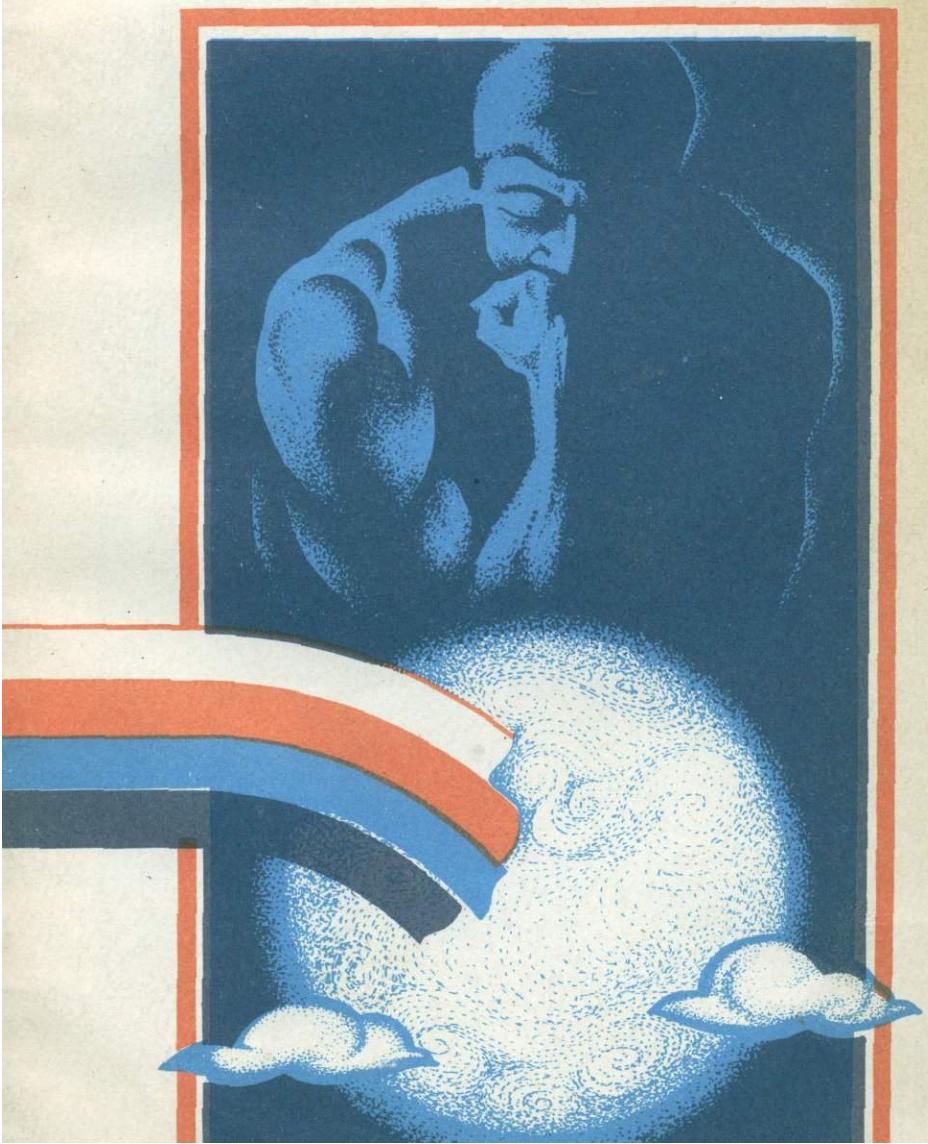
ДЖ. УОТСОН

ГЕОЛОГИЯ И ЧЕЛОВЕК



ДЖ. УОТСОН

ГЕОЛОГИЯ И ЧЕЛОВЕК

ВВЕДЕНИЕ В ПРИКЛАДНУЮ ГЕОЛОГИЮ

GEOLOGY AND MAN

AN INTRODUCTION TO APPLIED EARTH SCIENCE

JANET WATSON FRS

DEPARTMENT OF GEOLOGY,
IMPERIAL COLLEGE OF SCIENCE AND TECHNOLOGY,
UNIVERSITY OF LONDON

LONDON
GEORGE ALLEN AND UNWIN
BOSTON SYDNEY

ДЖ. УОТСОН

ГЕОЛОГИЯ И ЧЕЛОВЕК

ВВЕДЕНИЕ В ПРИКЛАДНУЮ ГЕОЛОГИЮ

ПЕРЕВОД С АНГЛИЙСКОГО С. С. ФИЛАТОВА

4830

ЛЕНИНГРАД
«НЕДРА» ЛЕНИНГРАДСКОЕ ОТДЕЛЕНИЕ
1986

550
У65
УДК 550.8

Уотсон Дж.
У65 Геология и человек: Пер. с англ. — Л.: Недра, 1986. — 184 с., ил. — Пер. изд.: Великобритания, 1983.

Популярно изложены представления о комплексе геологических наук и их прикладных аспектах. Показана зависимость человека от минеральных ресурсов (источников энергии, полезных ископаемых), связь его деятельности с геологическими явлениями и процессами. Приведены основные сведения по инженерной геологии, геофизике, разведке и разработке месторождений; отражена связь с охраной окружающей среды.

Для читателей, интересующихся естественными науками.

У $\frac{1904010000-348}{043(01)-86}$ 48—86 550

This book was originally published in the
English language by George Allen and Unwin
of 40 Museum Street, London WC1A 1LU, England

НАУЧНО-ПОПУЛЯРНОЕ ИЗДАНИЕ

Джанет Уотсон

ГЕОЛОГИЯ И ЧЕЛОВЕК

Введение в прикладную геологию

Редактор издательства Л. Г. Ермолаева
Обложка художника В. М. Иванова
Технический редактор Н. П. Старостина
Корректор Е. А. Стерлина

ИБ № 6581

Сдано в набор 23.05.86. Подписано в печать 30.09.86. Формат 60×90¹/₁₆. Бумага тип. № 1. Гарнитура литературная. Печать высокая. Усл. печ. л. 11,5. Усл. кр.-отт. 12,63. Уч.-изд. л. 13,16. Тираж 50 000 экз. (1-й завод 1—25 000 экз.). Заказ № 1333/736. Цена 65 коп.

Ордена «Знак Почета» издательство «Недра», Ленинградское отделение. 193171, Ленинград, С-171, ул. Фарфоровская, 18.

Типография № 2 Ленуприздата. 191104, Ленинград, Литейный пр., 55.

© Janet Watson, 1983

© Перевод на русский язык. Издательство «Недра», 1986

ОТ ПЕРЕВОДЧИКА

Науки о Земле издавна представляют интерес не только для специалистов. В наши дни, когда благодаря совершенной технике и космическим методам исследований информация о нашей планете неизмеримо возросла, такой интерес проявляют самые широкие слои населения. Это выражается и в большом спросе, которым пользуется научно-популярная литература о Земле. К такому жанру относится предлагаемый вниманию советского читателя труд Джанет Уотсон — известного английского геолога, профессора геологии Британского колледжа науки и техники («Империал-колледж»), члена Королевского общества содействия развитию естествознания.

В небольшой по объему книге автор стремится охватить очень широкий круг вопросов, связанных с познанием Земли и значением геологии в жизни человека. Приводятся сведения об энергетических и водных ресурсах планеты, рудных и нерудных полезных ископаемых, о геологии и генезисе нефти и газа, о природных стройматериалах. Рассматриваются сложные процессы, происходящие в биосфере. Большое внимание уделяется проблеме загрязнения окружающей среды, рационального размещения различных отходов. Дается представление о геологических, геофизических и геохимических исследованиях, в том числе о современных дистанционных (космических и аэрофотометрических) методах.

Главной проблемой, проходящей через всю книгу, остается роль человека в преобразовании Земли. Изменяя облик планеты, человек вступает в сложные взаимоотношения с природой. При этом он должен предвидеть последствия своей деятельности. Книга, затрагивающая такие проблемы, имеет все основания заинтересовать самый широкий круг читателей.

Отдельные части перевода любезно просмотрели и сделали полезные замечания специалисты по различным отраслям геологии: Б. Л. Генин, Б. Б. Голубев, Л. А. Грубов, А. Е. Гуревич, А. И. Киричкова, В. С. Лазарев, М. Г. Лейбсон, Л. С. Рыжков, О. И. Супруненко, В. К. Шиманский. Ряд ценных советов получен переводчиком от В. В. Грибкова, А. И. Никитина, И. В. Рейгина, И. Ю. Черепанова, К. А. Черникова, Л. Н. Шарпенок, И. М. Штутина и Л. А. Вавжиковской. Техническую работу по подготовке рукописи к сдаче в издательство выполнили Т. О. Захаржевская и О. С. Филатова. Всем перечисленным лицам переводчик выражает свою признательность.

ПРЕДИСЛОВИЕ

Многие природные ресурсы, используемые человеком, — это дар земных недр; образовались они под воздействием геологических процессов, в ходе которых Земля развивалась до своего современного состояния, т. е. пока не стала такой, какой мы ее видим сейчас. Чтобы разобраться в закономерностях распределения этих ресурсов на нашей планете, нужно располагать данными о их происхождении и геологической приуроченности. Поэтому науки о Земле имеют чрезвычайно широкое практическое применение, включая такие области, как водные ресурсы, энергетические ресурсы, горное дело, гражданское строительство, сельское хозяйство и здравоохранение. Большинство геологов в тот или иной период своей деятельности вынуждены решать проблемы, непосредственно связанные с прикладной геологией. Совершенно очевидно, что потребность в экспертах для этой обширной отрасли возрастет в будущем.

Почти все студенты, изучающие науки о Земле, штудируют прикладную геологию. На старших курсах они обеспечены специальными учебниками, посвященными таким частным дисциплинам, как инженерная геология или геология рудных месторождений. Разумеется, для студента-первокурсника, который еще не начал специализироваться в какой-то определенной области, значительно труднее составить представление о широте диапазона применения геологических знаний для разрешения практических проблем повседневной жизни. При создании этой книги автор задался целью дать общее представление о прикладной геологии, понятное для каждого, кто знаком с принципиальными положениями наук о Земле. Книга рассчитана в первую очередь на студентов первого-второго года обучения, но я надеюсь, что она представит интерес и для аспирантов, и для тех, кому приходится сталкиваться с геологическими проблемами при работе в смежных областях, например, для специалистов, изучающих проблемы охраны окружающей среды.

Основное содержание книги изложено в шести главах (2—7), каждая из которых посвящена одной из основных отраслей прикладной геологии. Первая и заключительная (9) главы являются обобщающими; в них обсуждаются области применения прикладной геологии. В предпоследней (8) главе описаны основные методики, используемые специалистами по прикладной геологии. В интересах читателей, чтобы облегчить усвоение приводимой информации, значительная часть фактического материала представлена в виде таблиц и рисунков. Эти данные имеют важное значение, и с ними следует детально ознакомиться.

В заключение я хочу выразить свою глубокую благодарность тем многим геологам, которые терпеливо помогали разобраться автору в целом ряде вопросов в течение всего периода написания книги, а подчас и исправляли его ошибки. В частности, я хотела

бы высказать признательность моим коллегам и студентам Британского колледжа, которые показали мне, насколько может быть увлекательна прикладная геология. Моя благодарность адресована также всем тем лицам и организациям, которые разрешили использовать их опубликованные или неопубликованные данные при подготовке иллюстративного материала. Основные источники иллюстраций в книге указаны в соответствующих подрисуночных подписях.

Джанет Уотсон, «Империал-колледж», ноябрь 1982 г.

1. ЧЕЛОВЕК И ЗЕМЛЯ

1.1. ВВЕДЕНИЕ

С доисторических времен человеческие общины обладали какими-то практическими знаниями о месте своего обитания (о землях, на которых они жили), имели представление о том, какие полезные ископаемые (породы и минералы) там имеются. Действительно, в течение многих столетий практическое использование данных геологии значительно обгоняло теоретические аспекты геологической науки. Однако в XIX и XX веках произошел переворот в наших представлениях о строении и истории развития Земли в целом. Не говоря уже о том, что стало насущной необходимостью разрешение ряда практических проблем, связанных с использованием природных ресурсов планеты.

С ростом населения Земли и широким развитием промышленности необходимость оценки земных ресурсов, доступных для человека, и принятие рациональных решений по вопросам дальнейшего роста добычи полезных ископаемых становятся все более и более злободневными. Лицам, занимающим ответственные правительственные посты, промышленникам, а также предпринимателям, связанным с сельским хозяйством, необходимо хорошо разбираться в геологических факторах, определяющих решение тех или иных практических задач. Эта книга должна дать общее представление о прикладной геологии не только будущим геологам или геофизикам, но и тем работникам, основной специальностью которых являются гражданское строительство, горное дело, сельское хозяйство, защита окружающей среды. Книга не претендует на роль учебника (в таких специальных руководствах нет недостатка); она написана с учетом того, что читатель знаком с основами геологии и с геологической терминологией либо имеет доступ к стандартным учебникам.

Ни одна прикладная наука не существует обособленно. Руководствуясь основными принципами профилирующей науки, специалист по прикладным дисциплинам обязан считаться и с факторами, подчас очень далекими от рассматриваемой отрасли. Предположим, например, что обнаружены два небольших рудных месторождения, причем одно — в малонаселенном регионе, а другое — в давно освоенном сельскохозяйственном районе. Если геологические факторы в обоих случаях приблизительно одинаковы, решение о первоочередности разработок того или иного месторождения должно быть, по-видимому, принято исходя из экономических, социальных и политических соображений.

С другой стороны, финансовая или стратегическая важность вновь обнаруженного действительно крупного месторождения дает гигантский стимул для его разработки даже при условии высокой себестоимости, которая определяется необходимостью крупных

капиталовложений, угрозой социальных переворотов или значительным элементом риска. Принятие того или иного решения диктуется спросом и потреблением соответствующего полезного ископаемого, жизненным уровнем населения, его образом жизни, а также шкалой ценностей данного общества. Хотя такие вопросы невозможно исчерпывающе осветить в научно-популярной книге, имеет смысл дать краткий обзор общих вопросов, над которыми приходится работать специалистам, изучающим науки о Земле.

1.2. РЕСУРСЫ

Сырье, добываемое из земных недр, с точки зрения потребления можно классифицировать в соответствии с его использованием. Эта классификация (табл. 1.1) является той основой, на которой построена вся описательная часть данной книги. Совершенно ясно, что потребность в любом сырье варьирует как во времени, так и в пространстве. Потребности древнего человека были сравнительно ограниченными: это стройматериалы, сырье для гончарного производства, украшений, орудий труда и оружия. Промышленная революция принесла с собой не только расширение потребностей человека, но и технический прогресс, главным образом в горной промышленности, металлургии и добыче полезных ископаемых. В XX веке потребление многих видов сырья определяется возросшим жизненным уровнем населения. Например, на графике (рис. 1.1) демонстрируется прямая зависимость между потреблением энергии и доходом на душу населения в середине 70-х годов.

Добыча многих видов естественного сырья возросла с 1900 г. по меньшей мере на порядок; представляется вероятным, что подобная зависимость сохранится и в дальнейшем. Приблизительные данные о добыче угля, нефти и некоторых металлов приводятся в следующих главах. Для того чтобы обеспечить будущее челове-

Таблица 1.1. **Природные ресурсы, необходимые человеку (в круглых скобках названы ресурсы, не являющиеся полезными ископаемыми)**

Ресурсы	Источники ресурсов
Водные запасы	Поверхностные и подземные воды
Энергия (энергетические ресурсы)	Горючие ископаемые; атомная, гидроэлектрическая и геотермальная энергия; (солнечная энергия, сила ветра, органические вещества)
Металлы	Рудные месторождения
Строительные материалы	Строительный камень, гравий, песок, глина и т. д.; (органические и синтетические материалы)
Неметаллическое сырье	Горные породы и минералы; (растительные и животные продукты)
Пищевые ресурсы	(Растения и животные); удобрения, вносимые в почву для повышения урожайности

Рис. 1.1. Годовое потребление энергии и доход на душу населения.

Соотношение основано на цифровых данных, полученных компанией «Бритиш петролеум» для середины 1970-х годов; это соотношение изменилось в результате резкого повышения стоимости энергии после 1974 г. (сравните с рис. 1.2.).

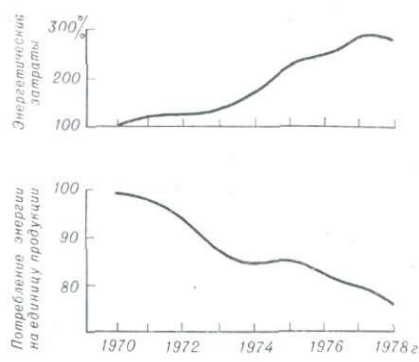


Рис. 1.2. Энергетическая эффективность. Соотношение между потреблением энергии и энергетическими затратами в США.

Уровень 1970 г. принят за 100%.

чества, необходимо подготовить реалистические прогнозы его потребностей и провести учет природных ресурсов. Осуществить и то и другое нелегко.

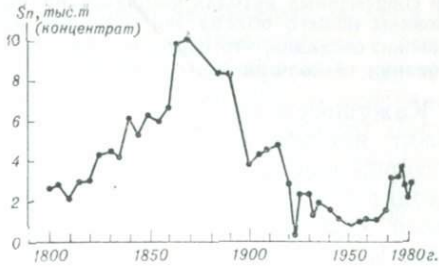
Прогнозирование спроса включает в себя предположительную оценку факторов, обусловливавших потребление в прошлом: изменение численности населения, скорость экономического развития, уровни цен и т. п. Эти прогнозы зачастую сводятся на нет непредсказуемыми событиями (рис. 1.2) либо техническим прогрессом, который изменяет установившиеся нормы развития. Примером может служить изобретение двигателя внутреннего сгорания, благодаря чему в начале XX столетия резко возросла потребность в нефти. Поэтому не приходится удивляться тому факту, что опубликованные прогнозы, подготовленные разными специалистами, совершенно не схожи между собой.

Почти столь же трудной проблемой является оценка запасов полезных ископаемых (это ничуть не легче прогнозирования спроса!). Вопрос этот непосредственно касается любого геолога. Добыча невосполнимых ресурсов, таких как уголь или рудные ископаемые, является ограниченной. Отдельное месторождение или группа месторождений имеют характерный цикл развития: открытие, разведка, рост добычи, спад добычи (рис. 1.3). Поставки сырья промышленности поддерживаются только благодаря открытию новых месторождений.

Цифры запасов полезных ископаемых, подсчитанные для любого определенного отрезка времени, естественно, учитывают данные только по тем месторождениям, которые известны на это время. Последующие открытия отражаются на расчетах в более поздний период. Оказывается, что известные запасы многих видов сырья с течением времени возрастают, несмотря на их интенсивное

Рис. 1.3. История горнопромышленного региона. Развитие, процветание и упадок на примере оловорудного региона в Юго-Западной Англии.

В период максимального расцвета (XIX век) в разработке принимали участие более 300 предпринимателей, а в 1960 г. из них осталось лишь двое; вопрос о будущей добыче олова остается открытым (по данным М. Торна [British Geologist, 1981 г.]).



потребление. Например, опубликованные в 1978 г. доказанные запасы нефти по меньшей мере в 8 раз выше подсчитанных в конце второй мировой войны, что обусловлено открытием новых громадных месторождений (табл. 1.2).

Цифры, характеризующие известные запасы ископаемого сырья, могут измениться под воздействием событий, ничего общего не имеющих с геологическими явлениями. Например, международные споры, касающиеся юридических прав на владение глубоководными минеральными ресурсами, будут существенно влиять на оценку будущих поставок никеля, марганца и других металлов. Благодаря новым методам добычи и технологической обработки руд месторождения, считавшиеся нерентабельными для разработки, во многих случаях были переведены в категорию месторождений с промышленными запасами.

Примером этого служит внедрение методики извлечения меди из руд с содержанием металла менее 1%, что обеспечило возможность эксплуатации огромных залежей вкрапленных медных руд, являвшихся слишком бедными для добычи при прежней методике. С дальнейшим усовершенствованием технологии обогащения станет, очевидно, возможным извлекать медь из силикатов (в настоящее время медь добывается главным образом из сульфидов). При современном уровне технологии это неосуществимо из-за крайне высоких энергетических затрат. Отработанная порода из отвалов рудников прошлого столетия иногда с успехом подвергается переработке с целью либо более тщательного извлечения добывавшегося первоначально компонента, либо получения какого-нибудь другого металла.

