значительно более мелкозернистой массой, в магматической породе с порфировой структурой.

Фестонный бар (Cuspate bar). Бар серповидной формы, причлененный одним концом к берегу.

Физическое выветривание (Physical weathering). Механическая дезинтеграция пород во время выветривания.

Филлит (Phyllite). Сланцеватая метаморфическая порода с мелкими кристалликами слюды, благодаря которым поверхности сланцеватости обладают шелковистым блеском.

Фирн (Firn, Névé). Уплотненный зернистый снег.

Флинт (Flint). Крепкая тонкозернистая разновидность кремнезема. Имеет раковистый излом. Обычно встречается в виде желваков в известняках.

Флювиальный (Fluvial). Термин применяется по отношению к процессам, связанным с деятельностью рек.

Флювиогляциальные осадки (Outwash). Стратифицированные осадки, осаждающиеся из талых ледниковых вод за пределами самого ледника.

Флюорит (Fluorite). Минерал, фтористый кальций; руда фтора.

Фокус (Focus). См. Очаг (землетрясения).

Фосфатная порода (Phosphate rock). Осадочная порода с желваками и неправильной формы конкрециями фосфата кальция.

Фреатические воды (Unconfined groundwater). Незамкнутые грунтовые воды, т.е. воды, не ограниченные сверху водонепроницаемыми горными породами, в которых, следовательно, устанавливается естественное водное зеркало.

Фуллерова земля (Fuller's earth). Тонкий глиноподобный землистый отбеливающий материал, обладающий способностью обесцвечивать нефть и жиры.

Фумарола (Fumarole). Жерло в районах вулканической деятельности, из которого выделяется дым.

Фьорд (Fiord). Открывающийся в море конец ледниковой долины с крутыми стенами, частично затопленной морем.

Химическое выветривание (Decomposition). Разрушение минералов и горных пород путем их химического разложения.

Хлорид (Chloride). Соединение хлора с положительно заряженным элементом.

Хлориты (Chlorite). Сложная группа слоистых, темно-зеленых водных магниевых алюмосиликатов, содержащих железо.

Холодный фронт (Cold front). Край продвигающихся вперед холодных масс воздуха, которые, наподобие клина, проникают ниже слоя теплого воздуха. Этот процесс обычно сопровождается подъемом атмосферного давления и понижением температуры.

Хрупкость (Brittle). Свойство материала, заставляющее его при деформации ломаться, а не испытывать пластичное течение.

Цементация (Cementation). Отложение минералов вокруг зерен горной породы путем осаждения из растворов. Обычные цементирующие минералы – кварц, карбонаты, окислы железа.

Цеолит (Zeolite). Вторичный минерал, встречающийся в пустотах лавовых потоков.

Циклон (Cyclone). Область низкого атмосферного давления, вокруг которой ветры дуют в направлении против часовой стрелки в северном полушарии и по часовой стрелке в южном полушарии. Может вызывать выпадение атмосферных осадков.

Цирк (Cirque). Крутостенная короткая котлообразная выемка в верхней части высокогорной долины, выпаханная ледником или образовавшаяся под действием морозного выветривания.

Цокольная терраса (Rock terrace). Терраса, образованная не в аллювии, а в коренных породах. Более крепкие горизонтально лежащие слои в склонах долины размываются медленнее, чем породы, залегающие над ними.

Цунами (Seismic sea wave, Tsunami). Длиннопериодная волна, возникающая при землетрясениях в море. Часто ошибочно называется приливной волной.

Черные пески (Black sands). Пески с повышенной концентрацией тяжелых темноцветных минералов, обусловленной действием волн и течений. Обычные минералы – магнетит, ильменит, турмалин, рутил, роговая обманка.

Черта (Streak). Цвет минерала в порошке.

Шаровое (сфероидальное) выветривание (Spheroidal weathering). Образование округлых остаточных валунов при химическом выветривании горных пород по трещинам.

Шлак вулканический (Scoria). Вулканическое стекло с характерным пузырчатым строением, которое образуется при расширении газов и сохраняется в породе.

Шлаковые частицы (Cinders). Частицы вулканического стекла, по размеру соответствующие гальке и крупному песку.

Шлаковый конус (Cinder cone). Вулканический конус, сложенный частицами шлака, имеющими размер гальки и крупного песка.

Шток (Stock). Интрузивное тело с площадью поперечного сечения меньше 100 км^2, с крутыми стенками, без днища.

Штриховка (Striae). Маленькие углубления или царапины на поверхности разрыва или пород, по которым двигался ледник.

Щит (Shied). Глубоко эродированный (размытый) участок земной поверхности, который в течение длительного времени оставался стабильным и поэтому был пенепленизирован и выгнут вверх наподобие щита.

Щитовой вулкан (Shield volcano). Вулканический конус с пологими склонами, образованный в основном перекрывающими друг друга и линзовидно переслаивающимися потоками лавы базальтового состава, как это наблюдается на Гавайях.

Эвапорит (Evaporite). Осадок, отлагающийся из раствора в результате интенсивного испарения растворителя.

Эвстатический (Eustatic). Термин относится к повышениям и понижениям уровня Мирового океана, связанным с таянием или увеличением ледников материкового оледенения.

Эклиптика (Ecliptic). Плоскость, в которой лежит орбита вращения Земли вокруг Солнца.

Эклогит (Eclogite). Порода, по химическому составу эквивалентная базальту, но сложенная ассоциацией более плотных минералов – граната и пироксена.

Экструзивная порода (Extrusive). Магматическая порода, образующаяся в результате излияния магмы на поверхность Земли.

Электрон (Electron). Элементарная отрицательно заряженная частица, вращающаяся вокруг ядра атома.

Элемент (Element). Вещество, которое не может быть разложено на другие вещества обычными химическими способами.

Эманации (Emanations). Пары и газы, выделяющиеся из магмы.

Эоловый (Eolian). Относящийся к ветру, сформированный ветром или отложенный ветром.

Эпейрогенические движения (Epeirogenic movements). Поднятие и опускание участков суши, по размеру соизмеримых с континентами без складчатости или с незначительной складчатостью.

Эпиконтинентальное море (Epicontinental sea). Мелкое море, располагающееся на континентальном массиве.

Эпицентр (Epicenter). Площадь на земной поверхности, расположенная непосредственно над очагом землетрясения.

Эрозионное расчленение (Dissection). Эрозионная деятельность на приподнятых площадях с плоским рельефом, в результате которой здесь образуется расчлененный рельеф с холмами, долинами и глубокими ущельями.

Эрозионный цикл (Cycle of erosion). Последовательность событий, приводящих к редукции рельефа от стадии юного рельефа к его выравниванию в ходе нормального процесса эрозии.

Эрратический валун (Erratic). Крупный обломок горной породы, чуждый тем коренным породам, на которых он находится; большинство эрратических валунов приносится ледниками.

Эскарп (Escarpment, Scarp). Крутой уступ или обрыв, разделяющий участки с пологим наклоном земной поверхности.