Таблица 1.2. **Опубликованные доказанные запасы нефти (млн. баррелей) по статистическим данным компании «Бритиш петролеум»**

Год	Северная Америка	Средний Восток	Все страны (за исключением СССР и Китая)	Мировые запасы
1949				80 000
1969	48 300	332 800	480 600	540 600
1978	42 000	369 600	555 000	649 000

Примечание. 1 баррель равен 35 галлонам (Великобритания) или 42 галлонам (США). Один английский баррель равен 163,7 л, баррель США — 159 л; английский галлон составляет 4,54 л, галлон США — 3,78 л.

При современных методах эксплуатации залежей углеводородов зачастую больше половины общего объема запасов этого ценного сырья останется в недрах. Совершенно очевидно, что известные запасы углеводородов при условии усовершенствования технологии добычи могли бы значительно возрасти.

Кажущееся увеличение известных запасов какого-либо сырья может явиться результатом роста цен на это сырье, поскольку месторождения, считавшиеся нерентабельными, в этом случае переходят в категорию месторождений, подлежащих эксплуатации. Такая ситуация отражена в табл. 1.3, составленной в соответствии с данными Комиссии по атомной энергии США о запасах урана в 1960-х годах. Это подтверждается и историей производства алюминия в период второй мировой войны.

Доступность запасов полезных ископаемых — это фактор, обусловленный не только их наличием; на нем сказываются, например, такие особенности, как международное положение и социальные взаимоотношения. Распределение горючих и рудных ископаемых по земному шару настолько неравномерное, что даже вели-

Рис. 1.4. Спрос и предложение. Соотношение между добычей и потреблением нефти в 1980 г. [Financial Times].

Добыча (потребление) 1 баррель в сутки соответствует 50 т в год.

Таблица 1.3. **Разрабатываемые запасы. Колебания цен на примере потенциальных ресурсов урана в США в середине 1960-х годов (данные Комиссии по атомной энергии США).**

Традиционные ресурсы рентабельно разрабатывать при цене 8—10 долл. за 1 фунт (18—20 долл. за 1 кг) концентрата U_3O_8 (на уровне цен 1960-х годов). В США наиболее распространенным источником урана являются вкрапленные руды в песчаниках.

Нетрадиционные ресурсы подлежат разработке при более высоких затратах в связи с ростом рыночных цен

Цена за 1 фунт концентрата U_3O_8, долл. (уровень 1960-х годов)	Урановое сырье
10—15	Россыпи тугоплавких минералов (монацит), морские фосфаты, урансодержащие лигнит, уголь, нефть
15—30	Риолитовые туфы, углистые сланцы с содержанием урана 65 ppm
30—50	Кислые или щелочные изверженные породы с содержанием урана 15 ppm, тория 45 ppm
50—100	Морская вода с содержанием урана 0,003 ppm
100—500	Граниты (все разновидности) с содержанием урана 4—5 ppm, тория 15 ppm

Примечание. 1 ppm = 10^{-6} (одна миллионная доля).

кие державы не могут сохранить полную автономию по всем природным ресурсам. Несоответствие между производством и потреблением нефтепродуктов (рис. 1.4) является прекрасной иллюстрацией этой проблемы. Такое несоответствие оказало воздействие на политические события в странах Ближнего и Среднего Востока в течение последних десятилетий. Если говорить о металлах, то следует отметить, что крупные запасы никеля, хрома и олова сосредоточены в пределах сравнительно немногих месторождений.

1.3. НАРУШЕНИЕ ГЕОЛОГИЧЕСКОГО РАВНОВЕСИЯ

Естественная неустойчивость физической среды в течение длительного времени приводит к изменениям в характере рельефа, уровне Мирового океана и режиме грунтовых вод. Подобные изменения могут оказать катастрофическое воздействие на человеческую жизнедеятельность, когда на людей обрушиваются землетрясения, наводнения или вулканические извержения. Приходится также считаться с морскими приливами и отливами. Все эти процессы нарушают ритм человеческой деятельности. Их воздействие может быть смягчено при условии проведения тщательных наблюдений за опасными явлениями, а также разумного планирования разведочных, эксплуатационных и инженерно-строительных работ.

Подобные проблемы возникают и в тех случаях, когда вмешательство человека нарушает существующее природное равновесие. Например, изменение ландшафта, связанное с вырубкой лесов или распахиванием прерий, имело катастрофические последствия: эрозию почв, истощение почвенного слоя, разливы рек и т. д. В свою очередь сооружение автострад или плотин, приводящее к нарушению устойчивости естественных склонов, может положить начало целому ряду непрерывно действующих оползней (рис. 1.5). Неконтролируемый отвод подземных вод из скважин может вызвать проникновение в подземные резервуары соленых либо технически загрязненных вод.

Проблемы, связанные со взаимоотношением человека и геологической среды, изучаются специалистами по инженерной геологии и вопросам охраны среды. Эти проблемы носят комплексный характер, ни одна из них не является «чисто» геологической, однако все они в той или иной степени связаны с геологией и подробно рассматриваются в последующих главах.

Чтобы успешно прогнозировать природные изменения и сводить до минимума вредное влияние на природу деятельности человека, необходимо глубоко понимать факторы, определяющие ход геологических процессов на поверхности Земли.

Однако одним только геологам редко приходится разрабатывать эффективные мероприятия для устранения трудностей и опасностей геологического характера. Это в первую очередь определяется наличием соответствующих технических и финансовых воз-

Рис. 1.5. Неустойчивость склонов. Мощный оползень, возникший при прокладке шоссе в штате Колорадо в 1957 г. (по данным Барнеби).

можностей и во вторую очередь — намерениями правительственных органов и нуждами их избирателей, заинтересованных в использовании природных ресурсов. В Великобритании, как и в большинстве высокоразвитых стран, любая деятельность, связанная с нарушением природного режима (горные работы или гражданское строительство), а также выпуск потенциально токсичных веществ строго контролируются законодательством. Такое законодательство проявилось чрезвычайно эффективно в области здравоохранения (в Великобритании заразные заболевания, переносимые морским путем, были почти ликвидированы начиная с середины XIX века, а смертность, обусловленная загрязнением атмосферы, значительно снижена на протяжении жизни автора).

Прямые затраты на здравоохранение оказались очень высокими. Например, британская промышленность затрачивала в середине 1970-х годов, по приблизительным подсчетам, 500 млн. фунтов стерлингов на осуществление правительственной программы, ограничивающей выброс производственных отходов в атмосферу. Вполне понятно, что в слаборазвитых странах, борющихся за индустриализацию, контролю над загрязнением атмосферы уделяется еще недостаточное внимание.

На Европейском континенте, где существуют определенные различия в законодательствах разных стран, возникают значительные трудности в связи с эксплуатацией крупных рек, пересекающих границы нескольких государств. Потенциал Рейна как основного источника водоснабжения в густонаселенных Нидерландах резко снижается из-за наличия вредных примесей, спускаемых в реку индустриальными комплексами, расположенными выше по его течению. Высокая степень заражения Эльбы промышленными стоками подтверждается аномально высокими концентрациями тяжелых металлов, обнаруживаемых в русловых осадках. Международные соглашения в целях разрешения подобных проблем — пока что дело будущего.

Не говоря уже о финансовых и правовых сложностях, следует признать, что люди редко считаются с ролью геологических факторов при осуществлении тех или иных мероприятий. Восстановление таких городов, как Сан-Франциско и Токио, на том же самом месте после катастрофических землетрясений или повторное заселение плодородных склонов вулканов после разрушительных извержений отчетливо свидетельствуют о том, что люди не способны геологически мыслить и не желают считаться с опасностями, о которых предупреждают геологи.

Специалисты, изучающие науки о Земле, не в силах заставить недальновидных людей по достоинству оценивать роль геологических реальностей, но долг их заключается в том, чтобы, по крайней мере, дать возможно более точный прогноз о вероятности той или иной катастрофы.

2. ВОДА

2.1. ВВЕДЕНИЕ

Вода — неотъемлемая часть всего живого на Земле. Без воды человеческая жизнь была бы просто невозможна. Вода необходима как для сельскохозяйственных культур, так и для домашних животных, не говоря уже о всестороннем ее применении в промышленности. Прослеживается четкая тенденция значительного возрастания потребности в воде с повышением жизненного уровня населения земного шара. Все большее количество воды становится необходимым не только для производственных, но и для бытовых, спортивных и других нужд человека. Потребление воды в Великобритании в начале 1970-х годов составляло 300 л на душу населения.

Недостаток воды является ограничивающим фактором в развитии полупустынных областей земного шара, земли которых могли бы стать плодородными при условии их орошения. И даже там, где дожди выпадают в достаточном количестве, такие густонаселенные регионы, как Западная Европа или Северная Америка, испытывают значительные трудности в сохранении необходимых запасов чистой воды. Характер проблем, связанных с сохранением водных ресурсов, меняется в зависимости от климата, рельефа местности, геологического строения, а также от образа жизни населения. Любое водоснабжение опирается на круговорот воды в природе, захватывающий внешнюю оболочку Земли и верхнюю часть ее литосферы, и включает возвращение воды в природную систему.

2.1.1. ГИДРОГЕОЛОГИЧЕСКИЙ ЦИКЛ

В литосфере вода содержится в порах и более крупных полостях горных пород либо находится во взаимосвязи со слагающими породы минералами. Воды океанов, морей, а также поверхностные

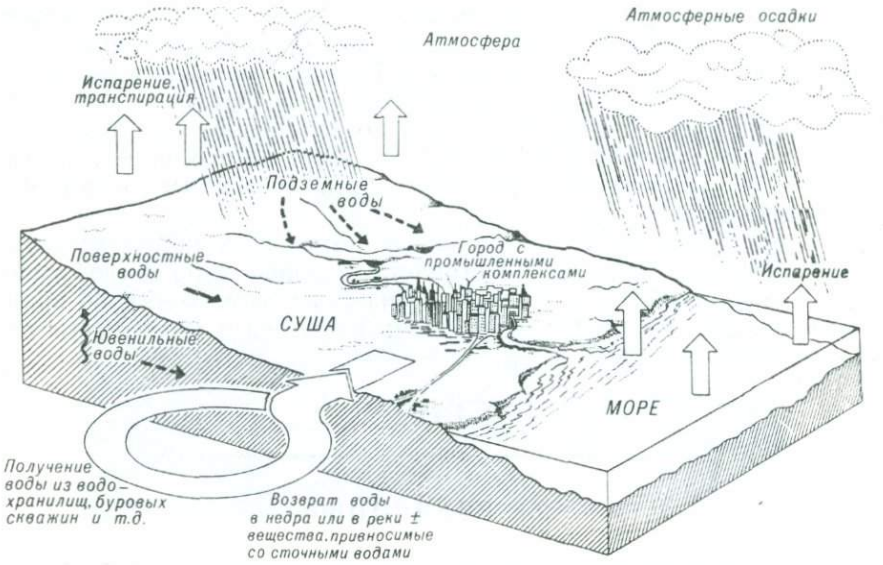


Рис. 2.1. Гидрогеологический цикл и различные виды его изменения под воздействием деятельности человека.

воды суши, содержащиеся в реках, озерах и ледниках, составляют в совокупности гидросферу.

В атмосфере вода встречается в различных состояниях (от парообразного до твердого) — в виде облаков, дождя, снега и т. д. Подвижность воды во всех фазах определяет ее способность перемещаться из одной среды в другую под действием температурных изменений, силы тяжести, а также химических и биологических процессов. Совокупность всех перемещений воды составляет гидрогеологический цикл (рис. 2.1).

Вода попадает в атмосферу в виде пара, образующегося при испарении земной влаги, а также в результате транспирации растений и дыхания животных. Из атмосферы вода возвращается в виде дождя или снега, падающих на землю под действием гравитационных сил и составляющих в общем то, что мы называем атмосферными осадками. Бóльшая часть таких осадков вновь поступает в атмосферу, а остальная (объединяемая термином «сток») либо стекает в моря и реки, соединяясь с гидросферой, либо просачивается через почву в недра Земли, тем самым пополняя собой поверхностные или грунтовые воды.

Поверхностные воды перемещаются под воздействием силы тяжести по направлению к морю, причем на всем протяжении их миграции осуществляется периодический обмен как с подземными водами, так и с атмосферой. Моря и океаны питаются водой за счет атмосферных осадков и рек, а отдают ее не только в атмосферу, но также в литосферу в виде погребенной воды, захваты-

ваемой отлагающимися осадками. Гидрогеологический цикл завершается вытеснением погребенных вод в процессе диа- и эпигенеза. Дополнительные поступления ювенильных вод из нижних частей земной коры и верхней мантии при интрузивной деятельности и метаморфизме компенсируются до некоторой степени переносом подземных вод в более глубокие горизонты в процессе субдукции (погружения) литосферных плит.

2.1.2. ГИДРОХИМИЯ

Так как дождевая и снеговая вода обычно содержит мало примесей, кроме растворенного углекислого газа CO_2, то сток, питающий реки и подземные воды, является «пресным». Однако и поверхностные и грунтовые воды при взаимодействии с горными породами и почвенным слоем захватывают растворенные и коллоидные вещества и обогащаются органическими компонентами, образующимися в ходе различных биологических процессов, в том числе человеческой жизнедеятельности.

Общее количество твердых веществ, растворенных в поверхностных водах, обычно составляет не более нескольких десятков или сотен частей на миллион, однако это содержание становится куда более высоким в районах внутреннего стока в пределах областей с засушливым климатом, где в связи с сильным испарением концентрация солей значительно повышается. Состав подземных вод варьирует в зависимости от типа вмещающих пород, характера выветривания и концентрации водородных ионов (pH), которая определяет кислотность воды (при $pH=7$ вода нейтральная; <7 — кислая; >7 — щелочная); существенную роль играет окислительно-восстановительный потенциал (Eh). Локальные изменения состава воды вызываются поступлением ювенильных вод, несущих растворенные вещества магматического происхождения, а также поступлением вод из городов, селений и с ферм. В табл. 2.1 приводятся данные о составе вод в различных средах наряду со сведениями о допустимых пределах содержания различных компонентов в воде, предназначенной для нужд человека.

Главными неорганическими компонентами поверхностных и подземных вод являются катионы водорода, кальция, магния, натрия, калия и анионы CO_3^{2-}, HCO_3^- (карбонат и бикарбонат), Cl^- (хлорид), SO_4^{2-} (сульфат) и OH^- (гидроксил). Жесткость воды обусловливается присутствием избытка ионов бикарбонатов, образующихся в результате растворения известняков и других известковых пород, либо наличием ионов сульфатов, получающихся при растворении гипса, а также при окислении сульфидов. Взаимодействие жесткой воды с мылом приводит к образованию неприятного пенистого осадка.

Считается, что наличие бикарбонатов создает временную жесткость воды, поскольку она может быть устранена кипячением, в результате которого выпадает в осадок карбонат кальция. Накипь, засоряющая паровые котлы, трубы и баки для кипячения в районах распространения жесткой воды, накапливается в результате этой реакции. Чтобы избежать выпадения такого осадка, иногда

Институт геологических наук АН Армянской ССР

Таблица 2.1. **Химический состав вод**

Различные воды	Общее количество растворенных минеральных веществ, %
Обычная мягкая вода	0,002—0,006
Жесткая вода из верхнемеловых отложений Англии	до 0,04
Морская вода	3,5
Рассолы, содержащие металлы (глубинные участки Красного моря)	25
Рассолы на нефтяных месторождениях	до 65
Допустимые пределы содержания растворенных минеральных веществ в подземных водах Австралии	
Вода, используемая для бытовых нужд	0,2
Вода, применяемая при орошении земель	0,05—0,1
Промышленные воды (для паровых котлов и т. д.)	1
Вода для поения овец	1,5

Химический состав растворенных минеральных веществ в речных и морских водах

Вода	Компоненты, %									
	HCO_3^-	Cl^-	SO_4^{2-}	Br^-	Na^+	K^+	Mg^{2+}	Ca^{2+}	Fe^{2+}	SiO_2
Речная	49,1	6,6	9,4	—	5,3	1,9	3,4	12,6	0,5	11,0
Морская	0,2	55,3	7,7	0,06	30,6	1,1	3,7	1,2	—	—

Концентрации различных элементов в водах (ppm)

Элементы	Воды			
	подземные природные	загрязненные удобрениями (Лонг-Айленд, Нью-Йорк)	в геотермальном районе (Йеллоустонский национальный парк)	рассолы (Красное море)
As	11	0—29	150	—
B	0,0	240—2500	—	8
Cu	0,0	0—20	—	1
Fe	—	—	3—215	81
Pb	4,0	0—6	—	1
Mn	—	—	7—283	82
S	—	—	до 5000	—
Sr	—	130—1400	—	48
Zn	—	10—80	—	5

приходится пользоваться специальными смягчителями, которые, реагируя с бикарбонатами, дают растворимый продукт. Что же касается жесткости, обусловленной присутствием сульфатов, то ее невозможно удалить кипячением; этот тип жесткости принято называть постоянным. Высокое содержание сульфатов придает воде коррозионные свойства (вследствие образования слабого раствора серной кислоты), что приводит к разрушению металлических (особенно железных) сооружений и бетона.

Высокое содержание хлоридов делает воду непригодной для потребления как людьми, так и домашним скотом. Во многих глубоких водоносных горизонтах, например в водоносных комплексах Большого Артезианского Бассейна в Австралии, уровень содержания хлоридов может превышать предел, допустимый при использовании воды для питья и орошения земель. Рассолы на многих нефтяных месторождениях имеют еще бо́льшую соленость, чем морская вода.

Органические вещества поступают в поверхностные и подземные воды в результате процессов разложения, в том числе с участием микроорганизмов, а также вследствие загрязнения вод бытовыми, сельскохозяйственными и промышленными отходами. Аммоний (NH_3) является одним из наиболее распространенных продуктов, образующихся при процессах разложения, и по его повышенному содержанию мы можем получить приблизительное представление о степени загрязненности воды органическими веществами. Мерой содержания аммония и других органических восстановителей (соотносительно с количеством кислорода, потребного для их окисления) является так называемая биохимическая потребность в кислороде (БПК). Значение БПК, равное 74 ppm, рекомендовано в Великобритании как максимально допустимое для речных вод, куда поступают различные стоки, прошедшие через очистные сооружения.

Главная опасность для здоровья человека при употреблении воды, содержащей органические примеси, попадающие со сточными водами, определяется присутствием бактерий — переносчиков заразных болезней. Бактерии гибнут при полном окислении органических веществ, однако они могут сохраниться в воде, не подвергшейся соответствующей обработке, а также в водоемах и водостоках с застойным режимом.

Морская вода, составляющая более 90% всех поверхностных вод планеты, содержит около 3,5% растворенных твердых веществ, включающих почти все известные химические элементы, хотя бы в ничтожных количествах (см. табл. 2.1). Соленость и состав морской воды остаются постоянными, за исключением небольших замкнутых бассейнов, где эти параметры могут изменяться вследствие испарения либо притока речных вод. Погребенные воды, содержащиеся в морских осадках, и подземные воды, находящиеся в подстилающих морские бассейны горизонтах, обычно являются солеными, хотя и отличаются по составу от морской воды вследствие обменных реакций. Соленые и пресные подземные воды соприкасаются вблизи береговой линии, при этом поверхность их раздела смещается к морю либо к берегу под действием естественных и искусственных факторов.

Что касается гидрогеологического цикла в целом, то сообщающиеся воды внешних оболочек Земли (атмо-, гидро- и литосферы)

поддерживают приблизительный химический баланс, поскольку поступление веществ в процессе растворения горных пород или обменных реакций в одних местах компенсируется выпадением осадков (преципитацией) в других. Подобные изменения имеют особенно важное значение для зоны, расположенной выше зеркала грунтовых вод (зона аэрации), и для зоны развития эпигенетических процессов. Изменения химического состава поверхностных и подземных вод сочетаются, разумеется, с процессами преобразования коренных пород, что имеет большое практическое значение для формирования почв и перераспределения металлов в земной коре.

2.1.3. ВОДА, ИСПОЛЬЗУЕМАЯ ДЛЯ НУЖД ЧЕЛОВЕКА

Когда мы говорим о водных ресурсах, то имеем в виду поверхностные и подземные пресные воды, которые могут быть использованы вблизи места их потребления либо транспортированы на некоторое расстояние по трубам, акведукам, колодцам и буровым скважинам (табл. 2.2). Сточные воды могут поступать непосредственно к месту очистки, либо отводиться с помощью водостоков и сточных труб в другие районы. При подготовке к использованию водных ресурсов в первую очередь нужно учитывать их качественную характеристику, надежность и стоимость эксплуатации. Там, где атмосферные осадки выпадают в достаточном количестве, а плотность населения сравнительно невелика, воду можно брать непосредственно из рек, озер и неглубоких колодцев, а загрязненную воду вновь спускать в почву либо в речную сеть; при этом допущенные нарушения природной системы окажутся незначительными.