Эстуарий (Estuary). Часть речной долины, затапливаемая приливной волной тех водных бассейнов, куда впадает река.

Эффект Кариолиса (Cariolis effect). Сила, возникающая под влиянием вращения Земли и заставляющая предметы или потоки, движущиеся по поверхности Земли, отклоняться от своего пути.

Эффузивная порода (Effusive). Магматическая порода, образующаяся из лавы, излившейся или выброшенной на поверхность Земли.

Ядро (Centrosphere). Центральное существенно металлическое ядро Земли.

Янтарь (Amber). Окаменевшая смола ископаемых хвойных деревьев.

Яшма (Jasper). Разновидность очень тонкозернистого кварца, от красного до темно-коричневого цвета.

In situ. В своем естественном положении или на первоначальном месте.

ПРЕДМЕТНЫЙ УКАЗАТЕЛЬ

Аа-лава 102
Абиссальные красные глины 140
– равнины 333
Абляция 303
Абразия 250, 251, 253, 348
Австралийская плита 483, 488
Австрало-Антарктический хребет 484, 488
Аградация 14
Адиронддакский купол 388, 462
Адриатическая плита 489
Азиатская плита 441
Азорское плато 475
Актуализма принцип 12, 18
Акустическое зондирование 328
Алевролиты 118, 125
Алеутский желоб 484, 488
Аллювиальные конусы 280
Альпы, складчатая система 460
Аляскинское землетрясение 424, 426, 427
Американская плита 402
Анатолийский разрыв 489
Ангидрит 129
Андезиты 106, 112
Анды, складчатая система 460
Антарктическая плита 482, 483, 489
Антиклиналь 384–386
– асимметричная 385
– *опрокинутая* 385
– симметричная 385
Антильская островная дуга 474
– складчатая система 461
Антрацит 163
Аппалачская геосинклиналь 462, 463
– складчатая система 460–464, 474
Аравийская плита 403, 482, 489
Аравийско-Индийский хребет (хребет Карлсберг) 336, 489
Аргиллиты 118, 125
Аристарх, лунный кратер 28
Аркозы (аркозовые песчаники) 124
Ассамское землетрясение 424
Ассимиляция 113, 114
Астеносфера 17, 440
Астероиды 33

Астроблемы («звездные раны») 35
Атлас, складчатая система 460
Атмосфера 13, 168–171
– слои 169–171
Атмосферное давление 172
– тепло 171, 172
Атмосферные осадки 175
Атоллы 334, 335
Атомный вес 41
– номер 41
Атомы 40
– строение 41
Африканская плита 482, 483, 489
Африканско-Антарктический хребет 336, 489
Аха, зона разлома 447

Багамская котловина 474
Базальты 106, 112
Базис эрозии 256, 257
– – местный (временный) 256
– – общий (постоянный) 256
Байкальский рифт 488
Бараньи лбы 311
Бартлетт, желоб 461
Барханы 374
Бары 356
– барьерные 356
– петлевидные 355
– устья бухты 355
Батиальная зона 339
Батолиты 83–86
– образование 85
– размер 84
– состав 85
– структурные соотношения 85
– форма 84
Бедленды 270, 271
Бентонит 121
Беньоффа зона 17, 408, 440, 473
Бергшрунд 302, 303
Береговые (волноприбойные) уступы (клифы) 350
Береговые хребты США, складчатая система 460
Бермудское плато 474
Бикментаун, доломиты 144
Биосфера 14
Бискайская абиссальная равнина 475
Бисмарк, дуга 484
– плита 488
Битуминозные песчаники 503
Блейк, плато 474
– уступ 474
Блэк-Хилс, купол 388
Большой Водораздельный хребет, складчатая система 460
Бонвилл, соляные равнины 129
Бонин, островная дуга 413
Боуэна реакционный принцип 112
Брантона горный компас 384
Бревард, пояс метаморфических пород 462
Брекчии 118, 123, 124
Брюнес, эпоха полярности 446
Бухты 351

Вандерваальсова связь 53
Великая дайка 83
– рифтовая долина 402
Венера 25, 26, 32
Верджин, антиклиналь 387
Ветры господствующие 174
– меньшего масштаба 174
Вещество, определение 40
– строение 40–44
Вода грунтовая 223
– – замерзшая 296
– – подвешенная 223
– магматическая (ювенильная) 219, 220
– метеорная (атмосферная) 219
– морская, освещенность 339
– – растворенные газы 338
– – соленость 336–338
– – температура 338
– – физические и химические свойства 336–339
– погребенная 219, 220
– подземная, происхождение 219, 220
Водобойные колодцы 274
– котлы 274
Водоносный горизонт, определение 221
Водопады 271
Водораздел 248
Водосборный бассейн 248
Воздух, состав 169, 170
– формы движения 173, 174
– – – ветер 173
– – – воздушные потоки 173
Возраст горных пород абсолютный 69–75
– – – относительный 68
Волноприбойные ниши 350
Восточно-Африканская рифтовая система 489
Восточно-Тихоокеанское поднятие 336, 410, 451, 482, 486, 489
Впадины выдувания 365, 366
Вуда–Ноймана шкала интенсивности землетрясений 418
Вулканизм, определение 80
Вулканическая пемза 100
Вулканические бомбы 112
Вулканический пепел 112
– шлак 100, 108, 112
Вулканы 86–97
– кратеры и кальдеры 86, 87
– размещение 87, 88
– типы 86
– промежуточного типа 86
– – эксплозивные (взрывные) 86
– – эффузивные 86
Выветривание главных типов пород 193, 194
– избирательное 191–193
– определение 182
– термин 14
– физическое (дезинтеграция) 182–187
– химическое 182, 187–190

Габбро 107, 112
Гавайский хребет 484
Галактика Млечного Пути 20, 21
Галапагосская зона разлома 336
– рифтовая зона 486
Галапагосское поднятие 336
Галит 129
Гарлок, разрыв 410

Гаттерас, абиссальные равнины 474
– каньон 474
Гаусс, эпоха полярности 446
Гватемальское землетрясение 424
Гвинейское течение 341
Гейзеры 242, 243
– разноцветные грязевые 242
Гематит 128
Геосинклиналь, определение 463
– стадии развития 464–466
Геосинклинальная теория развития складчатых систем 460–468
Геосфера 14
Гигинус, лунный кратер 29
Гидравлический клин 348
Гидравлическое выпахивание 250, 251, 346
Гидрологический цикл 177, 178
Гидростатическое давление 224
Гидросфера 13, 14
Гидроэнергия 505
Гийоты 333, 334
Гилберт, эпоха полярности 446
Гималаи, складчатая система 460
Гипабиссальные интрузии 82, 83
Гипс 129
Глауконитовые (зеленые) песчаники 125
Глинка трения 396
Глобигериновые илы 139, 140
Глубоководные желба 335
– илы 131
Глыбовые горы 402
Гнейсы инъекционные
– *первичные* 162
Гольфстрим 341
Гондвана 468
Горда, плита 488
Горная мука 310
Горнблендиты 107
Горст, определение 402
Горячие точки 452
Грабен, определение 402
Гравелиты 123
Гравитационное разделение 113, 114
Гравитационный перенос 201–218
– – скорость перемещения материала 203, 204
– – способы перемещения материала 204
Градация, процесс 14
Гранитизация 85
Граниты 106, 112
Гранодиориты 107, 112
Граувакки (граувакковые песчаники) 125
График изохрон 74
Гряды 270, 272
Грязевые потоки альпийского типа 208, 209
– – лахары 209
– – пустынного типа 209
– – сели 208–210
Гудзон, каньон 474
Гумус 195
Гурпи, формация 465
Гутенберга раздел 438

Дайки 82
Дациты 112
Деградация, процесс 14
Дезинтеграция зерен 186
Дельты 277–280
Деформация горных пород 379–383
– – – определение 379, 380
– – – пластическая 380
– – – упругая 380
– – – хрупкая 380
Деформированные породы, залегание 383, 384
Диастрофизм (тектонические движения) 381
Диатомит 130
Диатомовые илы 139
Дивергенция плит 473
Динамометаморфизм
Диориты 107, 112
Дифрактометр 55
Дифракция сейсмических волн 437
Долины висячие 311
– затопленные 290
– формирование 260, 261
Доломититы 127
Доломиты 127
Дрейф континентов 468–472
– – палеоклиматы 470, 471
– – палеомагнитные данные 472
– – палеонтологические данные 471, 472
– – совмещение краев континентов 468–470
Друмлины 314, 315
Дуниты 107, 112
Дюны 370–377
– высота и форма 374, 375
– копьевидные 372, 374
– миграция 371
– подветренные 374
– *поперечные* 374, 375
– продольные 374
– сложные 374, 375

Евразиатская плита 482, 483, 489

Жеоды 146
Жесткость, определение 380

Закон первичного горизонтального залегания слоев 141
– *последовательности напластования 68*
– фаунистической (флористической) последовательности 68
Залегание (положение) слоя 383, 384
– слоя несогласное 148
– – согласное 148
Зандровые равнины 316
– – западинные 316
Землетрясения, географическое распределение 413
– интенсивность 415
– исходная причина 413
– меры защиты 431, 432
– определение 407
– повторяемость и прогноз 414
– последствия 415, 416
– причины и распределение 408
– связь с вулканизмом 412
– фокус 422, 423
– частота 414
– эпицентр 422, 423
Земля как планета 20, 25–27
– – – движение 25

– – – масса 25
––– объем 25, 27
– – – плотность 25, 27
Земная кора 14, 441, 438, 442
– – континентальная 441
– – океаническая 441
– – химический состав 53
Земное ядро 438
– – внешнее 438
– – внутреннее 438
Зеркало грунтовых вод 223
– скольжения 396
Знаки ряби 143, 375
– – асимметричные 143
– – симметричные 143
Зоны аккумуляции снега и льда 301

Иберийская абиссальная равнина 575
Игнимбриты 108
Идзу-Бонинский желоб 484
Избирательная сортировка 253
Известковый туф 126, 127
Известняки 126
Изгиб слоев 384
Излучение 45
Изоморфные смеси 64, 65
Изосейсты, определение 418
Изостатическое равновесие 453–456
Икар, астероид 33
Императорские подводные горы 452, 453, 482, 484
Импириал-Валли, землетрясение 421
Инверсии магнитного поля Земли 446–450
Индийская плита 441
Индо-Австралийская плита 482
Инфильтрация 224
Ионная связь 51, 53
Ионы 43
Иранская плита 489
Истечение газа (дегазация) 113, 114

Кайман, желоб 474
Калий-аргоновый метод 74
Калифорнийское землетрясение 412, 428
Кальдера 87
Каменные гирлянды 297
– круги 297
– многоугольники 297, 298
– мосты 275, 350
– полосы 297, 298
Камнепады 212
Камчатская островная дуга 413
Камы 317
Канадский щит 391, 462
«Канал» Святого Лаврентия 474
Карибская плита 424, 425, 482, 489
Карст 235, 236
Карстовые воронки 231
Каэна, эпизод полярности 446
Келвин, подводные горы 474
Кергелен, подводный хребет 336
Китовый, подводный хребет 336
Кларион, зона разлома 336, 461
Климат 178–180
– классификация 179
Клиппертон, зона разлома 336
Клифы 350
Ковалентная связь 50, 51
Когоутека комета 33
Кокос, плита 482, 486, 489
Колумбийское землетрясение 424
Кометы 33
Конвекция 45
Конвергенция плит 473
Конгломераты 118, 123, 124
Конкордантные возрасты 72
Конкордия (кривая распада) 72
Конкреции 146
Континентальное подножие 332
Континентальный склон 331
– шельф 330, 331
Коперник, лунный кратер 28
Кордильерская геосинклиналь 463
– складчатая система 461
Корнера поднятие 474
Корни гор 441
Корразия 369
Косы 353
– крючковидные 355
Котити, эпизод полярности 446
Котловины выдувания 375
Коэффициент проницаемости 225
Кратер вулкана 87
Кремни 129
– морские 129
Кресент-Пикс, подводные горы 474
Крип (ползучесть) 204–208, 398
Кристалл, определение 56
Кристаллическая решетка 54
– структура минералов 56
Кристаллографические сингонии 56, 59
Кристаллы-двойники 58
Куйама, разрыв 410
Купола 384, 387–389
– соляные 388
Курильская островная дуга 413
Курильский желоб 484, 488
Куэсты 270
Кюри температура (точка) 444

Лабрадорское течение 341
Лава 81, 101
– определение 65
– текстурные особенности 102
Лавразия 468
Лаврентийский щит 474
Лакколиты 82
Лапилли 97, 112
Лауэ метод 54, 55
Лахары 209
Лед морской 295
– озерный 294
– паковый 296
– речной 296
Ледники 301–310
– горные (альпийские, долинные) 306
– движение 301, 302
– покровные (материковые, ледниковые щиты, покровы) 206
– рельеф поверхности 302–306
– типы 306–310
Ледниковая эрозия 310–313

Ледниковое выпахивание 313
– осадконакопление 323–317
Ледниковые долины 311
– котловины 316
– озера временные 317–320
– осадки слоистые 316
– отложения 135, 313
– цирки 311
Ледяное поле 299, 300
Ледяные торосы 296
Лёйк, горячие источники 237
Лёсс 370, 371
– основные свойства 370
– происхождение 370
Лимонит 128
Линия нулевого склонения 443
Лиссабонское землетрясение 430
Листоватость
Литл-Дом, антиклиналь 15
Литоральная (приливно-отливная зона) 136, 339
Литосфера 17, 440
Ложе океана 332, 333
Лорд-Хау, хребет 484
Луна 27–32
– недра 32
– общая характеристика 27
– особенности поверхности 27–30
– – – борозды (рилли) 27
– – – кратеры 27
– – – лучи 27, 30
– – – морщинистые гряды 27, 30
– – – моря 27
– – – цепочки кратеров 27, 30
– отличия от Земли 30
Льюис, тектонический покров 401