Таблица 2.2. **Источники водных ресурсов**

Воды	Источники
Поверхностные	Родники, оазисы, колодцы — места подъема грунтовых вод на земную поверхность.
	Реки, ледники, озера.
	Акведуки, каналы, трубопроводы — искусственные водоводы.
	Водохранилища, запруженные плотинами; котлованы и карьеры, заполненные водой.
	Соленые воды, образовавшиеся при обессоливании растительного покрова.
	Воды, восстановленные путем очистки сточных вод
Подземные	Близповерхностные отложения (аллювий, песчаные дюны, валунные глины), вскрытые мелкими скважинами.
	Водоносные горизонты в коренных породах, вскрытые мелкими скважинами.
	Артезианские бассейны, вскрытые глубокими скважинами.
	Водоносные слои, режим которых поддерживается искусственным подпитыванием

Для водоснабжения городов, как правило, приходится сооружать водохранилища или бурить скважины, чтобы вскрыть водоносные горизонты, часто расположенные на значительной глубине, либо повторно использовать сточные воды, предусматривая их переработку, обычно дорогостоящую. Эти процессы в большей или меньшей степени нарушают установившийся водный баланс, создавая новые уровни базиса дренирования, ускоряя либо замедляя миграцию подземных вод, понижая уровень водного зеркала, видоизменяя распределение соленых или загрязненных вод. Кроме того, в очищенные сточные воды могут попасть новые растворенные вещества.

Совершенно очевидно, что проблемы обеспечения запасами чистой воды не могут решаться в изоляции от вопросов, связанных с удалением (отводом) загрязненных вод. Поэтому основной оценкой принимаемых решений должно быть уменьшение побочных эффектов от нарушений гидрогеологического цикла.

2.2. ВЗАИМООТНОШЕНИЕ АТМОСФЕРЫ И ГИДРОСФЕРЫ

Годовой объем атмосферных осадков — дождя и снега — контролируется особенностями климата и рельефа той или иной местности. Среднегодовое количество осадков, выпадающих на единицу площади, колеблется от 2500 мм и более в некоторых областях тропических широт до 25 мм в аридных зонах.

Только малая часть годового объема осадков становится потенциальным источником воды на Земле. Даже в такой области умеренного климата, как Великобритания, около половины выпадающих атмосферных осадков вскоре возвращается в атмосферу вследствие испарения из поверхностного слоя, включая почву, и транспирации растений; в жарких или засушливых регионах эти потери значительно больше. Например, в районе Эверглейдса во Флориде (США) в результате действия этого процесса, получившего название «эвапотранспирация», теряется около 80% осадков.

Ожидаемые потери влаги при данных конкретных условиях для сплошного растительного покрова определяются понятием «потенциальная эвапотранспирация» (ПЭ). Этот параметр возрастает с повышением температуры, увеличением скорости ветра и под действием солнечных лучей; величина ПЭ обратно пропорциональна влажности. Длительные периоды, в течение которых ПЭ превышает выпадение осадков, приводят к развитию дефицита влажности в почве, в то время как в периоды, изобилующие осадками, в почвенном слое накапливается избыточная влага. Водный баланс, обусловленный этой зависимостью, изменяется как по сезонам, так и по более длительным временным интервалам.

Проблемы водоснабжения особенно остро встают там, где долгое время сохраняется водный дефицит. В полузасушливых и засушливых областях эти проблемы обусловлены совместным воздействием недостаточного количества выпадающих осадков и

сильным эффектом испарения, что в свою очередь определяется низкой атмосферной влажностью и высокими дневными температурами. Если поступление влаги превышает показатель ПЭ, то мы имеем сток в поверхностные и подземные воды; в зависимости от климатических условий он варьирует от менее 5 см до более 250 см в год. Большинство поверхностных вод, в том числе бóльшая часть осадков, выпадающих при кратковременных ливнях, не задерживаясь стекает в море.

Существенные улучшения в использовании водных ресурсов могут быть достигнуты путем сооружения водохранилищ в верхних участках водосборных площадей; такие водохранилища служат для регулирования водных потоков на расположенных ниже территориях. В тех регионах, где по климатическим условиям атмосферные осадки пополняют сток в достаточных количествах, все водотоки, за исключением самых мелких ручьев, не пересыхают круглый год и дренажная сеть разгружается непосредственно в морские бассейны.

В засушливых (аридных) регионах активность многих рек непостоянна; вместе с тем вода в таких пересыхающих водотоках продолжает течь среди аллювиальных отложений под ложем реки; эту воду можно обнаружить, проделав неглубокие закопушки. Такие водотоки могут не иметь выхода к морю; тогда они питают своими паводковыми водами внутренние водосборные бассейны, где образуются внутренние моря и недолговечные плайевые озера *. Обильное испарение в таких бассейнах приводит к концентрации солей как в поверхностных, так и в подземных водах, а местами — к отложению эвапоритов. В результате неглубоко залегающие подземные воды могут стать непригодными как для нужд человека, так и для ирригации (см. табл. 2.1).

Бóльшая часть атмосферных осадков в жарких полуаридных и аридных зонах выпадает в периоды редких гроз, сопровождающихся ливневыми дождями, и быстро теряется, если только не принять меры по их задержанию.

2.3. ВЗАИМОСВЯЗЬ ПОВЕРХНОСТНЫХ И ПОДЗЕМНЫХ ВОД

Вблизи от земной поверхности вода может просачиваться сквозь поры и более крупные полости в породах, образуя взаимосвязанную систему подземных вод. Зона насыщения (сатурации), в пределах которой все пустоты целиком заполнены водой, начинается на глубинах от нескольких метров до нескольких сотен метров от поверхности земли. Верхней границей зоны служит зеркало грунтовых вод, а его конфигурация и глубина залегания определяются взаимоотношением между подземными и поверхностными водами.

---

* Мелкие временные озера, возникающие на плайях (днищах бессточных впадин) во влажные сезоны и пересыхающие в засушливые. (Здесь и далее по всей книге примечания сделаны переводчиком.)

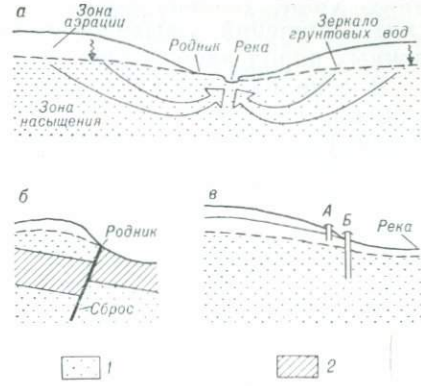


Рис. 2.2. Зеркало грунтовых вод.

а — положение водного зеркала и поток грунтовых вод в проницаемых породах (показан стрелками); *б* — влияние изменения проницаемости вмещающих пород на уровень грунтовых вод; *в* — колебания зеркала грунтовых вод в районах с малым количеством атмосферных осадков (река пересыхает при достижении водным зеркалом наиболее низкого уровня; скважина *А* дает воду только в том случае, если зеркало грунтовых вод расположено достаточно высоко, в то время как скважина *Б* функционирует постоянно). Горные породы: *1* — проницаемые, *2* — непроницаемые.

Короче говоря, вода просачивается через зону аэрации, расположенную над водным зеркалом, и вытекает из насыщенного грунта ниже водного зеркала. Этот факт необходимо учитывать при распределении резервуаров и при выборе места для спуска сточных вод (рис. 2.2).

Положение водного зеркала обычно определяется по уровню стояния воды в открытых трещинах или в колодцах и буровых скважинах. Вмещающие же породы насыщены приблизительно на метр выше этого уровня, здесь вода удерживается в мелких порах силами поверхностного натяжения. В этой зоне преобладают окислительные условия и вода взаимодействует с минералами вмещающих пород. Вещества, переходящие в растворимое состояние, могут быть переотложены вблизи зеркала грунтовых вод.

Поверхность водного зеркала в общем соответствует (с небольшими отклонениями) характеру рельефа местности (см. рис. 2.2). В тех местах, где зеркало грунтовых вод пересекает земную поверхность, возникают родники. Болота или озера отвечают местам, питаемым грунтовыми водами зоны насыщения. В засушливых областях водное зеркало на протяжении большей части года находится значительно ниже дна долин и лишь изредка пересекает земную поверхность; в таких местах появляются оазисы. В аридных областях речные воды, как правило, просачиваются в грунт или теряются в подстилающих породах и эти реки то выходят на поверхность, то исчезают.

Выше нами дана общая схема распределения подземных вод; в действительности она в большей или меньшей степени изменяется, что зависит главным образом от проницаемости подстилающих пород. Породы с низкой проницаемостью замедляют движение водного потока в зоне аэрации. Там, где они перемежаются с породами, имеющими хорошую проницаемость, в последних может сформироваться подвешенный водоносный горизонт (например, в аллювиальных отложениях, перекрывающих глинистые породы). Там, где вблизи земной поверхности чередуются более и менее проницаемые слои, вода, запруженная вверх по восстанию пластов менее проницаемыми породами, может дать начало род-

нику. Такие условия могут создаваться вблизи границ тектонических нарушений, у выходов на поверхность наклонных пластов осадочных пород либо у даек и других небольших интрузивных тел.

В зоне насыщения проницаемые водоносные слои могут быть надежно изолированы от остальной системы подземных вод непроницаемыми слоями (водоупорами), расположенными как сверху, так и снизу. Вода в таком замкнутом водоносном горизонте находится на глубине под напором; она должна подняться до верхнего уровня водоносного горизонта при вскрытии его колодцами или мелкими скважинами. Структура, показанная на рис. 2.2, создает артезианские условия — такие, при которых вода может подняться по скважинам над поверхностью земли до пьезометрического уровня, тем самым обусловливая возникновение естественных фонтанов.

2.4. ПОРИСТОСТЬ И ПРОНИЦАЕМОСТЬ

Способность породы вмещать и пропускать различные флюиды — воду, рассолы, газ или нефть — обусловлена двумя независимыми друг от друга факторами; объемом порового пространства, где может содержаться флюид (пористость), и эффективностью, с которой флюид способен мигрировать сквозь поровые пространства (проницаемость). Пористость обычно выражается отношением объема пор (пустот) породы ко всему ее объему. Эта величина колеблется от более 50% в почвах, рыхлых осадках и пирокластических образованиях почти до нуля в кристаллических породах, залегающих на значительных глубинах (табл. 2.3). Эффективная пористость, определяемая сообщающимися порами (без учета изолированных пор, например газовых пузырьков*), представляет наибольший интерес для гидрогеологов и геологов-нефтяников.

Все пустоты (поры) могут быть подразделены на два основных типа: 1) мелкие пустоты, промежутки между минеральными зернами — межзерновые пространства; 2) более крупные, но редкие

Таблица 2.3. **Проницаемость и пористость горных пород**

Породы	Пористость, %	Проницаемость, см/с
Галечники, гравийники	25—45	$1—10^{-3}$
Тонкозернистые пески, алевриты	45—50	$10^{-3}—10^{-5}$
Глины, алевритовые глины	35—55	$10^{-5}—10^{-9}$
Песчаники	10—30	В эту группу попадают породы-коллекторы многих нефтяных месторождений
Известняки	5—25	

* Полости в магматической породе или в минерале, образованные газами при застывании пород.

полости — плоскости напластования, трещины отдельности и т. д. Большинство процессов диагенеза и эпигенеза *, происходящих после седиментации, в результате более тесной упаковки зерен, а также их цементации приводят к уменьшению порового пространства. В уже уплотненных породах, выведенных на земную поверхность и подвергающихся эрозии, развиваются обычно открытые трещины (как следствие уменьшения давления). Выветривание вызывает увеличение пористости, поскольку под его воздействием происходит дезинтеграция материала существовавшей ранее горной породы; особенно ощутимо эти процессы сказываются на известняках, растворение которых приводит к расширению имеющихся трещин.

Проницаемость пород может быть выражена скоростью, с которой флюиды (жидкость, газ) проходят сквозь породу в направлении гидравлического градиента; тем самым, проницаемость является главным фактором, определяющим оценку породы при добыче воды, нефти или газа. Коэффициент проницаемости K, или гидравлическая проводимость, определяется с помощью закона Дарси, который гласит, что $K=Q/(iA)$, где Q — расход флюида; i — гидравлический градиент; A — площадь поперечного сечения исследуемого образца. Породы, в которых трещин немного и межзерновые полости относительно малы, имеют низкую проницаемость. Глины, эвапориты, многие известняки и кристаллические породы на глубине относятся к категории слабопроницаемых. Более крупнозернистые осадочные породы, такие как песчаники и конгломераты, имеют более высокую проницаемость. К хорошо проницаемым относятся также известняки (становящиеся кавернозными в результате растворения или доломитизации) и большинство выветрелых или сильнотрещиноватых пород.

Скорость прохождения флюида по взаимосвязанным трещинам, особенно в известняках, где трещины могут быть расширены в процессе растворения, более значительна, чем скорость движения его через поровые пространства. Измерения проницаемости, проводящиеся в лабораториях пропусканием воды через образцы различных пород, показывают скорость ее прохождения сквозь мелкие поры. Полученные данные могут не соответствовать проницаемости исследуемых пород в природных условиях. Измерения скорости падения и последующего подъема (восстановления) уровня воды в скважинах, пробуренных на определенных расстояниях от скважины, из которой откачивается вода, дают более реальные представления о гидравлической проводимости, поскольку в этом случае учитывается пропускание жидкости сквозь трещины и фиксируются локальные изменения проницаемости.

---

* Диагенез — преобразование осадка в осадочную горную породу в процессе уплотнения и физико-химического уравновешивания среды. Эпигенез — вторичные минералогические и структурные изменения осадочных горных пород в совокупности с изменениями содержащихся в них флюидов (воды, нефти, газа); эпигенез наступает после завершения диагенеза.

2.5. ПОТОК ПОДЗЕМНЫХ ВОД

Подземные воды под воздействием напора движутся из районов с высоким потенциалом к районам с низким потенциалом, стекая (если использовать общепринятое выражение) с высокогорных участков к низменным. На небольших глубинах и в однородных породах линии тока в плане приблизительно перпендикулярны к изолиниям водного зеркала (гидроизогипсам). Вода опускается под возвышенностями и водоразделами и поднимается к долинам и лощинам, пересекающим водное зеркало. На более значительных глубинах вследствие высоких напоров вода стремится подняться вверх, так что атмосферные воды могут оказаться смешанными с погребенными водами, «выжимаемыми» в результате уплотнения пород, либо с ювенильными водами магматического происхождения.

Основные системы водной циркуляции всегда модифицируются в соответствии с особенностями геологического строения региона. Поток жидкости задерживается породами, имеющими низкую проницаемость, а линии тока отклоняются вблизи границ непроницаемых пород. Направление потока в пределах сильнотрещиноватых водоносных горизонтов определяется ориентировкой трещин, по которым протекает основная часть водной массы. В водоносных горизонтах, ограниченных водоупорами, поток жидкости направлен преимущественно параллельно напластованию, хотя, как правило, там есть некоторое просачивание сквозь прилегающие водоупоры в соседние водоносные горизонты.

Согласно закону Дарси скорость водного потока в водоносном горизонте зависит как от гидравлического напора, так и от способности водоносного горизонта пропускать жидкости. Открытые трещины в породах или крупные сообщающиеся поры в гравийно-галечных отложениях обеспечивают создание таких природных резервуаров, которые по форме и скорости потока почти не отличаются от поверхностных водотоков.

Направление и скорость миграции подземных вод могут быть определены различными способами. Прямые методы используют введение и прослеживание за перемещением красителя или какого-либо другого безвредного маркирующего вещества. Косвенные методы предусматривают математическое моделирование подземного потока относительно известных пунктов подпитывания и откачки грунтовых вод. С начала 1950-х годов широко использовалось наличие трития (^3H) в дождевой воде. В результате проведения термоядерных испытаний в 1950-х и в 1960-х годах было отмечено значительное возрастание концентрации трития в поверхностных, а затем и в подземных водах. Присутствие трития использовали для исследования скорости подпитывания водоносных горизонтов там, где пополнение запасов подземных вод обусловлено скорее просачиванием в грунт дождевой воды, нежели поступлением смешанных грунтовых вод из соседних водоносных пластов.

2.6. РАЦИОНАЛЬНОЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ВОДНЫХ РЕСУРСОВ

Поскольку существует тесная и достаточно сложная взаимосвязь между поверхностными и подземными водами, представля-

ется вполне естественным, что всякое изменение в поверхностных водах повлечет за собой изменения в грунтовых, и наоборот. Очевидно, что такие модификации могут быть вызваны самыми различными причинами. Так, изменения в выпадении атмосферных осадков обусловливают кратковременные колебания уровня грунтовых вод, в то время как продолжительные нарушения режима питания водосборных площадей приводят к изменению базиса эрозии.

Нарушения природного баланса, связанные с использованием водных ресурсов для обеспечения небольших городов и деревень, чаще всего оказываются незначительными, так как источниками воды в данном случае являются в основном реки, озера и неглубокие скважины. С другой стороны, современные города, население которых составляет миллион человек и более, используют в качестве водных ресурсов отдаленные источники, глубоко залегающие водоносные пласты или крупные резервуары. Что же касается сточных вод, то они в значительной степени загрязняют нижние участки дренажных систем либо сбрасываются прямо в море. Ниже описаны некоторые случаи, иллюстрирующие различный характер использования водных ресурсов.

2.6.1. АНГЛИЯ И УЭЛЬС

Ежедневное потребление воды населением таких высокоразвитых промышленных регионов, как Англия и Уэльс, на протяжении 30 лет возросло вдвое и к 1970 г. превысило 9 млрд. галлонов (около 41 млрд. л). При сравнительно благоприятном климате и достаточном количестве атмосферных осадков, которые свойственны Англии, она не должна испытывать недостатка в воде, однако следует отметить наличие в стране серьезных проблем, связанных с распределением водных ресурсов. Дело в том, что основная масса населения Англии сосредоточена в южных и восточных областях, в то время как бóльшая часть дождей выпадает в гористых западных местностях. К тому же приходится считаться с загрязнением рек ниже по течению от крупных промышленных центров.

В настоящее время 70—75% воды, потребляемой в Англии и Уэльсе, поступает из поверхностных вод и 25—30% — из подземных. Водоснабжение и очистка загрязненных вод организованы в Англии и Уэльсе по региональному принципу. Контроль за претворением их в жизнь осуществляется десятью Региональными управлениями водных ресурсов (РУВР), границы деятельности которых в общем совпадают с очертаниями природных водосборных бассейнов (рис. 2.3).

Система водоснабжения в Англии и Уэльсе определяется совместным использованием ресурсов поверхностных и подземных вод. В обычных условиях река обеспечивает запасы чистой воды пропорционально меженному стоку, который не превышает 10% от среднего стока. Расход многих рек Великобритании зарегулирован путем сооружения водохранилищ вблизи их верховьев. При выпа-

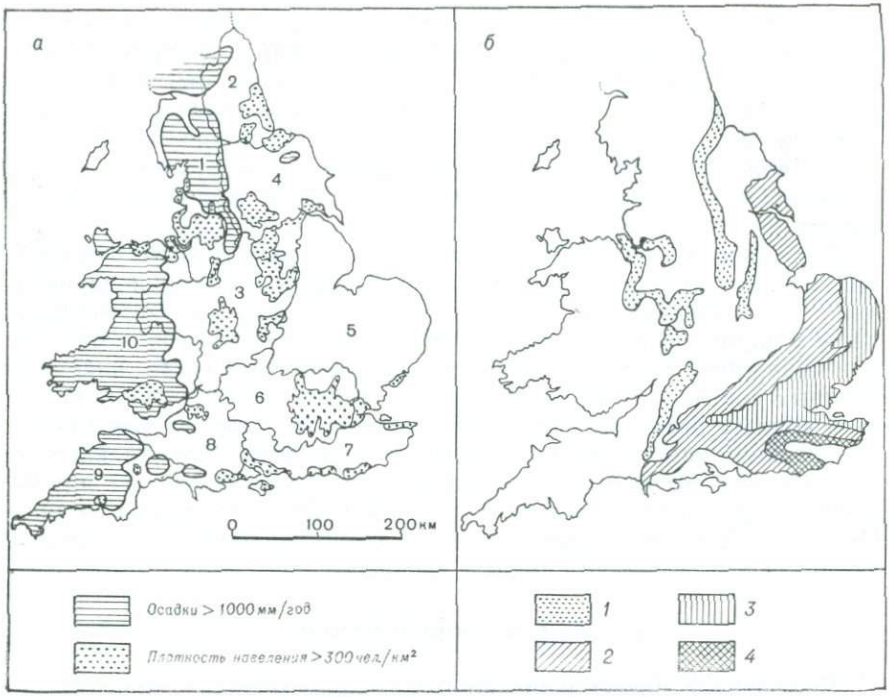


Рис. 2.3. Размещение водных ресурсов в Англии и Уэльсе.

а — взаимоотношения между территориями Региональных управлений водных ресурсов, районами с большим количеством атмосферных осадков и районами с высокой концентрацией населения.
Территории РУВР: *1* — Норт-Уэст, *2* — Нортумбриан, *3* — Северн-Трент, *4* — Йоркшир, *5* — Англиан, *6* — Темза, *7* — Саутерн, *8* — Уэссекс, *9* — Саут-Уэст, *10* — Уэльс (Национальное управление водных ресурсов).
б — главные водоносные горизонты.
1 — юрские известняки и триасовые песчаники; *2* — верхнемеловые породы; *3* — верхнемеловые горизонты в третичных глинах; *4* — нижнемеловые зеленые пески.

дении большого количества атмосферных осадков во́ды скапливаются в этих резервуарах для подачи их при засухе в дренажную систему. Применение такого метода позволяет, с одной стороны, увеличить запасы чистой воды, а с другой — избавиться от необходимости использовать дорогостоящие и малопривлекательные трубопроводы, предоставляя реке самой транспортировать аккумулированную воду. В низовьях многих рек, особенно Темзы в районе Лондона, имеются дополнительные хранилища, в которых вода проходит очистку и затем подается по трубам потребителю.

Воды речной сети смешиваются с подземными в водоносных горизонтах на различных этапах своего пути. Например, в районе Лондона вода, выкачиваемая из верхнемеловых отложений, используется для заполнения водохранилищ в засушливые периоды, а вода, поступающая из поверхностных источников, употребляется для подпитывания водоносных пластов, когда это позволяет наличие ресурсов. Основной недостаток такой системы водоснабжения

связан с необходимостью иметь крупные водохранилища как в гористых местностях (Уэльс и Пеннины), так и в низменных областях, где уже не хватает земли и для сельского хозяйства, и для жилищного строительства.

Вода нижних течений рек, протекающих через густонаселенные районы, содержит значительную примесь обработанных сточных вод. Приемлемое качество такой воды обеспечивается очисткой сточных вод на всем протяжении реки. Хотя бактериальное заражение воды может быть почти полностью ликвидировано стандартными методами, в том числе путем окисления органических отходов, однако целый ряд вредных примесей (нитраты, остающиеся от удобрений; синтетические очистители; тяжелые металлы, используемые в промышленных процессах) являются довольно стойкими. Если не обрабатывать их должным образом в местах сброса, они могут загрязнить воду до такой степени, что сделают ее непригодной для питья, а в худшем случае приведут к гибели растений, рыб и насекомых. В 1973 г. считалось, что большинство крупных рек Великобритании содержало в верховьях питьевую воду высокого качества, однако нижние течения Трента и других рек были настолько загрязнены, что фауна и флора в этих районах не могли нормально существовать. Кардинальные меры по восстановлению качества воды Темзы дали ощутимые результаты в конце 1970-х годов, когда там вновь появились различные виды речных рыб.

Подземные воды добывают, как правило, общепринятыми методами — путем бурения многочисленных мелких скважин в аллювиальных и ледниковых отложениях, а также в нескольких основных водоносных горизонтах, залегающих в различных толщах мезозойского и третичного возраста. Бóльшая часть палеозойских отложений Великобритании имеет настолько высокую плотность, что содержание в них сколько-нибудь значительных запасов воды исключено.

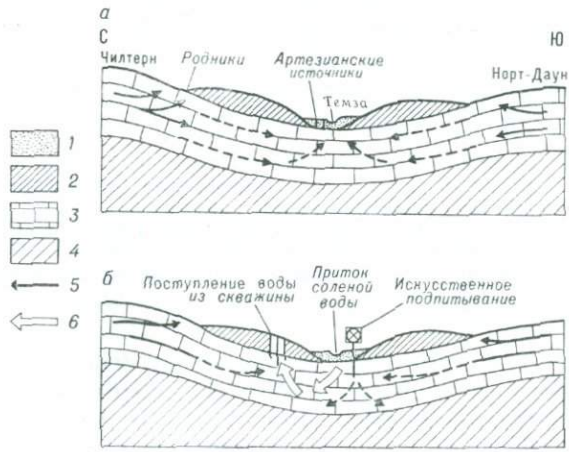


Рис. 2.4. Водные ресурсы Лондонского бассейна в верхнемеловых отложениях.

а — естественные условия потока грунтовых вод на участках водоносных горизонтов, не ограниченных (сплошные стрелки) и ограниченных (штриховые стрелки) водоупорами; *б* — влияние деятельности человека на изменение водных ресурсов (нижние водоносные пласты — зеленые пески нижнего мела — в целях упрощения схемы на рисунке не показаны).

1 — аллювиальные отложения; *2* — эоценовый водоупор (формация лондонских глин); *3* — верхнемеловой водоносный горизонт; *4* — нижнемеловой водоупор и подстилающие слои; *5* — потоки пресных вод; *6* — потоки соленых вод.

Артезианские условия обеспечиваются в Лондонском бассейне, где водоносные пласты, залегающие в толщах верхнего мела и зеленых песков мелового возраста, приурочены к широкой синклинали и ограничены сверху и снизу глинистыми водоупорами (рис. 2.4). Напор воды, поддерживаемый уровнем водного зеркала в поверхностных выходах верхнемеловых пород на холмах в Норт-Дауне и Чилтерне, был в прошлом достаточен для обеспечения фонтанов на Трафальгарской площади, однако в результате интенсивной откачки давление понизилось и в 1965 г. пьезометрический уровень грунтовых вод оказался на 80 м ниже среднего уровня моря. Эти изменения привели также к притоку соленых вод в верхнемеловые водоносные горизонты. Водный баланс поддерживается в какой-то степени благодаря искусственному подпитыванию этих горизонтов.

2.6.2. ПОЛУАРИДНЫЕ И АРИДНЫЕ РЕГИОНЫ

Австралия характеризуется низким среднегодовым уровнем атмосферных осадков. Хотя большинство ее населения (80%) сконцентрировано в сравнительно хорошо обводненных прибрежных районах, на засушливых внутренних территориях должны обеспечиваться водой многочисленные стада овец и крупного рогатого скота, а также разбросанные населенные пункты, главным образом фермы и рудничные поселки. Вода для крупных городов Восточной Австралии транспортируется часто на большие расстояния по трубам из водохранилищ, расположенных в гористых местностях. Сооружение этих водохранилищ требует значительных финансовых затрат. Большой Артезианский Бассейн, где главные водоносные горизонты сложены мезозойскими песчаниками, обеспечивает поступление грунтовых вод из глубоких скважин на обширные территории внутренних районов страны.

Ценность водных ресурсов в полуаридных регионах снижается из-за высокой концентрации в воде растворенных солей, содержание которых может превысить уровень, приемлемый для орошения земель и поения скота (см. табл. 2.1). Для пополнения природных водных ресурсов используются опреснительные установки, действующие главным образом в областях распространения соленых подземных вод. В планах на будущее предусматривается объединение существующих систем с термальными или атомными опреснителями, перерабатывающими морскую воду для различных нужд городов.

Проблема пополнения водных ресурсов особенно остро стоит для стран Ближнего и Среднего Востока, где быстрый рост нефтедобычи сопровождается расширением строительства. Поверхностные, а также близповерхностные грунтовые воды, часто захватывающие соли из эвапоритовых отложений, пополняются в некоторых районах водами из глубоких водоносных горизонтов. Нубийский песчаник — верхнемезозойская аллювиальная формация, подстилающая обширные территории Ливии, Египта и Синайского полуострова, является хорошим водоносным горизонтом. Однако судя по данным исследований, проведенных на Синайском полуострове, бóльшая часть воды в этом горизонте отно-

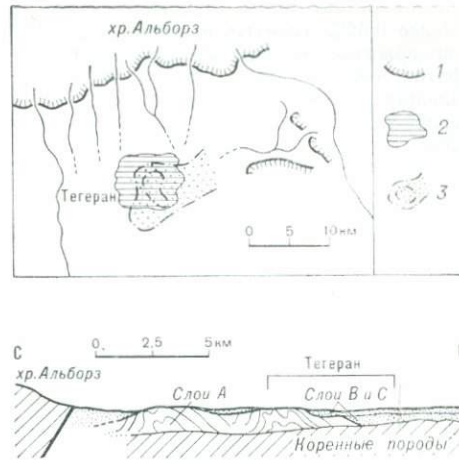


Рис. 2.5. Водные ресурсы в аридных (засушливых) областях. Схема и разрез в районе города Тегеран.

1 — границы возвышенных областей; *2* — район Тегерана, ограниченный чертой города; *3* — участки распространения подземных вод с концентрацией растворенных веществ 0,07% (по данным Дж. Л. Нилла и К. С. Джонса [1968 г.]).

сится к плювиальному периоду*, который был 30 тыс. лет назад. В связи с такой гипотезой уместно задать вопрос: может ли естественная подпитка при современных климатических условиях обеспечить восполнение воды, ушедшей из природных резервуаров в результате откачиваний?

Столица Ирана Тегеран снабжается водой из объединенной системы поверхностных и подземных вод. Вода поступает по водоводам из р. Карай, протекающей приблизительно в 40 км к западу от города, где благодаря мощной плотине, строительство которой было закончено в 1960-х годах, образовалось водохранилище. Подземные воды поступают из мощных аллювиальных отложений, представленных гравийно-галечным и обломочным материалом. Источником сноса является находящийся к северу от Тегерана хр. Альборз, испытавший поднятие в недавнее время (рис. 2.5). Аллювий плохо отсортированный и неравномерно цементированный, причем цементом иногда служит гипс; пористость этих отложений составляет не менее 24%.

Из-за наличия многочисленных прослоев с более низкой проницаемостью движение воды вкрест напластования довольно ограниченное. Поток грунтовых вод, идущий согласно напластованию, направлен в основном к югу от фронта гор. Воды поступают в аллювий по руслам нескольких постоянно текущих рек и ряда небольших речек с перемежающимся стоком. Эта картина, однако, усложняется в результате структурных нарушений и колебаний водопроницаемости. Самые нижние слои *A* (по-видимому, плиоценового возраста) смяты в складки широтного простирания. Водным потокам, текущим в вышележащих слоях *B* и *C* (от плиоценовых до современных), препятствуют хребты, соответствующие частично эродированным антиклинальным складкам.

---

* Дождливый период; термин используется при характеристике послеледниковых колебаний климата (чередование плювиальных периодов с засушливыми).

Поверхностные воды, стекающие с гор, имеют щелочной состав, но содержат менее 0,02% твердых веществ. В грунтовых водах, находящихся под городом, содержится более 0,1% растворенных веществ, в том числе хлоридов и сульфатов, образовавшихся из эвапоритов в аллювиальных отложениях. Воды из аллювия добывают обычным восточным способом — сооружают горизонтальные галереи (так называемые канаты), прорывая их в наклонных частях аллювиальных наносов до пересечения с водным зеркалом. Эта система дает 22—24 млн. м^3 воды ежегодно, откачка воды из буровых скважин и колодцев обеспечивает примерно столько же. Если эти цифры сопоставить с объемом естественного притока грунтовых вод в аллювиальных отложениях Тегерана, составляющим 60—70 млн. м^3 ежегодно, станет ясно, что современные источники подземных вод могут дать в будущем только весьма ограниченные дополнительные водные ресурсы.

3. ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ РЕСУРСЫ

3.1. РЕСУРСЫ ВОЗОБНОВЛЯЕМЫЕ И НЕВОЗОБНОВЛЯЕМЫЕ

До промышленной революции бóльшая часть энергетических потребностей человека удовлетворялась за счет источников, которые в основном считались восполнимыми; такими источниками служили деревья и другие растения, животные, а также энергия воды,

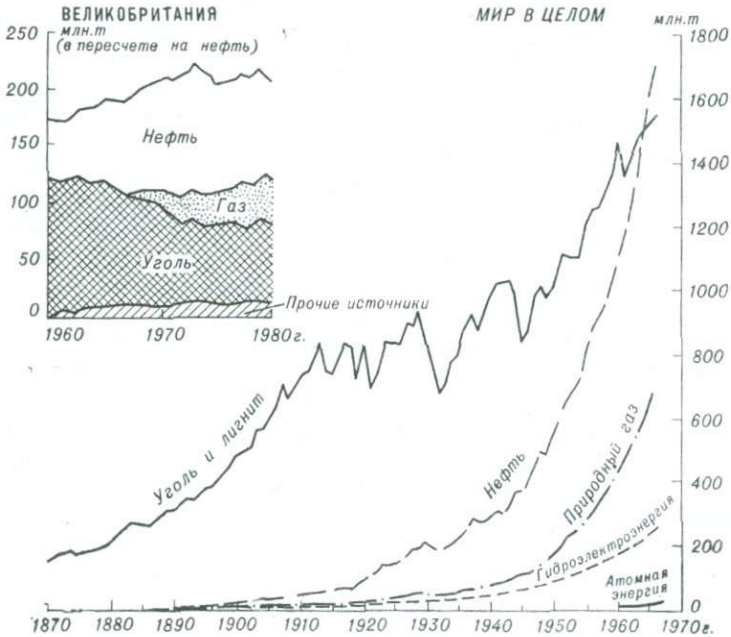


Рис. 3.1. Рост потребления энергии (по статистическим данным Великобритании).

На врезке показана относительная доля основных источников энергии в общем энергетическом комплексе Великобритании.

Таблица 3.1. Источники энергии

Источники	Виды энергии и источников
Возобновляемые	Солнечная энергия. Гидроэнергия (энергия рек, волн, приливов). Сила ветра. Геотермальная энергия. Органические вещества
Невозобновляемые (горючие ископаемые)	Твердое топливо (ископаемые угли, битуминозные сланцы и песчаники). Жидкое топливо (нефть). Природный газ. Атомная энергия

ветра и солнца. В развивающихся странах и сейчас в основном используются те же источники энергии. Длительная эксплуатация таких ресурсов повлекла за собой значительные изменения в природном равновесии; например, вырубка лесов привела к обезлесению огромных территорий.

Гигантский рост энергетических расходов в последние два века оказался возможным благодаря использованию горючих ископаемых: угля, нефти и природного газа. Общее потребление этих веществ (применяющихся не только в качестве горючих материалов, но и как сырье для химической промышленности) возросло втрое в первую половину XX столетия (1900—1950 гг.) и еще раз приблизительно утроилось за его третью четверть, т. е. к 1975 г.

Горючие ископаемые, составляющие в настоящее время более 90% всех энергетических запасов планеты, представляют собой невозобновляемые ресурсы. Хотя мы не располагаем полными данными о тех их количествах, которые к настоящему времени остались в земных недрах, большинство специалистов пришли к выводу, что при современных темпах потребления эти источники будут исчерпаны в лучшем случае за несколько столетий. Сопоставление жизненного уровня и потребления энергии (см. рис. 1.1) позволяет предполагать, что мировая потребность в различных ресурсах возрастает (рис. 3.1). Эти соображения, согласно которым коренные изменения в применении различных видов энергетического сырья в ближайшие 50 лет могут оказаться неизбежными, стимулировали исследования по проблемам использования ядерного горючего и восполнения возобновляемых энергетических ресурсов. В табл. 3.1 приведены данные по основным природным ресурсам, доступным для эксплуатации в настоящее время либо поддающимся переработке.

3.2. ГИДРОЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ ЭНЕРГИЯ

Энергия воды, текущей под действием силы тяжести, служила на протяжении столетий для приведения в движение колес водя-

ных мельниц и других агрегатов; ныне она используется в значительно более широких масштабах, в том числе для вращения турбин гидроэлектростанций (ГЭС). Гидроэлектрическая энергия, вырабатываемая таким способом, составляет 5—10% современного производства энергии. Вода из водохранилищ, сооружаемых на реках, поступает к генераторам ГЭС, расположенных ниже по течению; при этом напор воды и ее объем определяют выработку энергии.

Потенциальные возможности гидроэнергетических систем зависят от количества атмосферных осадков, размеров водосборной площади и наличия благоприятных мест для сооружения плотин и ГЭС. Большинство крупных энергосистем сосредоточено в возвышенных областях с высоким среднегодовым уровнем атмосферных осадков либо у их границ, а также вблизи быстрин и водопадов в нижних течениях таких крупных рек, как Вольта, Нил или Замбези. Геологические аспекты создания гидроэнергосистем связаны с сооружением водохранилищ и выбором надежных участков под плотины.

3.3. ГЕОТЕРМАЛЬНАЯ ЭНЕРГИЯ

Тепловой поток, идущий из земных глубин, составляет на поверхности Земли в среднем менее 0,1 Вт/м^2. Тепловой поток может служить практическим источником энергии только при аномально высоких его значениях. Геотермический градиент в различных регионах изменяется от 10°С/км в пределах древних континентальных кратонов до 40°С/км и более в областях недавней либо современной вулканической деятельности. Более высокие значения теплового потока зарегистрированы в районах активной циркуляции водных потоков, переносящих тепло из глубин к поверхности Земли, и в непосредственной близости от магматических очагов, где геотермический градиент вблизи земной поверхности может превышать 100°С/км.

Источниками геотермальной энергии чаще всего служат природные горячие воды или пар, которые могут применяться для непосредственного обогревания зданий либо для получения электроэнергии. Присутствие коррозионных геотермальных растворов создает при этом целый ряд трудностей. Системы горячих маловодообильных горных пород, в которых тепло передается на глубине нескольких километров, также могут найти практическое применение. Использование тепловых энергетических ресурсов лимитируется геологическими факторами, так как необходимые условия для эксплуатации этих ресурсов имеются практически только в вулканически активных регионах. Бóльшая часть тепловой энергии в Исландии поступает именно из этого источника. Для Новой Зеландии (Северный остров) и Италии эта доля составляет соответственно 11 и 3%. Используют геотермальную энергию также США (в штате Калифорния), государства Центральной и Южной

Америки, Советский Союз. Многие страны, расположенные в пределах Тихоокеанского вулканического пояса и Африканской рифтовой системы, по всей вероятности, станут применять ее в будущем.

Исландия — страна, не имеющая горючих ископаемых, — расположена исключительно удачно с точки зрения использования геотермальной энергии, поскольку она ориентирована вкрест простирания Срединно-Атлантического хребта в районе активного разрастания морского дна. На территории, ограниченной полосой 100-километровой ширины и включающей срединно-океанический хребет, периодически происходят излияния лав из трещин и центральных жерл. Геотермический градиент в пределах этой полосы достигает 100°С/км и уменьшается симметрично по обе стороны от нее. Перенос природного тепла в районе Срединно-Атлантического хребта определяется значениями порядка 55—60 МВт/км². Термальные флюиды, нагревающиеся в контакте с лавами до 200—300°С на глубине несколько километров, улавливаются вблизи земной поверхности и используются для производства электроэнергии. Они также направляются по трубам непосредственно в Рейкьявик для подачи тепла на заводы, в жилые дома и оранжереи.

В Италии геотермальная энергия поступает в основном из Лардарелло — местности, расположенной на севере страны. Пар, поднимающийся из земных недр, здесь использовался уже несколько столетий назад для получения борной кислоты. В этом районе нет действующих вулканов, наблюдаются только фумаролы. Предполагается, что причиной этой термальной аномалии послужило молодое интрузивное тело, находящееся на значительной глубине.

Природный пар, выходящий на поверхность под давлением 25 бар при температуре почти 200°С, содержит значительное количество ювенильных флюидов и обладает высококоррозионными свойствами, что определяется химическим составом растворенных в нем веществ. Следует упомянуть, что именно в этом паре впервые на Земле был обнаружен гелий (установленный до этого при исследовании солнечного спектра).

Менее интенсивные источники геотермальной энергии встречаются вдали от районов активного вулканизма. Например, в Великобритании выявлены две зоны с относительно мощным тепловым потоком; потенциальные возможности термальных аномалий внутри этих зон изучаются (рис. 3.2). В Юго-Западной Англии локальный источник тепла, который может быть использован в

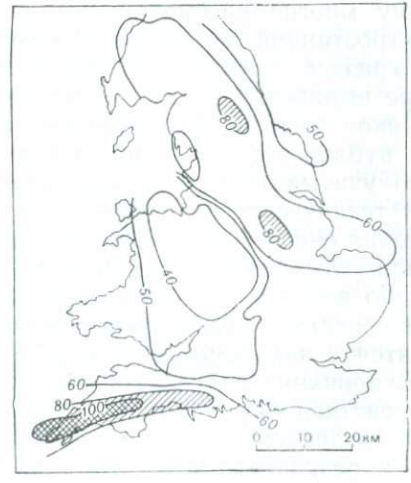


Рис. 3.2. Тепловой поток на территории Англии и Уэльса.