Магма 81
– источники тепла 81
– определение 65
– подъем 81, 82
Магматизм интрузивный (плутонизм) 82–86
– определение 15
– эффузивный (вулканизм) 86
Магматическая дифференциация 113
Магматическое обрушение 85
Магнетизм 443–450
Магнитное поле Земли, происхождение 443
Магнитные аномалии 447–450
– – полосовые 447, 448
Магнитосфера 13
Мадейрская абиссальная равнина 475
Мадисон, оползень-обвал 212, 214, 215
Маккуори, хребет 488
Малоазиатская плита 489
Маммот, эпизод полярности 446
Манагуаское землетрясение 425, 426
Мантия Земли 14, 438–440
– – верхняя 439
– – нижняя 439, 440
– – переходная зона 439, 440
Марианская островная дуга 413
Марианский желоб 328, 484, 488
Маркус-Неккер, хребет 484
Марри, зона разлома 336, 447, 461
Марс 25, 26, 32, 33
Масконы 29, 30
Матуяма, эпоха полярности 446
Мафический (базальтовый, габбровый) слой 441
Меандры врезанные 289, 290
– формирование 265, 266
Мезосфера 169
Мексиканский желоб 488
Мексиканского залива геосинклиналь 463
Мел 126
Меланезии поднятие 336
Мендосино, зона разлома 336, 447, 476
Мергель 126, 127
Меркалли шкала интенсивности землетрясений 415
Меркурий 25, 26
Метакристаллы (профиробласты)
Металлическая связь 50
Метаморфизм гидротермальный 153
– контактовый 153, 154
– определение 15, 151
– причины 152
– структурные, текстурные и минералогические изменения
– термальный 153
– типы 153
Метаморфические фации 163–166
– – амфиболитовая 164, 165
– – гранулитовая 164, 165
– – зеленосланцевая 164, 165
– – условия образования 165
– – фация голубых сланцев 164, 165
– – цеолитовая 163, 165
– – эклогитовая 164, 165
Метеориты 33–35
Метеоры 34
Метод вращения монокристалла 55
– датирования по следам распада 74, 75
– порошка 55
Механизм движения плит 487–490
Мигматиты 161
Мидуэй, атолл 452
Микросейсмы 424
Милониты
Минералы 49–64
– кристаллическая структура 54
– определение 50
– постоянство состава 54
– происхождение 65
– физические свойства 61–64
– – – блеск 67
– – – вкус 63
– – – габитус 63
– – – запах 63
– – – излом 61
– – – магнитность 63
– – – ощущение на ощупь 63
– – – прочность 63
– – – растворимость 63
– – – спайность 61
– – – твердость 61
– – – удельный вес 63
– – – цвет 61, 63
– – – – черты 63
– химические связи 50–53
– – соединения 53

Миогеосинклиналь, определение 464
Мичиганская впадина 389, 391
Многолетняя мерзлота 297, 298
Модуль упругости (упругость), определение 380
Молекулы 43
Молокаи, зона разлома 336, 447
Монаднок 288
Морена боковая 314
– донная (основная) 313, 314
– конечная 313, 314
– срединная 314
Моренная (валунная) глина 313
Морозное вспучивание 296
– расклинивание 296
Морские арки 350
– утесы 350, 351
Мотагуа, разрыв 425
Мотер-Лод, рудоносный разрыв 410
Мохоровичича раздел 438, 442
Мутьевые (турбидитные) потоки 285

Наклонение 443
Наска, плита 17, 482, 483, 486, 489
Натеки 237
Нашвилл, купол 388
Невé 299
Некки 82
Нептун 25, 26
Нерис, абиссальная равнина 474
Неритовая зона 339
Несогласие, определение 148
– параллельное (стратиграфическое) 148
– угловое 148
Нефть 495–500
– запасы 499
– использование 499
– коллекторы 496, 497
– ловушки 497, 498
– материнские породы 496
– миграция 497
– нефтеносные районы 498
– происхождение 496
– состав 495, 496
Нефтяные (горючие) сланцы 503
Новогебридский желоб 484, 488
Нунивак, эпизод полярности 446

Обвалы (обломочные лавины) 210
Обсидиан 101, 105, 112
Обстановки осадконакопления 134, 135
Овраги 247, 248
Озарк, купол 388
Озерный вал 294, 295
Озы 317
Окаменелости 145
Океанические бассейны 326–329
– желоба и зоны субдукции 484, 485
– течения глубинные 342
– – поверхностные 341, 342
Олдуваи, эпизод полярности 446
Оледенение, причины 322-324
Олимп, марсианский вулкан 33
Опаловые террасы 237
Оползание подводное 216, 217
Оползни 210
Оползни-обвалы 212–216
Оранжевый грунт (лунный) 30
Орогенические (горообразовательные) движения 18, 466
Ортокварциты (кварцевые песчаники) 124
Осадки батиальные 138
– береговые 353–357
– – морфологические типы 353
– болот 136
– глубоководные 139, 140
– дельтовые 137
– континентальные 134–136
– лагун 137
– марганцовистые 128
– мелководные (неритовые) 137
– морские 137–140
– – классификация 138
– обломочные (кластические) 122–125
– озерные 136
– определение 117
– перекристаллизация 134
– пещер 136
– пляжей 136
– прибрежной зоны 136, 137
– пустынь 135
– речные 135
– средних глубин 138, 139
– терригенные 119
– уплотнение 134
– цементация 134
– эстуариевые 137
Осадочные породы, определение 117
Осадочный материал, источники 119–121
– – происхождение 118, 119, 121
– – – внеземное 121
– – – вулканическое 119, 121
– – – магматическое 121
– – – органическое 119
– – типы 121, 122
Осаждение кристаллов 113
Останцы 270
Островов Зеленого Мыса плато 475
Отделение несмешивающихся фракций 113
Отложение (осадконакопление), термин 14
Отложения источников 236
– пещер 237
Отмели 281
Оуэнс-Валли, прогиб 410

Пайн-Маунтин, разрыв 462
Пайонир, зона разлома 336, 447
Палау, желоб 484
– островная дуга 413
Палмдейл, поднятие 415
Пальцевидное замещение 68
Палящие тучи 94
Пангея 468
Парниковый эффект 32
Пахоэхоэ, лавы 102
Пелагическая зона 339, 340
Пемза 108
Пенеплен 288
Пенни, ледниковый щит 307
Перенос ветром 365–370
Пересыпь 355
Перехват реки 263, 264