Выделены районы, в пределах которых можно использовать геотермальную энергию (сравнительно маломощную).
Изолинии теплового потока даны в микроваттах на квадратный метр.

системе маловодообильных горячих пород, установлен в герцинских гранитах, обогащенных радиоактивными элементами — калием, ураном, торием.

Теплые источники Бата сделали этот английский городок здравницей еще во времена Римской империи. Выходы горячих источников в центральных, южных и восточных районах Англии расположены в осадочных бассейнах мезозойского — третичного возраста или приурочены к их границам. Нагрев подземных вод в этих регионах может быть связан отчасти с глубоким залеганием их источников, отчасти — с поступлением тепловых потоков из домезозойского фундамента. Хемпширский осадочный бассейн во многих отношениях напоминает Парижский, который является поставщиком тепловой энергии, идущей на обогревание зданий в парижских предместьях. Однако медленное восстановление использованной энергии в этом районе может привести к отказу от применения таких энергетических источников как недостаточно экономичных.

3.4. ЯДЕРНОЕ ТОПЛИВО

Радиоактивный распад урана, тория и других элементов — основной источник тепловой энергии в земной коре. Процессы, связанные с расщеплением атомного ядра, использовались для получения энергии со времени второй мировой войны. Мгновенное высвобождение внутриядерной энергии воплощается во взрывы атомных бомб; управляемые же процессы расщепления атомных ядер в реакторах делают возможным использование этой энергии в мирных целях — для промышленных и бытовых нужд.

В настоящее время в 20 странах мира, главным образом Европы и Северной Америки, действуют около 200 промышленных реакторов. В 1976 г. около 10% электроэнергии, потреблявшейся в Великобритании, было получено на атомных электростанциях. Поэтому многие рассматривают строительство атомных заводов и электростанций как основное средство преодоления энергетического кризиса, наступление которого представляется неизбежным по мере выработки горючих ископаемых, т. е. исчерпания обычных источников энергии. Развитие атомной энергетики является предметом публичных дискуссий, возникающих в связи с необходимостью учитывать как ее несомненные экономические преимущества и технические возможности, так и потенциальную опасность заражения окружающей среды радиоактивными веществами.

Масштабы безопасного использования атомной энергии, которые рано или поздно будут определены, а также характер технических средств, применяемых при ее производстве и эксплуатации, находятся в зависимости от проблем, связанных с возможностью контролирования случайных утечек радиоактивных материалов, с совершенствованием методов обезвреживания радиоактивных отходов, сведением до минимума рассеивания радиоактивных веществ в результате возможных актов саботажа или террористи-

ческих действий и, наконец, с установлением контроля над ядерным оружием.

Главное сырье, необходимое для производства атомной энергии путем расщепления ядер, это уран. Его изотоп уран-235 легко расщепляется; более распространенный изотоп уран-238 неделим, но может быть превращен в короткоживущий расщепляемый элемент плутоний-239. Поэтому в реакторах используется либо уран, искусственно обогащенный изотопом уран-235, либо плутоний-239. В реакторах на быстрых нейтронах применяется процесс превращения урана в плутоний. Плутоний, содержащийся в отработанном атомном сырье, может быть извлечен из него повторно, однако многие другие радиоактивные элементы, образующиеся в реакторах, превращаются в конечном итоге в отходы, для которых должны создаваться безопасные хранилища.

Поскольку уран является природным сырьем для получения атомной энергии, он оказался объектом интенсивных поисков и разведки в течение последних десятилетий. Благодаря большой ценности урана горные породы даже со сравнительно невысокими его концентрациями считаются, как было показано в табл. 1.3, потенциальными рудными телами. Главные минералы урана — уранинит и урановая смолка (настуран), имеющие общую формулу $U^{4+}O_2^{2-}$. Из урансодержащих минералов следует назвать также коффинит (гидросиликат урана); существуют и другие, хуже диагностируемые, природные соединения урана. Окисленные «желтые продукты» — карнотит и уранофан — дают характерные пятнистые образования вокруг скоплений урановых руд.

Методы поисков урана основаны главным образом на радиоактивных свойствах этого элемента. Спектрометры, регистрирующие выделение радиоактивных частиц в воздухе или на земной поверхности, могут быть использованы (с некоторыми оговорками) для выявления повышенных концентраций урана и исследования аномалий, обнаруживаемых при обычных геохимических рекогносцировках.

Основной объем мировой продукции базируется на уране, добываемом из осадочных пород. Источниками урана в этих породах являются скопления обломочных минералов либо вещества, осаждающиеся из урансодержащих грунтовых вод. Чтобы понять генезис этих залежей, необходимо учитывать, что уранинит и другие минералы, в которых содержится четырехвалентный уран, легко разлагаются в окислительной обстановке. Поэтому в процессе выветривания горных пород уран освобождается, а затем переотлагается грунтовыми водами и гидротермальными растворами.

Все урановые месторождения, связанные с россыпями, имеют раннепротерозойский возраст ($\geqslant$2 млрд. лет). По данным некоторых специалистов, они были сформированы в тот период, когда благодаря низкому содержанию кислорода в атмосфере уранинит и урановая смолка почти не разрушались при выветривании и накапливались вместе с другими тяжелыми минералами. Наиболее крупные месторождения такого генезиса приурочены к системе

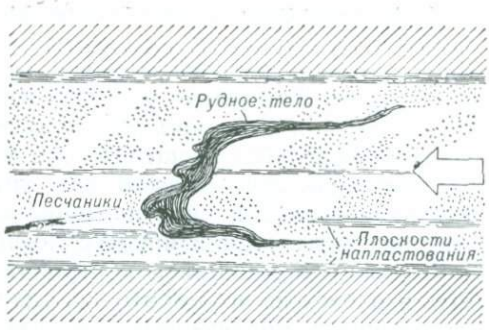


Рис. 3.3. Урановое рудное тело (разрез).

Характерная форма залегания урановых руд в песчаниках — рудный «ролл-фронт», образованный минерализованными растворами, направление которых показано стрелкой в правой части рисунка. Мощность таких рудных тел достигает **нескольких метров.**

Витватерсранд в Южной Африке, а также к комплексу Гурон в районе Канадского щита. В бассейне Блайнд-Ривер (Онтарио, Канада) уран сконцентрирован в маломощном базальном галечном горизонте толщи лоренских кварцитов, залегающем несогласно на выветрелой поверхности архейских гранитов. Рудная зона, сопровождающая это несогласие, прослеживается в виде слоя желтоватого цвета мощностью около 1 м на площади в несколько сотен квадратных километров. В пределах зоны выявлены отчетливо выраженные урановые аномалии, которые регистрируются спектрометрами и фиксируются на геохимических картах.

Уран, переносимый в растворенном виде циркулирующими водами, может концентрироваться в проницаемых осадочных породах на восстановительных барьерах — там, где присутствует органическое вещество либо изменяется геохимическая обстановка. Более 90% текущей продукции урана в США основано на разработке месторождений такого типа. Наиболее важные из них приурочены к континентальным красноцветным отложениям от мезозойского до третичного возраста на плато Колорадо, на территории Юты и соседних штатов, где рудный материал осаждался в проницаемых песчаниках, главным образом на растительных остатках либо в виде рудных скоплений типа «ролл-фронт»* (рис. 3.3.).

В засушливых районах Западной Австралии и Юго-Западной Африки известковые корки (калькреты), отложившиеся из насыщенных грунтовых вод, иногда оказываются урановосными, а именно на тех участках, где в коренных породах отмечаются необычно высокие концентрации урана.

3.5. ГОРЮЧИЕ ИСКОПАЕМЫЕ. НЕФТЬ И ГАЗ

3.5.1. ВВЕДЕНИЕ

Горючие ископаемые — нефть и природный газ, использование которых лежит в основе развития индустрии на протяжении по крайней мере двух последних столетий (см. рис. 3.1), образовались из различных форм органического вещества, захороненного в древних осадках. В тех случаях, когда осуществлялось полное окисление, органическое вещество разлагалось в верхних слоях

* Рудные тела урана либо ванадия S- или С-образной формы в поперечном сечении среди осадочных пород, в основном песчаников.

аккумулированной массы осадков. Когда же окисление было неполным, часть органического вещества сохранялась в породах в виде различных соединений (углеводов, белков, липидов). Сгорание их в присутствии кислорода завершает процесс окисления, протекающего с выделением большого количества энергии.

Генезис и свойства двух основных видов горючих ископаемых — нефти и природного газа, с одной стороны, и угля, с другой — совершенно различны. Нефть и газ представляют собой сложную смесь различных углеводородных соединений, образовавшихся в основном из органического вещества, которое накапливалось в седиментационных, чаще всего морских, бассейнах. Жидкие и газообразные углеводороды, генерированные рассеянным органическим веществом, сравнительно легко мигрируют по проницаемым породам и собираются в природных ловушках, которые могут располагаться на значительном расстоянии от места их генерации. Угольные же скопления формируются в основном из наземных, в том числе болотных, растений и остаются на месте своего образования, залегая преимущественно в континентальных осадочных породах.

3.5.2. ГЕОЛОГИЧЕСКАЯ ОБСТАНОВКА

Углеводороды нефтяных и газовых залежей образовались по большей части в мелкозернистых нефтегазоматеринских осадках: илах, глинах, мергелях, карбонатах и др. Породы, способные аккумулировать значительные количества мигрирующих в них нефти и газа, получили название природных резервуаров или коллекторов. Наиболее распространенные коллекторы представлены главным образом песчаниками и карбонатами.

Небольшие скопления углеводородов имеются в отложениях докембрийского возраста, хотя промышленные нефтяные залежи там не обнаружены. Некоторые крупные месторождения нефти и газа, например в провинции Альберта в Канаде, связаны с палеозойскими коллекторами; источники этих углеводородов, по всей вероятности, имеют также палеозойский возраст *, хотя более 80% добываемой здесь в настоящее время нефти поступает из мезозойских и третичных отложений.

Преобладание относительно молодых по возрасту скоплений углеводородов обусловлено, по-видимому, как переформированием более древних их залежей, так и более полным преобразованием материнского органического вещества. Некоторые газообразные углеводороды, особенно метан, обнаружены среди летучих продуктов вулканической деятельности. Однако эти источники неорганического происхождения не играли практически никакой роли при формировании известных месторождений нефти и газа.

---

* Наиболее крупные нефтяные месторождения Великих равнин Канады связаны с девонскими рифами, приуроченными к впадине Эдмонтон (Западная Альберта).

Органическое вещество, захороненное в потенциально нефтегазоматеринских осадочных горных породах, образовалось, вероятно, из продуктов распада планктонных организмов (которые в огромных количествах скапливались в поверхностных слоях вод морей и крупных озер) в условиях недостаточного доступа кислорода. Эти растительные и животные остатки захороняются в осадках в виде бесформенной массы — смеси различных органических соединений, получившей название «сапропель».

Углеводороды, образовавшиеся в пресноводной среде, обычно остаются в материнских породах; получаются битуминозные или горючие сланцы (нефть извлекается из них перегонкой). Битуминозные сланцы встречаются в отложениях верхнего карбона Мидленд-Вэлли (Шотландия), а также в США на территории штатов Вайоминг, Юта, Колорадо, где они приурочены к эоценовой формации Грин-Ривер, сложенной осадками огромного озера, которое возникло в период воздымания Скалистых гор. Эти месторождения к 2000 г. смогут давать ежедневно до 160 тыс. т нефти.

В морской среде анаэробные условия, необходимые для формирования сапропеля, обусловлены, с одной стороны, высокой биологической продуктивностью поверхностных слоев воды, а с другой — особенностями бассейнов, в которых циркуляция обогащенных кислородом вод ограниченна. Например, в настоящее время дно Черного моря частично покрыто богатыми органическим веществом черными илами, которые отлагаются в анаэробных, застойных условиях, получивших название эвксинных (от древнегреческого наименования Черного моря — «Понт Эвксинский»).

Нефтематеринские породы на многих месторождениях аккумулировались за рифовыми и другими барьерами либо в узких желобах, возникших в результате рифтообразования или глыбовых дислокаций. Например, мезозойские нефтеносные бассейны, окаймляющие западное побережье Африки, сформировались, по всей вероятности, в то время, когда на месте Атлантического и Индийского океанов существовали только узкие моря, протянувшиеся вдоль континентальных окраин.

Органическое вещество, захороненное в последовательно отлагавшихся слоях осадков, в условиях непрерывного их погружения претерпевает (наряду с вмещающими породами) катагенетические изменения *. При постепенном повышении температуры и давления в нем начинаются процессы образования жидких и газообразных углеводородов, которые обособляются от материнского вещества. Процессы формирования углеводородных соединений в основном идут в диапазоне температур от 40 до 150°С **. Таким образом, ко-

* При катагенезе происходит уменьшение массы рассеянного органического вещества вследствие потери летучих компонентов, остаточное обуглероживание и постепенное преобразование его молекулярной структуры.

** Работами советских геологов установлено, что в интервале температур от 80—90 до 150—170°С особо интенсифицируются процессы генерации углеводородов. Этот этап получил название главной фазы нефтеобразования (ГФН). В главную фазу обычно происходит массовая эмиграция углеводородов из материнских пород.

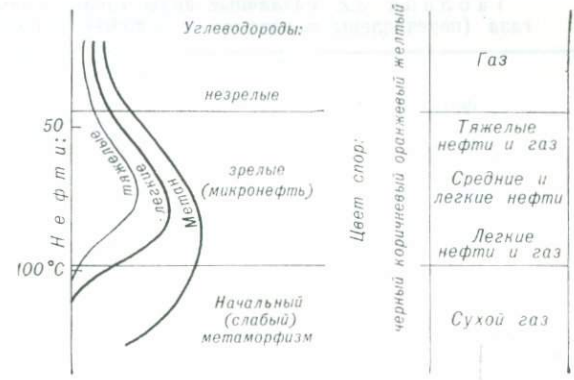


Рис. 3.4. Созревание углеводородов.

В левой части рисунка показаны максимальные температурные пределы нефтеобразования.

личество генерированной нефти контролируется геотермическим градиентом и скоростью погружения осадков.

Поскольку для достижения оптимальной температуры нефтеобразования материнское органическое вещество должно погрузиться на глубину нескольких километров, в бассейнах со сравнительно маломощными осадками генерируются только небольшие количества нефти. С другой стороны, слишком быстрое погружение осадков либо погружение в районах с особенно высоким геотермическим градиентом может привести к тому, что нефтематеринские породы, минуя критическую зону, окажутся в области очень высоких температур, при которых органическое вещество подвергается глубокой деструкции.

Ход этих процессов определяет глубину экономического предела, ниже которого нельзя ожидать промышленных нефтяных скоплений. Такие залежи нефти редко встречаются глубже 6—7 км, хотя метан может генерироваться на бóльших глубинах в результате природного полукоксования углей. Некоторое представление о температурах, при которых проходило преобразование тех или иных осадочных пород, можно получить на основании изучения комплекса диагенетических минералов, а также по видоизменениям сравнительно инертных спор (рис. 3.4).

3.5.3. ХИМИЯ НЕФТИ И ГАЗА

Природные флюиды нефтяного ряда представляют собой смеси многих органических соединений, которые можно условно подразделить на битумы (настолько вязкие, что они практически лишены текучести), нефть и природный газ. Такие их свойства, как плотность, вязкость и температура начала кипения, довольно плавно изменяются от сравнительно высоких значений, характерных для битумов, до более низких, свойственных нефтям (табл. 3. 2).

Углеводороды, как следует из самого слова, состоят исключительно из углерода и водорода, связанных между собой так, что они образуют несколько основных молекулярных типов. Другие органические соединения нефти кроме этих элементов содержат

Таблица 3.2. **Различные виды топлива, получаемого из нефти и газа** (перечислены в порядке повышения температуры начала кипения)

Фракции	Температура начала кипения, °С	Плотность, г/см³	Хранение и применение
Природный газ (чаще всего метан CH_4)	—	—	Транспортируется по трубопроводам непосредственно от газовых месторождений либо перевозится в сжиженном виде; используется для промышленных и бытовых нужд, а также на электростанциях
«Баллонный газ» (главным образом бутан C_4H_{10})	0—10	—	Может храниться в сжиженном виде в стальных контейнерах при умеренном давлении; используется в основном для бытовых нужд
Легкие дистилляты нефти	<160	0,74	Бензин (газолин) для автомобилей и авиабензин для самолетов с поршневыми двигателями
Средние дистилляты нефти	160—350	0,80	Керосин (в Англии — «парафин») и другие соединения, дающие дизельное топливо, горючее для реактивных самолетов, промышленных и бытовых паровых котлов; используются также на электростанциях
Тяжелые остаточные фракции нефти	>350	0,83—0,95	Тяжелое жидкое топливо (мазут и др.); используется на кораблях, в промышленных паровых котлах, на электростанциях
Твердые парафины	—	—	Используются для бытовых нужд

серу, азот и кислород; в малых количествах присутствуют также хлор, ванадий, никель, мышьяк и другие металлы. Многие из этих микрокомпонентов оказываются вредными примесями к нефтепродуктам, и их приходится удалять в процессе переработки нефти.

В нефти присутствуют три основных класса углеводородов: парафиновые, нафтеновые и ароматические (рис. 3.5).

Парафиновые углеводороды (алканы), содержащие максимально возможное количество водорода (предельные углеводороды), образуют молекулы с нормальными (неразветвленными) либо с разветвленными углеводородными цепями. Формула гомологического ряда парафиновых углеводородов — C_nH_{2n+2}. Метан CH_4, в котором все четыре валентности углерода насыщены четырьмя атомами водорода, можно считать начальным соединением этого ряда. Этан C_2H_6 характеризуется наличием углеродной цепи с двумя атомами углерода. Высшие члены ряда с более длинными цепями могут существовать в виде изомеров, различа-

ющихся количеством и расположением боковых цепей. Ненасыщенные аналоги предельных углеводородов (олефины), характеризующиеся более низкими значениями отношения водорода к углероду и наличием двойных связей между некоторыми соседними атомами углерода, образуются в результате ряда промышленных процессов; они могут превращаться в предельные углеводороды путем присоединения атомов водорода.

Моноциклические нафтены, или циклопарафиновые углеводороды (цикланы), имеют общую формулу C_nH_{2n}. Их структуру можно представить как парафиновую цепь, в которой два концевых атома углерода образуют замкнутый цикл (петлю) вследствие удаления по одному атому водорода на каждом конце цепи. Циклогексаны имеют шестичленное кольцо атомов углерода, а циклопентаны — пятичленное. При этом циклы как того, так и другого типа могут «обрастать» нормальными или разветвленными боковыми цепями.

Основу структуры ароматических углеводородов (общая формула C_nH_{2n-6}) составляет бензольное кольцо (или ядро) C_6H_6, в котором каждый атом углерода имеет двойную и одинарную связи с соседними атомами углерода. Ненасыщенные углеводороды такого типа встречаются в природе, а также могут быть получены искусственным путем из нафтенов в процессе дегидрогенизации.

Структурные изомеры углеводородов имеют одинаковое число атомов, но расположены они в различных сочетаниях.

Рис. 3.5. Состав и структура углеводородов.

К неуглеводородным соединениям нефти и природного газа относятся те, которые имеют в своем составе серу и азот *. Содержание серы в нефтях колеблется от 1 до 5%, причем сернистость нефтей в разных месторождениях различна. В легких нефтяных фракциях сера может присутствовать в виде растворенного сероводорода (H_2S); в тяжелых фракциях, где содержится основная часть серы, этот элемент может быть связан с углеродными цепями или кольцами. Азот встречается в свободном (несвязанном) виде в природном газе; в нефти он, как правило, входит в состав ациклических (состоя-

* К неуглеводородным компонентам нефти относят также кислородсодержащие органические соединения. Все эти компоненты, имеющие в своем составе серу, азот, кислород, объединяют под общим названием гетероатомных соединений.

щих из незамкнутых цепей) и циклических соединений. В порфиринах нефтей, сходных по своей структуре с хлорофиллом, обнаружены ванадий и никель, причем содержание ванадия может достигать 0,1%, а никеля — 0,01%.

Совокупность органических соединений и количественные соотношения между ними в пределах нефтяной залежи определяют способы переработки нефти, а в какой-то степени и области применения ее конечных продуктов. На нефтеперерабатывающих заводах нефть перегонкой разделяют на различные типы топлива, причем в первую очередь отделяются фракции с низкими температурами кипения (см. табл. 3.2).