Перидотиты 107, 112
Период, определение 77
Перлит 101
Перуанско-Чилийский желоб 484, 489
Песчаники 118, 124, 125
Песчаные волны (гигантские знаки ряби) 143
Пещеры 234
Пирит 128
Пироксениты 107, 112
Письменный гранит 108
Плавучие льдины 296
Планеты 25, 26
Платобазальты 98
Плеохроичные ореолы 75
Плоскость разрыва 394
Плотность Земли 442
Плутон 25, 26
Пляжи 353, 354
Подводные каньоны 331
Подземные воды, движение 224–227
– – запасы 227–231
– – зональность 221–224
– – зона аэрации 221, 222
– – – – – капиллярная оболочка 221, 222
– – – – – промежуточная подзона 221, 222
– – – – – – подзона увлажнения почвы 221, 222
– – – – насыщения 221, 223
– – отложение осадков 236–240
– – термальные 240–244
– – эрозионная деятельность 231
Поймы 281, 282
Полезные ископаемые неметаллические 514, 515
– – определение 494
Полосчатость течения 111, 162
Полочик, разрыв 425
Пористость горных пород 220
Пороги 271
Породы коренные, определение 182
– магматические 65, 104
– – кислые 105
– – классификация 112
– – основные 105
– – промежуточного состава 105
– – структуры 105–109
– – – крупнозернистая 106
– – – миндалекаменная 108
– – – пегматоидная 107, 108
– – – пирокластическая 108, 109
– – – порфировая 107
– – – стекловатая 105
– – – тонкозернистая 105
– – текстуры 109–111
– – ультраосновные 105
– метаморфические 65
– – несланцеватые 162, 163
– – размер зерен и реликтовые текстуры
– – разновидности
– – сланцеватые
– осадочные 65
– – вторичные текстурные особенности 146, 147
– – классификация 118
– – консолидация и диагенез 133, 134
– – органогенные 130–132
– – первичные тескгуры 140–145
– – распространение различных типов 134
– – стратиграфические соотношения 147, 148
– – структуры 132, 133
– – хемогенные 126–129
– – цвет 133
– пирокластические 102
– фосфатные 128
Почва 195–199
– определение 182
– плодородие 197
– почвенный профиль 195
– составные части 195
– факторы, влияющие на образование 196
Предгорные аллювиальные равнины 281
Преломление сейсмических волн 437
Приливы 36, 37
– квадратурные 37
– сизигийные 37
Принц, лунный кратер 30
Природные ресурсы минеральные 495
– – энергетические 495
Прирусловая отмель 265, 267
Прирусловой вал (естественная дамба) 281, 282
Провинция бассейнов и хребтов 402, 441
Проницаемость горных пород 220
Прочность, определение 380
– на растяжение 380
– – сжатие 380
Птолемей, лунный кратер 29
Пустая порода, определение 506
Пустынная мостовая 366
Пуэрто-Рико, желоб 474

Радиоактивные изотопы 69, 70
Радиоактивный распад 44, 69, 70
Радиоуглеродный метод 70, 71
Разрывы 393, 398–400
– взброс 398, 399
– надвиг 398, 399
– с вращением 399
– сброс 398, 399
– сбросо-сдвиг 399
– сдвиг 399
Раф-Крик – Кентукки-Ривер, зона 462
Реакционный ряд 112, 113
Реголит (лунный грунт) 30, 182
Рейкьянес, хребет 448, 480, 489
Реки антецедентные 261, 262
– выровненные 255
– инфлюентные 226
– как динамические системы 255
– консеквентные 261, 262
– механизм работы 249, 250
– омоложенные 289
– перенос материала 251–255
– пересыхающие 261
– постоянные 260
– субсеквентные 261, 262
– типа «язу» 282
– эпигенетические (наложенные) 261
– эфлюентные 225
Речная сеть 264–270
– – древовидная 264
– – угловатая 264
Рилли 27

Риолиты (липариты) 106, 112
Рифовые отложения 131, 132
Родники 226, 227
Рику, желоб 484
Рифтовые долины 264, 265
Рихтера шкала магнитуд 423, 424
Роколл, поднятие 475
Рубидий-стронциевый метод 74
Руда, определение 506
Рудный минерал, определение 506
Руды, генетические типы 506–508
– дистанционные методы исследования 513, 514
– сульфидные, вторичное (гипергенное) обогащение 511
Русла разветвленные 268, 269
– характерные особенности 259, 260
Русловой аллювий 281

Сальтация 365
Сайла, зона разлома 447
Сан-Агустин, разрыв 425
Сан-Андреас, разрыв 16, 17, 398, 400, 410, 411, 429, 488
Санта-Инес, разрыв 410
Сан-Фернандо, землетрясение 411, 417
Сан-Хуан, каньон 290
Сарвак, формация 465
Сатурн 25, 26
Сбросовые уступы 396, 397
Свинцово-свинцовый (изотопно-свинцовый) метод 71
Северное Экваториальное течение 341
Северо-Американская плита 411, 424, 482, 483, 489
Северо-Атлантическое течение 341
Седна, зона разлома 447
Сейсмическая тень 437, 438
Сейсмические волны 421–423
– – поверхностные (L-волны) 421
– – поперечные (S-волны) 421
– – продольные (P-волны) 421
Сейсмограмма 420
Сейсмографы 419–421
Сели 208
Сераки 303
Сервейор, зона разлома 447
Серпентиниты 162
Сиалический (гранитный) слой 441
Сидерит 128
Сикамор, каньон 417
Сила тяжести 453–456
– – аномалии 453
– – измерение 453
Силлы 82
Синклиналь 384, 386
– асимметричная 385
– симметричная 385
Система, определение 77
– трещин, определение 393
Скалистые горы, складчатая система 460
Складки 384–386
– асимметричные 386
– дифференцированного уплотнения 389
– изоклинальные 385, 386
– лежачие 385
– ныряющие (с наклонным шарниром) 386
– опрокинутые 386
– симметричные 386
Складчатые системы 389
Склонение 443
Склоновый сток 247
Скотта подводный хребет 336
Скрипс, каньон 332
Сланцеватость (кливаж)
Сланцеватые глины 118, 125
Сланцы глинистые (аспидные)
– кристаллические
Слоистость 140, 141
– градационная 142
– косая 141
– линзовидная 142
Слой пониженных скоростей 440
Снег 299, 300
Снеговая линия 299
Снежное поле 299
Снежные лавины 212
Снейк-Ривер, лавовое плато 454
Солнечная система 22, 23, 26
Солнечный ветер 24
Солнце 23–25
– возраст 24
– солнечная энергия 23
Соломонова плита 488
Сольфатары 104
Сом, абиссальная равнина 474
Спекшиеся туфы (игнимбриты) 108
Спрединг (разрастание океанического дна) 17, 473, 475–482
– доказательства 480–481
– характер процесса 479, 480
Средиземноморско-Трансазиатский пояс 413
Срединно-Атлантический хребет 17, 89, 90, 336, 448, 478–480, 489
Срединно-Индийский хребет 336
Срединно-океанические хребты 478, 483, 484
Сталагмиты 237, 238
Сталактиты 237–239
Старица 265, 266
Стилолиты 146
Стокса закон 251
Столбчатая отдельность 109, 392
Столкновение плит 486
Столовые горы 270
Стратиграфическая колонка, определение 75
Стратосфера 169, 170
Структура кристаллическая 132
– обломочная 132
– оолитовая 132, 133
Структурные впадины 384, 389
Субдукции зона 17, 473
Суико, подводная гора 453
Сулой 346
Сфероидальное выветривание 186, 187
Сьерра-Мадре, разрыв 410, 411
Сьерра-Невада, батолит 84

Тальковая порода (жировик, мыльный камень) 163
Тарбур, формация 465
Тектиты 121
Тектогенез (тектонические движения) 15, 18

Тектоника плит 17, 473–478, 482–487
– – границы плит 485
– – и полезные ископаемые 512, 513
–– океанические желоба и зоны субдукции 484
––– и континентальные плиты 482, 483
–– срединно-океанические хребты 483, 484
– – столкновения плит 486
– – трансформные разрывы 485, 486
Тектоническая брекчия 396, 397
Тектонические движения 381, 382
– – орогенические 382
– – эпейрогенические 382
Теория упругой отдачи 411
Тепловой поток 450–453
– – измерение 450
– – источники тепла 450
– – передача тепла 451
– – температура на глубине 451
Теплопроводность 45
Термосфера 169
Террасы 283, 284
– волнонамывные 356
– волноприбойные 351
– непарные (нециклические) 284
– парные (циклические) 283, 284
– цокольные 283
Теснина (ущелье) 261
Течение грунта 208
– ламинарное 249
– турбулентное 249
Тиллит 321
Тихо, лунный кратер 29
Тихоокеанская плита 482, 483, 486, 488
Томболо 355
Тонга–Кермадек, желоб 484, 488
Торий-свинцовый метод 71
Торф 130
Торфяные круги 297
Травертин 127, 237
Трансформные границы 473
– разрывы 410, 485, 486
Трахиты 106
Трещинные извержения взрывного типа 99
– излияния 98, 99
Трещины 390. 392, 393
– отдельности 392
– разгрузки 393
– растяжения 392
– усыхания 142, 143
Тритий 70
Тропосфера 169, 170
Турбидитные течения 332

Уайт-Вулф, зона разрыва 410, 417
Углеводородные газы 500
Уголь 130, 501–503
– классы и теплотворная способность 501
– применение 502
– распространение 501
– способы добычи 502
Уичито, складчатая система 461
Уошито, складчатая система 460, 461
Уплотненные глины 125
Уран 25, 26
Уран-свинцовый метод 71
Усеченные (ограниченные) отроги 311

Фациальные изменения 68
– переходы 147
Фации, определение 147
Фенокристаллы (фенокристы) 107
Фиджи, плита 488
Филиппинская плита 482, 488
Филиппинский желоб 484
Филлиты
Фильтрация 224
Фильтрующее выжимание 113
Фильхнера шельфовый ледник 307
Финдли, свод 462
Фирн 299
Флексуры 384, 385
Флоридское течение 341
Флотация (всплывание кристаллов) 113
Флювиогляциальные осадки 313
Фосфатные конкреции 128
Фосфория, формация 128
Фракционная кристаллизация 113
Фреатические взрывы 99
Фумаролы 104

Халемаумау, лавовое озеро 91, 93, 94
Харамильо, эпизод полярности 446
Харбингер, лунные горы 30
Хейуорд, разрыв 410
Хесс, гийот 334
Химические соединения 43
– элементы 42, 43
Хокотан, разрыв 425
Хорайзн, гийот 331, 333
Хормузская соль 465
Хрупкое дробление 380

Центральноамериканский–Мексиканский желоб 484
Циркумтихоокеанский пояс 413
Цунами 340, 430

Чилийское землетрясение 424, 427, 428
– поднятие 336, 489

Шелушение 185
Шкала геологического времени 75–77
Штоки 83

Эвапориты 126, 129
Эвгеосинклиналь, определение 464
Электролиты 43
Эллада, марсианский кратер 33
Эллинская плита 489
Энергия 44–47
– геотермальная 505
– гравитационная 46
– звука 45, 46
– кинетическая 44
– определение 40
– потенциальная 44
– тепловая 44, 45
– упругого сжатия 46, 47
– химическая 47
– электрическая 46
– электромагнитная 45
– ядерная 46
Эоловая текстура 374, 375

Эоловые многогранники 265
– осадки, формы накопления 370–376
– трехгранники (драйкантеры) 365
Эпейрогенические движения 18
Эрозионные формы рельефа 270–276, 310–313
Эрозионный цикл 286–290
– – стадия зрелости 287
– – – старости 287, 288
– – – юности 287
Эрозия берегов 348–353
– – избирательная 349
– – механизмы 348
– – отступание берегов 349
– – характерные формы рельефа 349–353
– ветровая 364–368
– – выдувание (дефляция) 364–366
– – истирание песком (абразия) 366–368
– дождевая 246–249
– определение 14, 183
– плоскостная 247
– производимая речной водой 250, 251
– – – – абразия 250, 251
– – – – гидравлическое выпахивание 250, 251
– – – – растворение 250, 251
Эрратические валуны 313

Юго-восточный Ньюфаундлендский хребет 474
Южно-Американская плита 482, 483, 489
Южное Экваториальное течение 341
Южно-Тихоокеанский хребет 336, 488
Юпитер 25, 26

Яванский желоб 484, 488
Ядерное топливо 504
Ядро Земли внешнее 24
– – внутреннее 14
Яп, желоб 484
Японская островная дуга 413
Японский желоб 409, 484, 488
Ярданги 365
Яшма 129

ГЕОГРАФИЧЕСКИЙ УКАЗАТЕЛЬ

Абсарока, хребет 400
Агассис, временное ледниковое озеро 318
Аденский залив 403
Азорские острова 87, 452
Айл-Ройал, остров 98
Айрон-Маунтин, гора 400
Алачуа-Лейк, озеро 231
Алеутские острова 87
Аллеганское плато 288, 289
Аллегейни, долина 285
Альпы 400, 489
Аниакчак, кальдера 87
Антарктида 307, 308, 310
Аполлинарис, горячие источники 240
Аппалачи, горы 210, 263, 391
Аравийская пустыня 179
Арканзас, река 263
Асунсьон, остров 87
Атабаска, гора 313
– ледник 304, 313
Атакама, пустыня 179
Атлас, горы 475
Багамская банка 474
Багамские острова 127
Банф, национальный парк 184
Барбадос, остров 140
Барнегат, залив 357
Белнап, кратер 106
Береговой хребет Калифорнии 441
Бед-Уотер («Плохая вода»), озеро 404
Биг-Спринг, источник 234
– пещера 234
Биг-Хорн, река 263
Бикини, атолл 334
Блэк-Хилс, горы 73
Блу-Ридж, горы 462
Большая Калифорнийская долина (Грейт-Валли) 403, 441
Большая Ньюфаундлендская банка 216, 474
Большое Соленое озеро 129, 133, 455
Большой Барьерный риф 131
Большой Бассейн 16, 175, 398, 402, 441
– каньон 68, 117, 261, 274, 381
Бонвиль, бывшее озеро 455