Природный газ состоит преимущественно из метана и его гомологов парафинового ряда (до бутана), в нем содержатся также водяной пар, азот, углекислый газ, водород и гелий; других примесей мало. Жидкие продукты перегонки с наиболее низкими температурами кипения, из которых получают бензин, содержат разветвленные парафины, циклопарафины (циклопентаны и циклогексаны) и ароматические углеводороды. Последние являются ценными компонентами, поскольку из них получают бензины с высокими октановыми числами. Во фракциях с более высокими температурами кипения присутствие парафинов с нормальными цепями и небольшого количества ароматических соединений повышает качество дизельного топлива.

Сернистые соединения нефти обладают коррозионными свойствами, и поэтому их удаляют различными способами. Тяжелое жидкое топливо (мазут и др.), используемое в паровых котлах и на тепловых электростанциях, содержит значительное количество серы, которая при сгорании окисляется до сернистого газа, загрязняющего атмосферу.

3.5.4. МИГРАЦИЯ И АККУМУЛЯЦИЯ УГЛЕВОДОРОДОВ

При уплотнении, диа- и эпигенезе горных пород происходит выжимание поровых жидкостей из тонкозернистых осадков (таких, как глины), которые при этом значительно сокращаются в объеме. Так как большинство нефтематеринских пород имеет тонкозернистую структуру, этот процесс дает начало первичной миграции углеводородов, которые перемещаются в направлении пород-коллекторов. Углеводороды, оставшиеся в материнских породах, сходны с мигрировавшими из них и, таким образом, являются «уликами» прошедшей миграции и могут служить указателями присутствия нефтяной залежи.

После проникновения нефти и газа в проницаемые породы характер их движения меняется; начинает осуществляться вторичная миграция — процесс, обусловленный теми же факторами, что и движение поровых вод. В проницаемых породах, пористость которых может быть оценена от средней до высокой, углеводороды способны как задерживаться, так и транспортироваться через них. Непроницаемые слои определяют направление движения углеводо-

родов, а при благоприятном залегании образуют барьеры («покрышки»), препятствующие их дальнейшему перемещению.

По ряду свойств нефть и газ отличаются от воды, что и определяет различия в условиях размещения этих флюидов в недрах. На начальных стадиях миграции нефть заполняет только часть порового пространства, образуя капельки, не смешивающиеся с поровыми водами. Процесс миграции может проходить достаточно активно только после того, как нефть заполнит практически всю систему пустот в породе. При этом в региональном водном потоке возникает градиент давления, обусловливающий дальнейшее движение жидкости.

Отдельные ее компоненты, обладающие различной вязкостью и плотностью, движутся с разными скоростями: чем тяжелее углеводороды, тем меньше они удаляются от очага генерации. Низкая плотность обеспечивает плавучесть жидких углеводородов, что приводит к их скоплению над уровнем воды в проницаемом пласте и к заполнению ими наиболее высокой части структурной ловушки. Следует отметить, что миграция углеводородов не подчиняется законам циклической циркуляции, установленным для воды.

Пути миграции углеводородов являются однонаправленными — от нефтегазоматеринских пород к земной поверхности; при этом огромные количества нефти и газа, выделяющиеся в виде поверхностных выходов, теряются в результате испарения и окисления. Из нефтяных «озер» Тринидада, питающихся за счет нефтепроявлений, добывается асфальт. Огромные скопления битуминозных песчаников Атабаски в провинции Саскачеван (Канада) приурочены к меловым отложениям, несогласно залегающим на нефтеносных известняках девона. Нефть, поступающая в отложения формации Мак-Меррей, обладает высокой плотностью и вязкостью, поэтому ее нельзя добывать выкачиванием из природных резервуаров. Ресурсы нефти в битуминозных песчаниках Атабаски превышают 80 млн. т. Добыча ее осуществляется путем открытой «разработки» битуминозных песчаников с использованием ковшовых экскаваторов и другой техники.

Почти в 60% крупных нефтяных месторождений коллекторы представлены песчаниками. В качестве коллекторов фигурируют также известняки, в том числе рифовые и трещиноватые, и кавернозные доломиты. Легкие углеводороды (всплывающие на поверхность воды) накапливаются в ловушках под вышележащими непроницаемыми пластами. В роли покрышек выступают обычно аргиллиты, мергели и эвапориты (главным образом гипсы).

Существует несколько разновидностей ловушек нефти и газа. Стратиграфические и литологические ловушки являются, как правило, первичными и образуются обычно в результате латеральных изменений осадочных фаций. Вблизи бортовых частей осадочных бассейнов линзовидные тела песчаников либо рифовых известняков могут перекрываться глинистыми сланцами или эвапоритами. Песчаники в такой геологической обстановке могут слагать базальные слои трансгрессивных фаций, прибрежные отмели, бары,

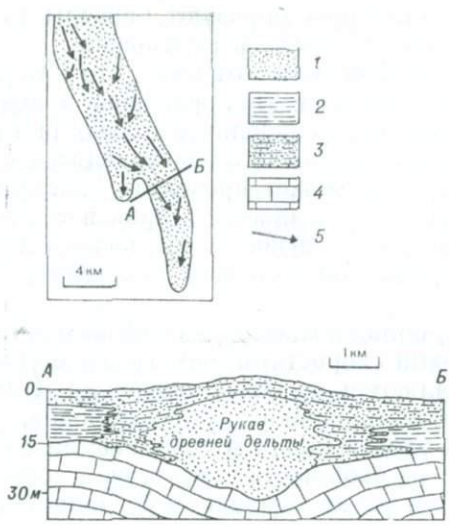


Рис. 3.6. Нефтяные ловушки. Роль литологического фактора на примере дельтовых отложений миссисипия (нижнего карбона) в Луизиане (США) (по данным С. В. Грейбера и П. Э. Поттера [1969 г.]).

Проницаемое песчаное тело образовалось в результате заполнения песками рукава древней дельты. Это тело (максимальная мощность до 40 м) окаймляется и перекрывается переслаивающимися сланцеватыми глинами, глинистыми сланцами, алевролитами и тонкозернистыми песчаниками. Вздутие над песчаным телом возникло вследствие неравномерного уплотнения осадков. *1* — пески; *2* — глина и глинистые сланцы; *3* — глинистые сланцы, алевролиты, тонкозернистые песчаники; *4* — известняки; *5* — палеотечения.

отделяющие лагуны от открытого моря, либо барьеры в протоках и рукавах дельт (рис. 3.6).

Рифы представляют собой холмо- или грядообразные известковые постройки, сложенные колониальными кораллами, мшанками и другими породообразующими организмами. Они формируются в морской (теплой и чистой) воде на небольших глубинах. Рифы часто окаймляют побережья либо отделяются от коренного берега коралловыми лагунами, где аккумулируются мелкий кластический материал и обломки рифов. Рифовые известняки образуют линзовидные или вытянутые тела, перемежающиеся с более тонкозернистыми осадками; при благоприятных условиях могут формироваться стратиграфические ловушки. Эффективная пористость и проницаемость рифовых пород и связанных с ними отложений определяется в большей степени такими вторичными процессами, как замещение, растворение и переотложение осадочного материала, чем первичной (хотя, как правило, весьма высокой) пористостью осадка.

Следует отметить, что рифовые комплексы являются надежными вместилищами не только для нефти и газа, но также для свинцово-цинковых руд, отлагавшихся из мигрирующих соленых растворов. Примерами аккумуляции как углеводородов, так и рудных минералов могут служить девонские рифы в Альберте (Канада), которые формировались параллельно структурным «поднятиям» северо-восточного простирания (рис. 3.7).

Структурные ловушки возникают в результате постседиментационных тектонических процессов — складчатости, разрывных нарушений, наклона пластов (рис. 3.8).

Антиклинальные складки, служащие ловушками для нефти и газа, могут быть обнаружены при геологическом (структурном) картировании либо при геофизической разведке; выявление их — одна из первых задач поисково-разведочных работ. Большинство продуктивных антиклинальных структур, развитых, например, на Ближнем и Среднем Востоке, имеют сравнительно простое строе-

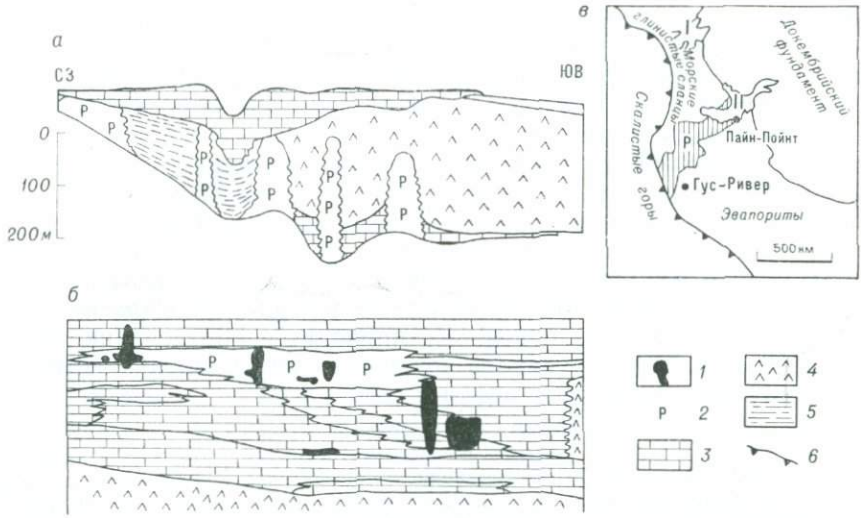


Рис. 3.7. Рифы.

а — нефтеносные рифы верхней подгруппы Элк-Пойнт; *б* — вмещающие породы свинцово-цинковых залежей барьерного комплекса Пайн-Пойнт; *в* — среднедевонский барьерный риф в северо-восточной части Канады, отделяющий осадки открытого моря на севере от эвапоритов закрытого бассейна на юге (по данным Д. Л. Барсса и др. [1970 г.], Дж. Р. Кайля [1981 г.]).

I, II — озера (на рис. *в*): *I* — Большое Медвежье, *II* — Большое Невольничье.

1 — свинцово-цинковые рудные тела; *2* — рифы; *3* — тонкозернистые карбонаты; *4* — эвапориты; *5* — глинистые сланцы; *6* — линия надвига.

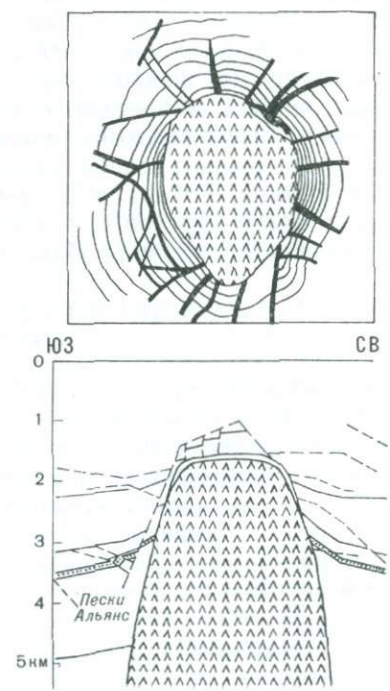


Рис. 3.8. Солянокупольная ловушка для нефти. Соляной купол Гидан в Луизиане (США), прорывающий песчаную формацию Альянс (по данным Г. Э. Мэррея [1968 г.]).

Показаны изогипсы кровли песчаных слоев и радиальные разломы.

ние. Интенсивная складчатость в песчаниках или известняках может привести к разрывам и, следовательно, к потере нефти через различные трещины. Знание морфологии смятого в складки пласта-коллектора совершенно необходимо для правильного определения мест заложения скважин.

Эвапориты, залегающие среди осадочных толщ, представляют большой интерес для геологов-нефтяников. Во-первых, они, как правило, в значительной степени непроницаемы и поэтому могут служить превосходными покрышками. Во-вторых, низкая плотность и высокая пластичность эвапоритов обусловливают возможность их вертикального пластического течения с подъемом перекрывающих осадочных пород, что приводит к образованию таких структур, как соляные купола и соляные антиклинали, которые могут служить ловушками нефти и газа.

Роль эвапоритов — непроницаемых покрышек — подкрепляется такими примерами, как наличие зон себха *, в пределах которых соли, выпадающие из поровых рассолов в процессе аккумуляции осадков, могут локализоваться вблизи бортов осадочных бассейнов, т. е. по направлению возможных путей миграции углеводородов. Воздействие соляной тектоники (или галокинеза) в тектонически стабильных регионах, таких как южные штаты США или южная часть Северного моря, оказывает определенное влияние на размещение нефтяных залежей. Нефть и газ могут скапливаться у кровли соляных куполов либо занимать наиболее высокие (вверх по восстанию пластов) участки нарушенных пластов.

Ловушки могут быть связаны также с разрывными нарушениями, приводящими в непосредственный контакт проницаемые и непроницаемые горизонты, как это имеет место в районе грабенов Викинг и Центральный в Северном море. Существенная, хотя и косвенная связь залежей нефти и газа с разрывной тектоникой обусловлена тем фактом, что многие нефтегазоносные толщи аккумулировались в бассейнах, ограниченных дизъюнктивными нарушениями. Нефтяные месторождения Северного моря сгруппированы вдоль разветвленной рифтовой системы, а нефтеносные бассейны Анголы, Габона и Восточной Африки приурочены к мезозойским зонам горстов и грабенов, которые до разделения Гондваны развивались в виде сбросовых береговых линий.

3.5.5. РАЗВЕДКА И РАЗРАБОТКА МЕСТОРОЖДЕНИЙ НЕФТИ И ГАЗА

Поиски нефти начинаются с предварительного изучения потенциально перспективного района. При получении положительных результатов приступают к выявлению продуктивных объектов для постановки более детальных поисково-разведочных работ. Основные показатели присутствия нефти и газа, которые необходимо обнаружить в исследуемом районе, уже знакомы нам по предыдущим разделам — это наличие мощных морских фанерозойских толщ в шельфовых зонах. Особенно благоприятны осадки, которые

* Засолоненные равнины, соляные марши или покрытые солью прибрежные участки (например, вдоль берегов Персидского залива).

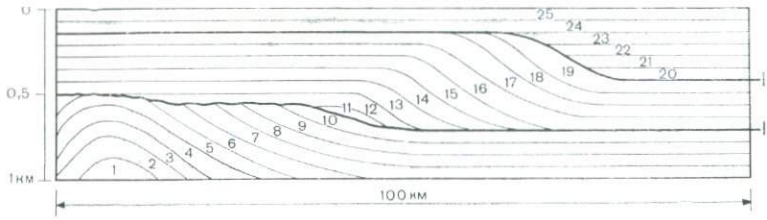


Рис. 3.9. Последовательность отложения слоев. Три пачки слоев, выявленных сейсмическим профилированием (по данным Р. М. Митчема, П. Р. Вейла, С. Томпсона [1977 г.]).

Поверхности раздела *I* и *II* установлены по наличию незначительных угловых несогласий, фиксируемых на сейсмопрофилях. Поверхности несогласно залегания пачек отражают временный перерыв в осадконакоплении; пласты *11—15* и *20—23* представлены неполностью; в левой части поверхности *I* отмечается эрозионное несогласие. (Обратите внимание на величину вертикального превышения.)

аккумулировались в бассейнах с ограниченной циркуляцией придонных вод и содержат в своем разрезе как тонкозернистые породы, так и проницаемые песчаники и карбонаты. Бóльшая часть нефтяных скоплений этого типа, по крайней мере в Западном полушарии, уже разведана, и начальный этап поисково-разведочных работ сместился в основном в прибрежные области морей и океанов.

Там, где в результате проведения предварительных аэрофотометрических, геофизических, геологических и других исследований обнадеживающие прогнозы на нефть и газ в целом подтверждаются, на перспективных структурах должны быть пробурены опорные или параметрические скважины. При обнаружении нефти поисково-разведочные работы вступают в новую фазу, когда в результате бурения и геофизических исследований выделяют локальные нефтегазоносные структуры.

Для установления морфологии складок, соляных куполов, структурных (в том числе разломных) и стратиграфических ловушек используются методы структурно-тектонического анализа, гравиметрические и сейсмические исследования.

На основе результатов региональных сейсморазведочных работ был создан метод исследования разрезов различных отложений, получивший название «сейсмическая стратиграфия». При его использовании удается выделить пачки или пласты генетически взаимосвязанных пород, ограниченных сверху и снизу угловыми несогласиями, которые хорошо распознаются на сейсмограммах (рис. 3.9). Корреляция разрезов становится возможной потому, что каждая пачка или слой имеет свои значения сейсмических параметров, таких как скорость распространения сквозь них сейсмоволн, характеризуется наличием или отсутствием внутренних отражающих горизонтов и т. д. Поверхности несогласного залегания, как правило, отвечают фазам трансгрессий, регрессий или эрозии, возраст которых может быть установлен палеонтологически — по данным изучения окаменелостей, обнаруженных в керне скважин.

В результате бурения можно получить большое количество самой разнообразной информации (за 16 лет в Северном море было пробурено почти 1800 разведочных и эксплуатационных скважин на нефть и газ). Неповрежденный керн, извлекаемый из скважины на поверхность, дает существенную дополнительную информацию по изучаемому разрезу. Однако бóльшая часть разбуриваемых пород представлена обычно в виде мелких обломков (шлама), выносимых промывочной жидкостью, циркулирующей в скважине. Такой однообразный процесс, как регистрация анализов бурового шлама, обеспечивает тем не менее получение необходимых данных о литологическом составе и эпигенетических изменениях вмешающих пород.

Физические свойства горных пород могут фиксироваться автоматически — непосредственно по показаниям каротажных приборов, спускаемых в необсаженную скважину до того, как стенки ее начнут оплывать или осыпаться. Наиболее важные данные мы получаем, используя электрокаротаж, основанный на сопротивлении и других электрических свойствах пород, изменяющихся в зависимости от пористости и состава поровых жидкостей. Например, рассолы являются хорошими проводниками по сравнению с пресной водой или жидкими углеводородами. На каротажных диаграммах, регистрирующих естественную радиоактивность пород (гамма-каротаж), могут быть выявлены аномалии, соответствующие высоким уровням содержания таких элементов, как калий, рубидий или уран; они, как правило, бывают приурочены к глинистым (аргиллитовым) породам. По показаниям электро- и гамма-каротажа могут быть получены данные, позволяющие проводить корреляцию разрезов непосредственно от скважины к скважине. Это представляется особенно важным, так как одни и те же отложения, обнаруженные в удаленных друг от друга местах, могут иметь много общих особенностей (рис. 3.10, табл. 3.3.).

Для установления приблизительных размеров и особенностей строения нефтяной залежи нужно пробурить целый ряд скважин. Чтобы обеспечить правильное ведение буровых разведочных работ, необходимо располагать данными о морфологии и размещении коллекторов, об изменениях пористости пород, о глубине залегания и наклоне поверхности водонефтяного контакта.

В конечном счете из порового пространства природных резервуаров может быть извлечена только некоторая часть нефти; коэффициент извлечения, определяющий выход добываемой нефти, изменяется в зависимости от особенностей того или иного месторождения. Опубликованные данные о доказанных запасах (см. табл. 1.2) основаны на оценке общего объема нефти, находящейся в недрах, и на принятом возможном коэффициенте извлечения. Если количество достоверных запасов является приемлемым для разработки данного месторождения, можно приступать к его эксплуатации. Начальное давление жидкости может оказаться достаточным, чтобы заставить нефть двигаться к земной поверхности; на более поздних этапах разработки месторождения нефть приходится уже

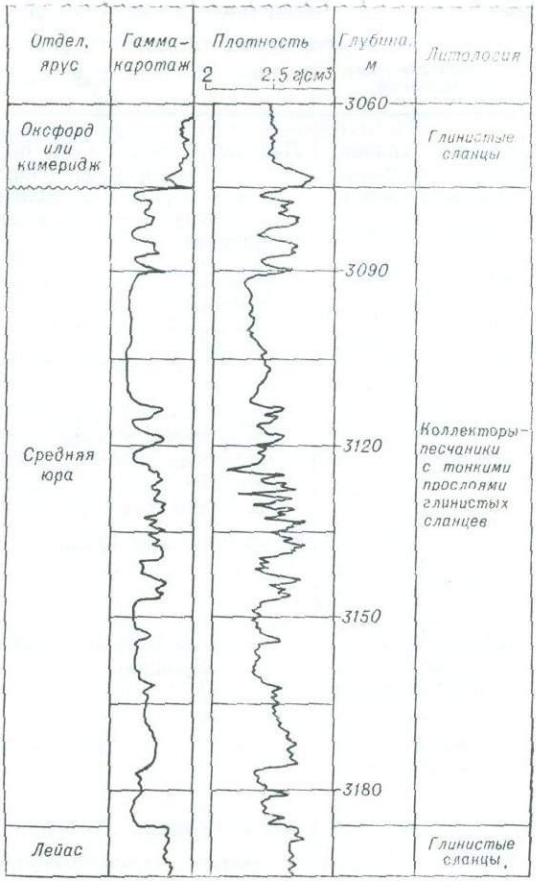


Рис. 3.10. Фрагмент каротажной диаграммы по скважине на месторождении Нинна в северной части Северного моря (по данным У. А. Элбрайта [1980 г.]).