Бордмен-Хилл, гора 161
Бразос, река 277
Бримстоун, котловина 240
Бук-Клиффс, скалы 147

«Вавилонская башня», гора 184
Везувий, вулкан 80, 86, 96
Великие равнины 16, 130, 175
Вермильон, горячий источник 240
Верхнее, озеро 509, 510
Виктория, пустыня 179
Вогезы, горы 402
Вулькано, остров (жерло) 80

Гавайи, вулканический остров 86, 92, 412
Гавайские острова 73, 91, 482
Галапагос, острова 486
Галлатин, хребет 240
Гарден-оф-зе-Годс («Сад богов»), национальный заповедник 117
Гвадалупе, горы 235
Гекла, вулкан 480
Гималаи, горы 441, 488
Глейшер, национальный парк 275, 296, 312
Гольфстрим 342
Горнерграт, ледник 306
Гоут-Айленд («Козий остров») 272
Гранит-Пик, гора 403
Грейбулл, река 267, 283
Грейт-Валли (Большая Калифорнийская долина) 441
Гренландия 308, 309
Грин-Маунтин, гора 389
Грин-Маунтис, горы 210
Грин-Ривер, река 263
Гро-Вентр, долина 214, 215
Гудзон, нагорья 165
– река 165, 261, 332
Гудзонов залив 318

Данби, озеро 365
«Дворец Монтесумы», национальный памятник природы 192
Девилс-Панч-Боул, государственный парк 352
Девилс-Постпайл («Чертов палец»), национальный памятник природы 103, 392
Девилс-Тауэр («Башня дьявола»), национальный памятник природы 110, 111, 392
Дейна, гора 403
Декан, плато 98
Делавэр, река 260, 261, 332
Делавэрское ущелье 260
Джаспер, национальный парк 299, 313
Дисмал, болото 130
Долина гейзеров 240, 241
– Смерти 280, 291, 402
Драй-Фолс («Сухой водопад») 274, 275

«Игла Венеры», национальный памятник природы 183
Иколе, государственный парк 346
Илиамна, вулкан 89
Иллинойс, река 285
Империал-Валли, долина 373, 374, 398
Интерстейт, национальный парк 275
Иордан, река 265, 403
Испанская месета 475

Йеллоустон, река 273
Йеллоустонский водопад 273
– национальный парк 121, 237, 239, 241, 242
Йосемитский водопад 273, 274
– национальный парк 186, 274
Йохо, национальный парк 192

Кавказские горы 489
Калахари, пустыня 179
Камберленд, плато 288
Канарские острова 87
Капохо, боковое жерло вулкана Килауэа 412
Карлсбадская пещера 234, 245
Карлсбадский национальный парк 235
Карпаты, горы 489
Каррент, река 234
Карсон, река 262
– хребет 403
Карсон-Синк, озеро 129
Карст, плато 235
Каскадные горы 106, 261
Катскилл, горы 69, 462
Каттара, впадина 366
Кейп-Джонсон, гийот 333, 334
Кивино, полуостров 98, 225
Килауэа, вулкан 87, 91–94, 412
Килауэа-Ики, боковое жерло вулкана Килауэа 412
Кис, острова 340
Киттатинни, горы 260
Колорадо, плато 15, 264, 461
– река 258, 261, 274, 277, 286
Колумбия, ледяное поле 299, 313, 320
– река 261, 332
Коневаго-Фолс, водопад 276
Копет-Даг, горы 489
Коппер, река 207
Коронейшн, ледник 307
Кракатау, вулкан 95, 96, 412
Красное море 403
Крейтер, озеро 86
Кука залив 277
Курильские острова 87, 409

Лабрадор, полуостров 296
Лаки, трещина 98, 99
Ларами, горы 184
Лейк-Пепин, озеро 284
Лёйк, горячий источник 237
Ливийская пустыня 374
Линкольн, озеро 312
Лонг-Айленд, остров 231
Льевр, река 213

Маджетик-Ривер, река 266
Мадисон, плато 240
– река 263
Майон, вулкан 86
Макдоналд, озеро 398
Макино, пролив 456
Малабарский берег 340
Маласпина, предгорный ледник 308
Мальта, остров 140
Маммот, горячие источники 237, 240, 243

Мамонтова пещера 232, 235, 245
Маракайбо, озеро 358
Марианские острова 87
Мартиника, остров 93
Маттерхорн, гора 311
Мауна-Лоа, вулкан 91–94
Мауна-Улу, боковое жерло вулкана Килауэа 412
Маунт-Джексон, гора 312
Маунт-Рашмор, национальный заповедник 388, 389
Маунт-Рейнир, национальный парк 270
Маунт-Ривелеток, национальный парк 207
Мейфилд, пещера 238
Мексиканский залив 390
Мендота, озеро 295
Мерсед, река 273
Мертвое море 265, 403
Метеор, кратер 34, 35
Мид, озеро 286
Мидуэй, атолл 15
Миннесота, река 318
Миссисипи, река 248, 257, 268, 277, 281, 282, 284
Миссури, река 257
Мобуту-Сесе-Секо (Альберт), озеро 403
Моно, озеро 403
Мон-Пеле, вулкан 86, 93–95
Моньюмент-Валли («Долина монументов»), национальный памятник природы 290
«Мостовая гигантов» 392
Мьюр, ледник 303
Мэн, залив 474

Ниагарский водопад 271–273
Никарагуа, озеро 358
Нил, река 259
Норрис, долина гейзеров 240, 243
Нубийская (Аравийская) пустыня 374
Ньяса, озеро 403
Нэчрел-Бридж («Природных мостов»), пещера 238

Огайо, река 267, 281
Озарк, плато 227, 234
Олд-Файтфул, гейзер 240, 242
Олимпик, гора 175
Оризаба, вулкан 90
Оуэнс, долина 265, 398

Пайкс-Пик, горы 187
Парикутин, вулкан 90, 91
Пеликан, источник 240
Пелоус-Хиллс, горы 370
Персидский залив 127
Петрифайд-Форест («Окаменелый лес»), национальный заповедник 145
Пидмонт, область 273
Платт, река 263
Понтчаррейн, озеро 277
Попокатепетль, вулкан 90
Потомак, река 263
Принс-Вильям, залив 426

Раката, вулканический остров 95
Ред-Ривер, река 318
Ред-Рокс («Красные скалы»), национальный парк 117
Рейнбоу («Радуга»), естественный каменный мост 275, 276
Рейнир, гора 86, 305
Рио-Гранде, река 254
Роаринг-Маунтин, гора 240
Робсон, гора 382
Рождества остров 140
Росса море 310
– шельфовый ледник 307, 309, 310

Садбери 75
Сан-Габриель, хребет 208
Сан-Хоакин, долина 231, 410
Саскуэханна, река 261, 263
Сахара, пустыня 179
Святого Ильи горы 298
– Лаврентия река 318
Северный, остров (Новая Зеландия) 99
Сенека, озеро 285
Силвер-Спрингс, источники 236
Скалистые горы 263, 489
Слимс-Ривер, река 269
Снейк, река 263
Сольфатара, жерло 104
Сомма, древний вулкан 96
Сонора, пустыня 179
Сплит-Маунтин, горы 263
Стиллуотер, хребет 210
Стоун-Маунтин, горы 186
Стромболи, вулкан 80
Суртсэй, вулкан 89, 90, 409, 480
Сьерра-Ласаль-Драй-Валли («Сухая долина Сьерра-Ласаль»), долина 365
Сьерра-Невада, горы 402, 403, 441
Сьюард, ледник 300

Танганьика, озеро 403
Тар, пустыня 179
Таравера, вулкан 99
Тахо, озеро 403
Тейлорс-Фолс, водопад 275
Телескоп, глыбовая гора 404
Тенайя-Пик, гора 403
Тен-Пикс-Валли («Десяти пиков»), долина 184
Термополис, горячий источник 241
Тертл-Маунтин, гора 214
Тибет 441
Тибр, река 213
Тонг-оф-те-Ошен, залив 474
Трейл-Ридж, хребет 205
Трик-Фолс, водопад 275
Тристан-да-Кунья, остров 87
Три-Стейт (три штата: Оклахома – Миссури – Канзас), район 508
Туэлвмайл-Каньон, ущелье 194

Уайт-Маунтинс, горы 210
Уайт-Ривер, река 270
Уайт-Сандз («Белые пески»), национальный заповедник 371, 372
Уизард, остров 86
Уитни, гора 402
Уобаш, долина 285
Уоррен, ледниковая река 318

Уосатч, хребет 209, 398, 402
Уошито, горы 381

Филиппинские острова 87
Фингер-Лейкс, система «озер-пальцев» 273, 285, 286
Флегрейские поля 80
Флемиш-Кап, банка 474
Флорида-Кис, острова 127
Флоридский пролив 474
Фол-Лейк, озеро 274
Фолк-Крик, река 237
Фунафути, атолл 334

Харни-Пик, гора 388
Хаф-Дом («Полукупол»), гора 186
Хеймаэй, вулкан 480
Хельгафьедль, вулкан 90, 409
Хит-Каньон, ущелье 208
Хитчкок, ледниковое озеро 279
Холстон, гора 400
Хот-Спрингс, горячие источники 241

Цитадель, гора 312

Чесапикский залив 290
Чикита, хребет 393
Чиппева, река 285
Чиф-Маунтин, гора 400, 401

Шаста, вулкан 86
Шварцвальд, горы 402
Шошони, долина гейзеров 240
– река 281

Эльбурс, горы 489
Эльдгья, вулкан 99
Эммонс, ледник 305
Эмперор, водопад 382
Эниветок, атолл 334, 335
Эри, озеро 257, 318
Этна, вулкан 80, 86

Язу, река 282
Ямайка, остров 509
Японские острова 87

ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие к русскому переводу 5

Предисловие. *Перевод Б. А. Борисова* 7

1. Геология—наука о вечно меняющейся Земле. *Перевод Б. А. Борисова* 9

2. Земля в космическом пространстве. *Перевод Б. А. Борисова* 20

3. Вещество и энергия. *Перевод Н. И. Кутузовой* 40

4. Минералы. *Перевод З. В. Кабановой* 49

5. Возраст горных пород и геологическое время. *Перевод З. В. Кабановой* 67

6. Магматизм и магматические породы. *Перевод З. В. Кабановой* 80

7. Осадки и осадочные породы. *Перевод З. В. Кабановой* 117

8. Метаморфизм и метаморфические породы. *Перевод Н. И. Кутузовой* 151

9. Атмосфера и гидрологический цикл. *Перевод Н. И. Кутузовой* 168
10. Выветривание пород и почвы. *Перевод Н. И. Кутузовой* 182
11. Гравитационный перенос. *Перевод Н. И. Кутузовой* . . . 201
12. Подземные воды. *Перевод Н. И. Кутузовой* 219
13. Работа рек. *Перевод Н. И. Кутузовой* 246
14. Снег, лед и ледники. *Перевод Н. И. Кутузовой* 293
15. Океаны и берега. *Перевод З. В. Кабановой* 326
16. Работа ветра. *Перевод З. В. Кабановой* 363
17. Деформация и структуры горных пород. *Перевод Б. А. Борисова* 379
18. Землетрясения. *Перевод Б. А. Борисова* 407
19. Внутреннее строение Земли. *Перевод Б. А. Борисова* . . . 435
20. Тектоника плит и орогенез. *Перевод З. В. Кабановой* . . . 459
21. Природные ресурсы Земли. *Перевод З. В. Кабановой* . . . 494

Эпилог. Перевод З. В. Кабановой 521
Приложение А. *Перевод З. В. Кабановой* 522
Приложение Б. *Перевод З. В. Кабановой* 528
Словарь терминов. *Перевод З. В. Кабановой* 529
Предметный указатель 559
Географический указатель 562

УВАЖАЕМЫЙ ЧИТАТЕЛЬ!

Ваши замечания о содержании книги, ее оформлении, качестве перевода и другие просим присылать по адресу: 129820, Москва, И-110, ГСП, 1-й Рижский пер., д. 2, издательство «Мир».

Айра Аллисон, Дональд Палмер

ГЕОЛОГИЯ
Наука о вечно меняющейся Земле
Старший научный редактор
М. Е. Яковенко
Младший научный редактор
А. В. Швыряева
Художник А. В. Шипов
Художественный редактор
Л. М. Кузнецова
Технические редакторы Н. Д. Толстякова,
Л. П. Бирюкова
Корректор А. Я. Шехтер

ИБ № 3531

Сдано в набор 3.06.83.
Подписано к печати 10.01.84.
Формат 70 × 100 1/16.
Бумага офсетная № 1.
Гарнитура таймс. Печать офсетная.
Объем 17,75 бум. л.
Усл. печ. л. 46,15. Усл. кр.-отт. 92,3.
Уч.-изд. л. 48,32. Изд. № 5/2507.
Тираж 25000 экз. Зак. 495. Цена 4 руб.

ИЗДАТЕЛЬСТВО «МИР»
129820, ГСП, Москва, I-й Рижский пер., 2.

Можайский полиграфкомбинат Союзполиграфпрома при Государственном комитете СССР по делам издательств, полиграфии и книжной торговли
г. Можайск, ул. Мира, 93.

4153