извлекать выкачиванием из недр. На морских месторождениях, расположенных в прибрежных зонах, устья скважин связаны с огромными эксплуатационными платформами, которые могут быть установлены на грунте при глубине воды до 150 м.

В естественных условиях нефть, заполняющая природные резервуары, находится под бóльшим или меньшим давлением. Когда скважина вскрывает продуктивный пласт, принимаются необходимые меры предосторожности, чтобы предотвратить внезапное выделение летучих компонентов из нефти либо выброс метана или других газов, скопившихся в кровле резервуара. По мере того как нефть (или газ) извлекаются из скважины, все новые массы флюидов поступают к ее забою со скоростью, которая зависит как от вязкости самой нефти, так и от проницаемости вмещающих пород. Эти факторы определяют темп добычи: он будет более высоким при наличии легких нефтей и трещинных (а не поровых!) коллекторов. Восходящее движение нефти на начальной стадии эксплуатации месторождения облегчается ее плавучестью, вытеснением

Таблица 3.3. **Информация, получаемая при бурении и каротаже скважин**

Методы исследований	Содержание информации
Изучение сплошного (ненарушенного) керна	Литологический состав пород, пористость, проницаемость, мощность литологических единиц (слоев, пачек и т. д.), стратиграфическое положение (по органическим окаменелостям), углы падения пород, следы миграции углеводородов
Изучение обломков пород (шлама)	Литологический состав, пористость, проницаемость, стратиграфическое положение (по микрофауне и микрофлоре), следы миграции углеводородов
Анализ скоростей бурения	Твердость разбуриваемых пород
Исследование промывочной жидкости	Присутствие углеводородов (позволяет предполагать наличие нефти и газа в поровых флюидах); вязкость раствора (изменяется с температурой); проникновение раствора в стенки скважины (указывает на степень трещиноватости или пористости пород)
Температурные измерения в скважине	Геотермический градиент, градиент теплового потока
Электрокаротаж (измерение электропроводимости, сопротивления и т. д.)	Пористость, состав поровых жидкостей (например, углеводороды — плохие электрические проводники, рассолы — хорошие)
Радиометрия (гамма-каротаж)	Радиоактивность (высокая первичная указывает на присутствие глинистых сланцев в разрезе; вторичная связана с пористостью пород)
Акустический каротаж (регистрация скорости прохождения звука в горных породах)	Литологические изменения пород, характер пористости

нефти подошвенной водой, которая продвигается в сторону более низких давлений, а также воздействием газа, выделяющегося при снижении давления.

Коэффициент извлечения выражается процентным содержанием углеводородов, которые могут быть добыты. При использовании первичных методов добычи (на начальных ее этапах) из разрабатываемой залежи извлекается обычно не более 20—40% нефти. Вторичные методы эксплуатации (на последующих этапах), значительно повышающие выход нефти на целом ряде месторождений, предусматривают вытеснение нефтяных флюидов из пласта-коллектора посредством закачивания в него воды через скважину. Этот метод законтурного заводнения месторождений аналогичен

методу искусственного подпитывания водоносных горизонтов. Коэффициент извлечения природного газа значительно выше, чем нефти; на некоторых газовых месторождениях он достигает 90%.

3.5.6. НЕКОТОРЫЕ НЕФТЕГАЗОНОСНЫЕ ПРОВИНЦИИ

Средний Восток

Битумы как строительные материалы использовались с доисторических времен. Упоминание о первом нефтяном колодце относится приблизительно к 500 г. до н. э.; он был прорыт в Персии при Дарии Великом. В наши дни месторождения Среднего Востока * не только дают более трети мировой продукции нефти, но и содержат значительно больше половины всех доказанных запасов этого полезного ископаемого (см. табл. 1.2). Эти месторождения протягиваются в виде серповидной зоны через несколько стран — Ирак, Иран, Кувейт и Саудовскую Аравию — к Персидскому и Оманскому заливам (рис. 3.11), где нефтяные залежи разрабатываются при помощи морских бурильных платформ. Нефтедобыча в этом регионе началась между первой и второй мировыми войнами, но за этот период было добыто относительно небольшое количество нефти. После второй мировой войны добыча нефти здесь резко возросла, и к 1973 г. годовая продукция ее составила около 1300 млн. т.

Нефтяные месторождения Среднего Востока приурочены к северной окраине бывшего суперконтинента Гондвана и залегают в районе, окаймленном с северо-востока Альпийско-Гималайским подвижным поясом, развивавшимся в течение мелового — третичного периодов. В пределах форланда и других краевых областей подвижного пояса отложение мелководных морских осадков на относительно устойчивом основании продолжалось, с небольшим перерывом, от каменноугольного до среднетретичного времени. Поступление в бассейн обломочного материала было ограниченным, аккумулировались главным образом известняки, глинистые породы и эвапориты.

Во внутренних частях Афро-Арабского кратона разрезы этих отложений характеризуются слабой нарушенностью и проявлением соляной тектоники. В северо-восточной части региона крупные и относительные простые антиклинальные складки обусловливали формирование огромных структурных ловушек для нефти. Северо-восточной границей основных продуктивных районов является хр. Загрос — линейная зона интенсивных тектонических разломов, развивающихся, по-видимому, на месте древних шовных или трансформных дислокаций.

Что касается геологического строения, то нефтеносная зона Среднего Востока во многом сходна с другими континентальными окраинами, которые являлись устойчивыми областями, прогибав-

* В американской и английской литературе понимается как совокупность стран Ближнего и Среднего Востока.

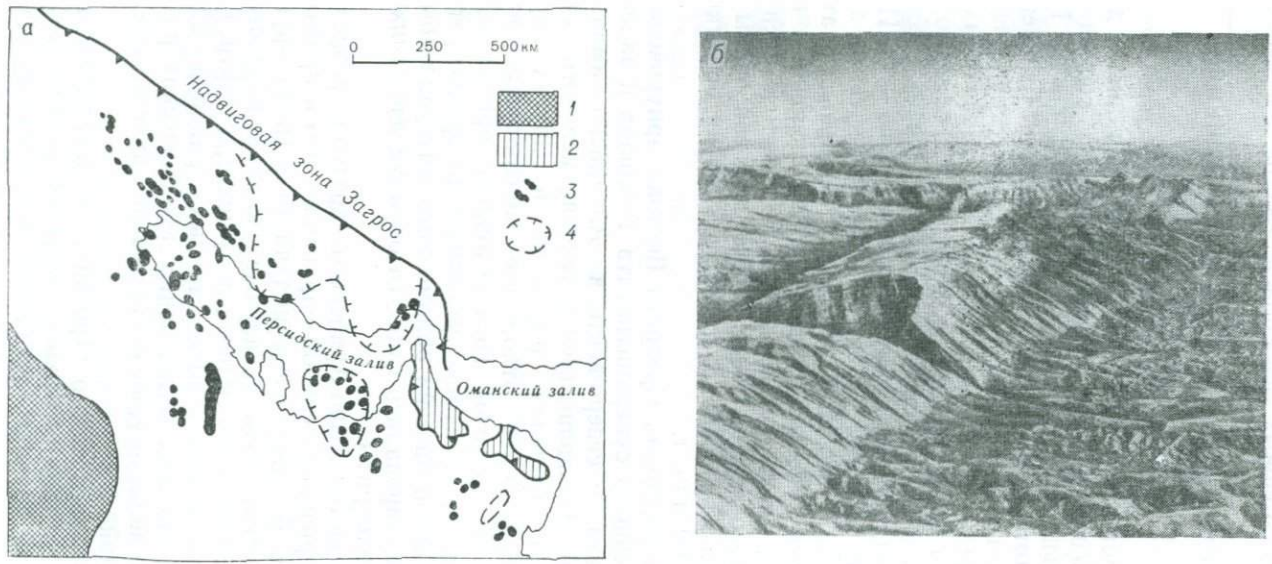


Рис. 3.11. Нефтяные месторождения Среднего Востока (фрагмент карты).

а — схема размещения месторождений на фоне некоторых элементов геологического строения региона; *б* — антиклинальная складка, сложенная известняками, — пример характерной формы структурной ловушки (аэрофотоснимок). *1* — докембрийский фундамент, сложенный метаморфическими породами; *2* — офиолиты; *3* — месторождения нефти и газа; *4* — районы широкого развития соляных куполов.

шимися в течение длительных периодов времени. Исключительно высокие концентрации углеводородов в пределах этой зоны обусловлены, по-видимому, удивительно удачным сочетанием ряда благоприятных факторов, краткая характеристика которых приводится ниже.

1. Морские отложения, содержащие органический детрит, включают один или несколько горизонтов, обогащенных сапропелевым веществом. Главные нефтематеринские породы имеют, по всей вероятности, мезозойский возраст.

2. Нефтематеринские породы перемежаются с проницаемыми слоями, способными удерживать жидкие углеводороды. Большинство мезозойских пород-коллекторов представлено верхнеюрскими и нижнемеловыми карбонатами (известняки формации Тамама); в верхнемеловых известняках и песчаниках содержится относительно меньше нефти. Незначительное количество газа (вероятно, поступающего из нижележащих угольных пластов) имеется в пермских отложениях. Наиболее значительные природные резервуары третичного возраста, где сосредоточены основные продуктивные горизонты иранской нефти, — это отложения миоценовой известняковой формации Асмари.

3. Почти непрерывное осадконакопление, продолжавшееся в течение длительного времени, обусловило хорошую сохранность углеводородов, поскольку при этих условиях были очень редки тектонические нарушения или фазы эрозии, которые могли способствовать их рассеянию. Глинистые сланцы, мергели или эвапориты перекрывают различные породы-коллекторы, причем наиболее важную роль среди этих покрышек играют верхнеюрские, нижне- и среднетретичные породы, лежащие на продуктивных горизонтах в Саудовской Аравии, Иране и частично в Персидском заливе.

4. Широкая складчатость в мощных компетентных* известняках в течение средне- и позднетретичного времени обусловила образование крупных прямых и наклонных антиклиналей, прослеживающихся в направлении их осевых линий на многие десятки километров. Трещиноватость в сводовых частях складок повышает проницаемость пластов-коллекторов и обусловливает особенно высокую продуктивность ряда скважин. Дебит некоторых скважин, пробуренных в трещиноватых известняках формации Асмари, достигает 4 тыс. т нефти в сутки.

5. Несмотря на отдельные тектонические нарушения, вызванные столкновением Афро-Арабской и Евразийской глыб, рассматриваемый нефтеносный регион, в отличие от обрамляющих его на северо-востоке гор Загрос и Альборз, не испытал ни сильных разрывных дислокаций, ни глубокой эрозии. Значительная часть известняков Асмари и большинство мезозойских известняков оказались ниже базиса эрозии и до настоящего времени перекрываются непроницаемыми породами.

Южные районы США

В течение многих лет США были как крупнейшим производителем, так и крупнейшим потребителем нефти в мире; например, в 1973 г. там было добыто более 18% и использовано около 30% от общего количества мировой нефти (табл. 3.4). Первые скважины на нефть были пробурены в середине XIX века в Южных Аппалачах, где задолго до того были известны многочисленные нефтепроявления на земной поверхности. Однако наиболее значительные месторождения южных штатов и Калифорнии (калифорнийские дают ныне более 65% среднегодовой продукции нефти) не были обнаружены до начала нашего века.

---

* Породы, способные противостоять тектоническому давлению, имеющие при этом минимальные следы пластических деформаций или изменения мощности слоев.

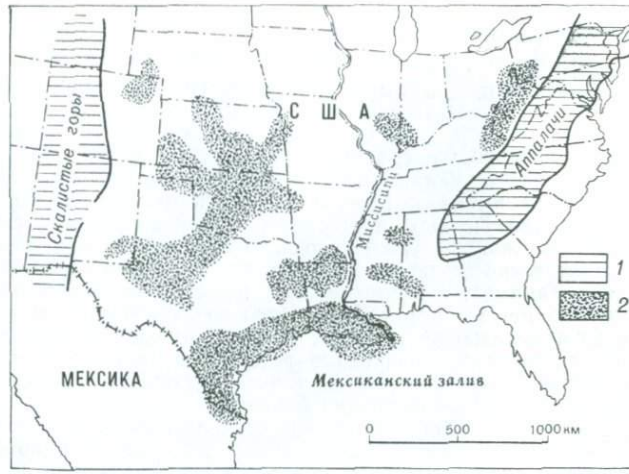


Рис. 3.12. Нефтяные месторождения центральных и южных районов США.

1 — складчатые пояса; *2* — нефтегазоносные районы.

Если не считать месторождений, расположенных в прибрежной (шельфовой) зоне и на Аляске, основные залежи нефти США к настоящему времени полностью разведаны, а новых значительных находок углеводородных скоплений становится все меньше и меньше. Объем доказанных запасов нефти все еще высок, отмечается их рост благодаря применению вторичных методов добычи; имеются также огромные ресурсы до сего времени очень мало используемых битуминозных сланцев. Вместе с тем, как показано на рис. 1.4, явное преобладание потребления над добычей нефти в США свидетельствует о том, что эта страна и в обозримом будущем останется импортером углеводородного сырья.

Нефтяные месторождения Канзаса, Оклахомы, Техаса и Луизианы, так же как и месторождения Среднего Востока, локализованы вблизи древней континентальной окраины, в регионе, испытывавшем в течение длительного времени общее устойчивое погружение (рис. 3.12). На этом, однако, сходство заканчивается.

Таблица 3.4. **Добыча нефти в 1973 г.**

Регионы	Суточная добыча, млн. т
США	1,4
Средний Восток	3,3
Саудовская Аравия	1,3
Все нефтедобывающие страны (по приблизительным подсчетам)	9,1

Нефтяные месторождения США приурочены преимущественно к обломочным отложениям. В месторождениях Западного Техаса, Канзаса и Оклахомы нефть поступает из палеозойских песчаников, миссисипских известняков и пермских рифовых комплексов. Изолирующими породами являются глинистые сланцы и эвапориты; последние служат покрышкой для пермских рифовых известняков в Западном Техасе.

Месторождения нефти, расположенные в районе Мексиканского залива, вдоль побережий штатов Техас, Луизиана и Миссисипи, приурочены к огромному клиновидному телу морских и континентальных отложений от мезозойского до третичного возраста, замещающихся по направлению к Мексиканскому заливу осадками палео-Миссисипи. Эвапориты пермского и триасового возраста, подстилающие продуктивные горизонты на значительной площади и прослеживающиеся под ложем Мексиканского залива, формируют многочисленные соляные купола и диапиры, к которым приурочен целый ряд небольших нефтяных месторождений в прибрежной зоне по обе стороны от береговой линии.

Северное море

Разведка и разработка залежей нефти и газа в Северном море, связанные с выполнением дорогостоящих и технически сложных операций в условиях почти постоянного воздействия штормовых волн, не проводились вплоть до второй половины XX столетия. Добыча газа была здесь начата в 1960-х годах, а нефти — в середине 1970-х годов. Предполагалось, что добыча нефти в Британском секторе Северного моря в 1980-х годах будет составлять 90—150 млн. т в год (с постепенным снижением дебита к концу столетия), что позволит обеспечить на какое-то время потребности Великобритании. Общее количество запасов углеводородов в этом регионе до сих пор полностью не установлено.

Нефтяные месторождения залегают в сильно разбитой разрывными нарушениями северо-западной части Европейского кратона, который не испытывал орогенических движений с конца раннего палеозоя (рис. 3.13). В результате периодического осадконакопления в послепозднепалеозойское время сформировалась толща преимущественно морских осадков мезозойского и третичного возраста мощностью в некоторых местах значительно больше 4 км. Основная масса осадков аккумулировалась в разветвленной системе Центрального грабена (или полуграбена), сформировавшегося в период растяжения океанической коры, что предшествовало раскрытию Атлантического океана. Седиментационный бассейн Северного моря оказался в какой-то степени разделенным на северную и южную части структурными «поднятиями», протянувшимися с перерывами от северо-восточной оконечности Англии до берегов Дании.

Природный газ (без сопровождающей нефти) обнаружен в западных районах южной части Северного моря. Здесь нижнепермские слои хорошо сортированных эоловых песчаников (так назы-

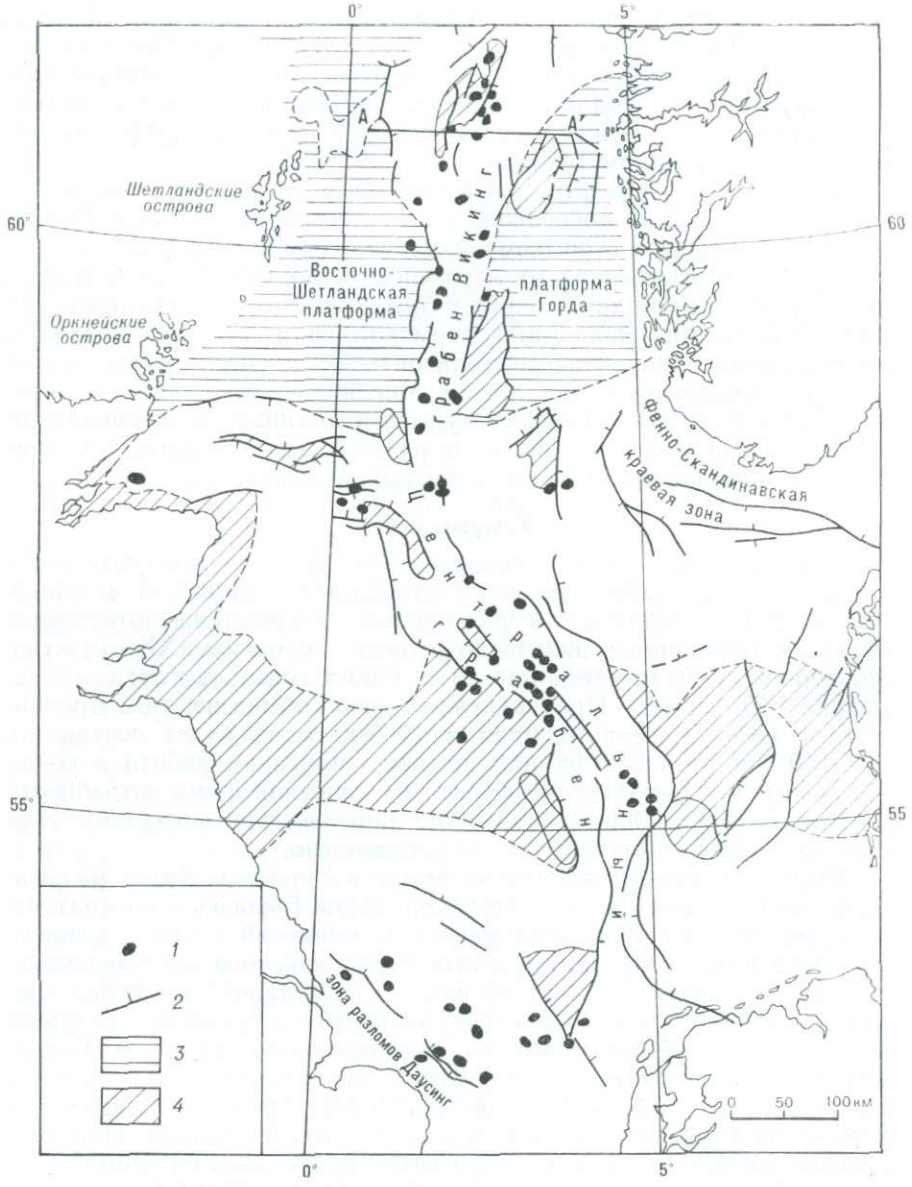


Рис. 3.13. Нефтяные месторождения Северного моря.

Показано размещение месторождений в пределах грабенов и вблизи них. *1* — месторождения нефти и газа; *2* — разломы (опущенное крыло сбросов отмечено бергштрихом); *3* — платформы; *4* — поднятия.

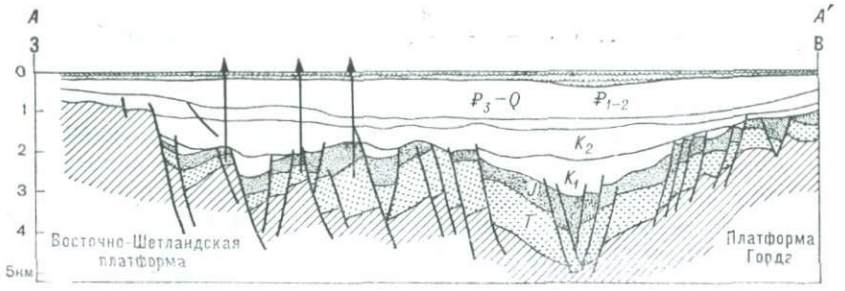


Рис. 3.14. Структура грабена Викинг по разрезу АА′ в северной части Северного моря (см. рис. 3.13) (по данным Р. Х. Кирка [1980 г.]).

Обращает на себя внимание различие структурных особенностей сильно разбитых разломами триасовых — нижнемеловых отложений и менее нарушенных верхнемеловых — плейстоценовых отложений. В скважинах обнаружена нефть, поступающая из разломных ловушек.

ваемый Красный лежень), представляющих собой зону прибрежных дюн, которые окаймляли широкое мелководное озеро, являются породами-коллекторами, а перекрывающие их эвапориты цехштейна (верхнего отдела пермской системы) — покрышками. Источником газообразных углеводородов служат, по-видимому, угленосные толщи карбона.

Нефтяные скопления с газом или без газа широко распространены как в южной, так и в северной части седиментационного бассейна. Они приурочены к мезозойским и третичным породам и сконцентрированы главным образом вблизи центральной рифтовой системы. Верхнеюрские (кимериджские) глинистые сланцы считаются основными нефтематеринскими породами, а песчаники, разделенные перемежающимися с ними сланцами, — главными природными резервуарами региона. Стратиграфические ловушки образованы линзовидными песчаниками либо слоями, выклинивающимися в результате пологих угловых несогласий; структурные ловушки сформированы в основном нормальными сбросами или (вблизи южного побережья моря) соляными антиклиналями и куполами пермского возраста.

Изменения мощности и литологического состава триасовых — нижнемеловых осадков связаны с развитием Центрального грабена и грабена Викинг и сопряженными с ними глыбовыми дислокациями (рис. 3.14); эта стадия сопровождалась юрской вулканической деятельностью. Верхнемеловые и третичные осадки, последовательно отлагаясь, образовали на древнем рифте сплошной покров мощностью до 3 км.

3.6. ГОРЮЧИЕ ИСКОПАЕМЫЕ. УГЛЕНОСНЫЕ ФОРМАЦИИ

3.6.1. ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА

Ископаемые угли различных угленосных формаций, которые служили топливом для развивающейся промышленности Европы и

Северной Америки в XIX веке и в начале XX века, до сих пор обеспечивают более 20% потребления энергии в США и около 40% в Западной Европе; 5—10% угля идет на сырье для химической промышленности Запада. Мировая продукция каменного угля в 1981 г. превысила 2400 млн. т. Достоверные запасы углей в Европе, Северной Америке и СССР не будут, по всей вероятности, исчерпаны за ближайшие два-три столетия, и можно ожидать, что добыча угля в XXI веке превысит добычу нефти и газа.

В настоящее время разработка угольных месторождений является сравнительно ограниченной не из-за геологических условий, а по социальным и экономическим причинам. При открытой добыче угля, масштабы которой могли быть значительно расширены, особенно в восточных районах США, остается изрытая, изувеченная местность с уничтоженным почвенным покровом и выработанными угленосными пластами. Требуется проведение интенсивных восстановительных работ, чтобы окрестный ландшафт не приводил в ужас население. При подземном же способе добычи угля, который преобладает, например, в Великобритании, шахтеры вынуждены работать в тяжелых, зачастую опасных условиях.

Традиционные методы, включающие объемную выемку и транспортировку угля на земную поверхность, ныне в значительной степени изменились благодаря механизации рабочих процессов. В некоторых случаях из угля на месте его добычи готовят угольную суспензию, которую уже можно выкачать на поверхность. Судя по всему, в будущем найдут широкое применение и другие методы: превращение угля в горючий газ непосредственно в шахтах или же выработка электроэнергии в подземных условиях. Ежегодная добыча угля в Великобритании к концу 1970-х годов составила около 125 млн. т.

Угленосные серии слагаются преимущественно породами, сформировавшимися в результате захоронения, диа- и катагенетического преобразования огромных масс растительного детрита. Органическая масса, источником которой являются в основном наземные растения, формируется преимущественно из так называемой лесной подстилки, накапливающейся в лесах, а также в близлежащих болотах и в руслах водотоков. Частично сгнившие древесные и мягкие растительные ткани аккумулируются на месте своего захоронения в виде слоев торфа (торфяников), для которых характерны низкая плотность и высокая пористость. Катагенетические процессы приводят к уплотнению торфа, что сопровождается удалением воды и летучих веществ, повышением содержания углерода. Таким образом, первоначальные растительные остатки могут последовательно преобразоваться в пласты торфа, лигнита, бурого и каменного углей и, наконец, антрацита.

Распространение угленосных серий во времени и в пространстве контролируется эволюционными, климатическими и геологическими факторами (табл. 3.5). Так как исходное вещество углей образовалось из высших наземных растений, распространение залежей угля, по существу, ограничено верхнепалеозойскими и пост-

Таблица 3.5. **Стратиграфическое положение и географическое распространение основных угленосных формаций**

Период	Геологическое время, млн. лет	Регионы (угли)
Четвертичный, неогеновый		Субарктические районы (торфяники). ФРГ; ГДР; СССР, Украина, район оз. Байкал (лигниты, бурые угли)
Палеогеновый		Южная Европа; СССР, Украина; США (лигниты, бурые угли)
Меловой	100	СССР, Сибирь; ГДР; ФРГ; Канада, Скалистые горы
Юрский		СССР, Сибирь; Китай; Южная Европа (бурые угли)
Триасовый	200	Китай, Юньнань; восточные районы США
Пермский		Южная Африка; Бразилия; Австралия; Индия; СССР, Сибирь (гондванские угли); Китай (битуминозные угли)
Каменноугольный	300	
Верхний отдел		Силезия (ПНР, ЧССР); Вестфалия (ФРГ); Бельгия; Франция; Великобритания; США (битуминозные угли); СССР, Сибирь
Нижний отдел		СССР, Московский бассейн (лигниты)
Девонский	400	Развитие разнообразных видов наземной флоры
Раннепалеозойский	500	Высокоразвитые формы наземной флоры отсутствуют

палеозойскими осадками, которые аккумулировались после появления на Земле растительного покрова. Редкие угольные пласты, встречающиеся в более древних отложениях (например, антрацитоподобные шунгиты в нижнепалеозойском разрезе Балтийского щита), имеют, по-видимому, водорослевое происхождение.

Благодаря не вполне еще понятному стечению обстоятельств, значительная часть мировых запасов углей сформировалась на протяжении относительно короткого временно́го отрезка — всего около 75 млн. лет, приуроченного к концу позднего палеозоя, когда обширные территории Европы, Северной Америки и бывшего суперконтинента Гондвана были покрыты густыми лесами, послужившими исходным материалом для мощных угольных скоплений. Мезозойские залежи углей широко распространены в СССР (Сибирь), в Китае, а также вдоль восточных склонов Скалистых гор в Канаде; третичные угли хорошо известны в ГДР, ФРГ и СССР. Торф, образовавшийся в основном после плейстоценового ледникового периода, является традиционным топливом, особенно в

Шотландии и Ирландии. Как и следовало ожидать, слабометаморфизованные угли встречаются среди относительно молодых осадков, в то время как верхнепалеозойские угли являются, как правило, высокометаморфизованными.

Бóльшая часть углеобразующих лесов, очевидно, произрастала в умеренно теплых и субтропических районах со средним и высоким количеством атмосферных осадков, т. е. в климатических условиях, которые способствовали как быстрому росту, так и видовому разнообразию лесных растений. Пермо-карбоновые угли Гондваны, однако, перекрывают ледниковые отложения либо переслаиваются с ними и, следовательно, могли формироваться в условиях холодного или субарктического климата, аналогичных тем условиям, при которых накапливались послеледниковые залежи торфа в Северной Европе. Среди углеобразующей флоры Гондваны доминировал, по-видимому, один род — *Glossopteris*, представители которого отличаются неприхотливостью и жизнестойкостью.

Характерные ритмические изменения в разрезах угленосных серий и частая перемежаемость в них континентальных и морских осадков свидетельствуют о неустойчивом равновесии в этих так называемых паралических зонах*. В сравнительно небольших межгорных бассейнах формировались менее крупные угольные залежи; в качестве примера можно привести месторождение Сент-Этьенн в пределах Центрального массива (Франция).

3.6.2. ИСХОДНОЕ ВЕЩЕСТВО УГЛЕЙ И КОНЕЧНЫЕ ПРОДУКТЫ УГЛЕФИКАЦИИ

Исходным материалом палеозойских углей послужили споровые (папоротники, плауны, хвощи и др.), а также семенные растения древних групп, в настоящее время реликтовых или вовсе исчезнувших с лица Земли. Мезозойские и третичные угли (рис. 3.15) сформировались главным образом из голосеменных и покрытосеменных, сходных с современными группами семенных растений. За счет всех этих растительных групп лесная подстилка пополнялась по существу сходными органическими компонентами. Лигнин — основная составная часть древесины — и целлюлоза, являющаяся материалом клеточных стенок растений, относятся к углеводам, построенным из сложных молекул, содержащих углерод, кислород и водород. Кутикулы листьев, пыльца и споры сложены из воскообразного углеводорода — кутина, состоящего в основном из углерода и водорода.

Весь этот растительный органический материал разлагается под действием различных грибков, а также аэробных и анаэробных бактерий, причем указанный процесс сопровождается выделением в свободном состоянии углекислого газа, воды, водорода и метана. В восстановительной обстановке застойные грунтовые воды обогащены гуминовыми кислотами и другими растворенными веществами, задерживающими бактериальные процессы, что препятствует полной деградации органического вещества. Полусгнивший растительный материал оказывается в дальнейшем насыщенным органическими кислотами, различными спиртами, жировыми компонентами и углеводородами; часто присутствуют суль-

* Зоны развития перемежающихся морских и континентальных осадков, отлагающихся в краевых частях моря или в прибрежных областях, периодически затопляемых морем.

Рис. 3.15. Третичные лигниты (Ньютон-Аббот, Юго-Западная Англия).

Обратите внимание на небольшие сбросы, нарушающие нормальное простирание пластов.

фиды, образовавшиеся благодаря бактериальной деятельности. Неорганический обломочный материал, привнесенный ветром и водными потоками, загрязняет органические смеси и образует в углях негорючие компоненты — золу. Такие элементы, как уран и ванадий, в восстановительной обстановке легко переходящие в связанное состояние, осаждаются из растворов и могут концентрироваться в углях в значительном количестве.

Процессы уплотнения, диа- и катагенеза приводят к обезвоживанию, потере легких углеводородов и формированию твердых органических комплексов из растворов, насыщающих органическое вещество. Содержание углерода при этом повышается от менее чем 50% до 90% и более и отношение углерода к кислороду неуклонно возрастает. Легкие углеводороды (главным образом метан CH_4), выделяющиеся при катагенетических процессах, мигрируют из материнских пород и могут накапливаться в породах-коллекторах в качестве «сухого» природного газа. Слабо- и среднеметаморфизованные угли при естественном сгорании в восстановительных условиях могут продуцировать более тяжелые углеводороды. Этот процесс использовался с начала XIX века при получении угольного газа, применявшегося для освещения и отопления. Образующийся при этом твердый остаток — кокс (характерного губчатого облика) дает бездымное пламя; он использовался раньше в большом количестве на теплоэлектростанциях. При его сгорании выделялись сера и другие примеси, загрязнявшие атмосферу.

Подавляющее большинство каменных углей, использующихся в промышленности, составляют гумусовые угли. отлагавшиеся in situ из растительных остатков смешанного состава. Высокомета-

Таблица 3.6. Компоненты высокометаморфизованных углей

Угли	Компоненты
	Органические компоненты
Гумусовые	Кларен — тонкорасслоенные смеси, в которых выделяются следующие три компонента: витринит — черная, блестящая, богатая углеводами растительная ткань, импрегнированная затвердевшими гелями, образовавшимися в результате разложения органического вещества; микринит — черный, матовый компонент, образовавшийся из спор, кутикулы и др.; фюзинит — черный, порошкообразный древесный уголь, встречающийся по плоскостям наслоения. Дюрен — твердый, массивный, лишенный блеска уголь, сложенный большей частью микринитом и фюзинитом
Сапропелевые	Кеннель — сходный с дюреном уголь, образовавшийся из тонкозернистого обломочного материала, в том числе из углеводородных компонентов. Богхед — уголь со значительным содержанием водорослевой ткани. Торбанит — уголь, образовавшийся преимущественно из водорослей
	Неорганические компоненты (зола)
Гумусовые и сапропелевые	Обломочные пески, алевриты, глины, карбонаты (адсорбирующие уран, ванадий и т. д.), сульфиды

морфизованные гумусовые угли (табл. 3.6) — блестящие и обычно хорошо расслоенные, благодаря чему они легко раскалываются. Углеводы и другие соединения, из которых состоят гумусовые угли, редко сохраняют следы клеточной структуры.

Сапропелевые угли относительно больше обогащены углеводородами, и исходным их материалом могут быть как споры и пыльца высших растений, так и остатки водорослей. Кеннельские угли (кеннели), образующиеся, как правило, при отложении исходного материала в застойных водоемах, являются второстепенными компонентами углей и присутствуют в большинстве угольных залежей. Богхеды — это угли, получившиеся частично из водорослевых остатков; торбаниты (разновидности кеннелей) в основном сложены водорослями. Сапропелевые угли обладают жирным блеском и раковистым изломом, легко воспламеняются при низких температурах. В результате перегонки из них могут быть получены газ и нефть.

3.6.3. УГЛЕНОСНЫЕ ОТЛОЖЕНИЯ ЕВРОПЫ И СЕВЕРНОЙ АМЕРИКИ

Верхнепалеозойские каменноугольные отложения протягиваются через всю Европу и Северную Америку к северной границе

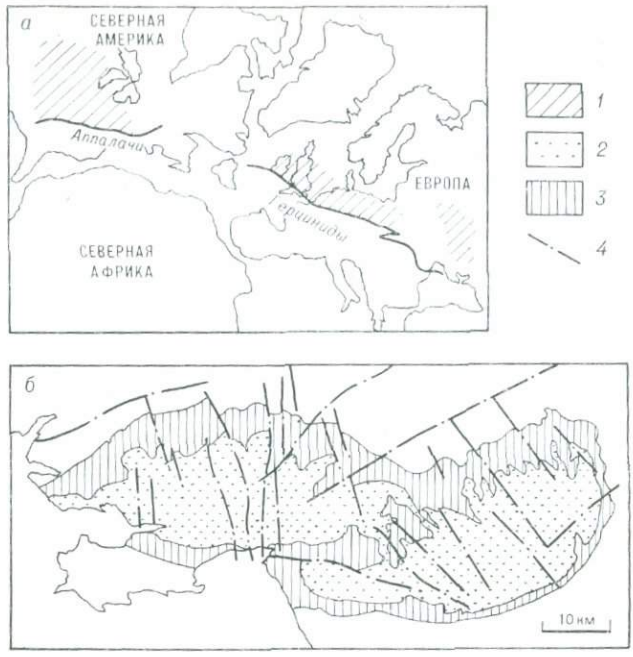


Рис. 3.16. Распространение угленосных отложений верхнего карбона (пенсильвания).

а — размещение угленосных формаций относительно Аппалачского и Герцинского горных поясов в пределах суперконтинента Лавразия; *б* — угленосный бассейн в Южном Уэльсе (Великобритания); подземные залежи и выходы на поверхность угольных пластов приурочены здесь к продуктивным отложениям верхнего карбона; месторождения расположены непосредственно к северу от орогенического фронта герцинид и сильно дислоцированы; в структурном отношении бассейн представляет собой асимметричную синклиналь с относительно крутым южным крылом, нарушенную поперечными разломами.
1 — угленосные формации; *2* — погребенные угольные залежи; *3* — обнажения угленосных пород; *4* — разрывные нарушения.

Герцинско-Аппалачского складчатого пояса; они образуют одни из крупнейших скоплений каменного угля на земном шаре. Основной этап накопления угленосных осадков (поздний карбон в Европе и соответствующий ему пенсильваний в Северной Америке) совпал с последними стадиями орогенической деятельности, когда с воздымающихся герцинских гор сносился обломочный материал на паралические равнины, окаймляющие их северный форланд (рис. 3.16).

Основная масса осадков представлена глинистыми сланцами и песчаниками неморского происхождения, чередующимися снизу с морскими осадками, отлагавшимися в течение кратковременных трансгрессий, а сверху — с пропластками угля и подстилающими слоями (seat earths *). В основном та же последовательность отложений многократно повторяется в разрезах осадочных ритмов,

* Английский термин, используемый для обозначения слоя пород, подстилающего угольный пласт. Этот слой представляет собой древнюю почву, на которой произрастала растительность, образовавшая уголь.

или циклотем, мощность которых составляет приблизительно 20 м (табл. 3.7). Каждая циклотема заканчивается угольным пластом, сформированным в период тектонической стабильности. Этот пласт сменяется следующим литолого-стратиграфическим подразделением обломочных, иногда морских осадков, отвечающих существенному изменению базиса эрозии и (или) характера осадконакопления, что контролируется тектоническими факторами. Отдельные циклотемы сохраняются на обширных территориях и выделяются в разрезах разведочных скважин по характерным литологическим и фаунистическим особенностям.

Хотя многие угольные пласты или серии (группы) пластов имеют широкое площадное распространение, пригодность для разработки определяется как первичной, так и вторичной сложностью их строения. Намечаемый к разработке угольный пласт может оказаться разделенным на два или несколько более тонких пропластков в тех случаях, когда необычно быстрое опускание территории приводило к затоплению лесов и поступлению илового материала. Весь угольный пласт либо какая-то его часть в период аккумуляции могли быть разрушены речной эрозией, а русло потока — заполненным линзовидными или шнурковыми песками.

Важное значение для геологов-углеразведчиков имеет изучение складчатости и разрывной тектоники на последних этапах герцинского орогенеза, а также воздействия эрозии, предшествующей формированию вышележащего чехла пермских и мезозойских отложений. Большинство месторождений Великобритании приурочено к широким, осложненным разломами синклиналям, которые разделены на части приподнятыми, подвергавшимися эрозии участками, откуда сносился обломочный материал, участвовавший в формировании пород продуктивных угленосных свит (см. рис. 3.16).

Таблица 3.7. **Циклотемы угольных формаций**

Регион	Циклотемы	
Восточные Пеннины (Англия)	Угли. Реликтовые почвы — палеосол. Неморские глинистые сланцы.	Простейшие циклы состоят только из этих элементов
	Алевролиты и песчаники. Неморские глинистые сланцы. Основание цикла — морские глинистые сланцы (присутствуют не в каждом цикле)	
Огайо (США)	Угли. Неморские глины. Глинистые сланцы и песчаники, преимущественно морские. Основание цикла — известняки морского происхождения	

Примечание. В американской литературе угли обычно рассматриваются в качестве базальных слоев циклотем; последовательность, приведенная в таблице, соответствует принятой в Великобритании для циклотем того же порядка.

В Бельгии и Руре (ФРГ) вблизи герцинского орогенического фронта угольные пласты подверглись интенсивной складчатости и были нарушены надвигами. Угольные месторождения, не имеющие выхода на земную поверхность, в Центральной, Южной и Восточной Англии несогласно перекрываются ненарушенными слоями пермских и мезозойских пород. Такие месторождения разрабатываются закрытым способом в Кенте, Ноттингеме, Дареме и прилегающих частях Северного моря. Сравнительная простота добычи угля таким способом определяется выдержанностью и целостностью пластов, отсутствием микросбросов и следов размыва, а также относительным постоянством качества углей.

Поскольку сооружение глубоких шахт экономически невыгодно, расстояние, на которое угольные залежи могут разрабатываться вниз по падению пластов, является ограниченным. Кроме того, технические трудности, возникающие при механизации процесса добычи на разных уровнях глубин, могут привести к нерентабельности разработки угольных залежей в районах с интенсивной разрывной тектоникой. Безопасность горных выработок определяется характерными особенностями кровли и почвы угольного пласта. Наличие тонких пропластков в вышележащих слоях может вызвать обрушение кровли. Рыхлые подстилающие породы («древние почвы») могут вспучиваться и тем самым привести к разрушению подземной выработки. Проницаемые песчаники, сбросы или зоны сильной трещиноватости могут способствовать проникновению воды в шахту. Метан (или «рудничный газ»), просачиваясь из окружающих пород, может вызвать взрыв; эту опасность предотвращают хорошо налаженной подземной вентиляцией. Хотя мы имеем общее представление обо всех обстоятельствах, связанных с нарушениями техники безопасности ведения подземных работ, катастрофы возможно избежать, только имея детальную информацию о состоянии каждой отдельной выработки с учетом структурных особенностей залежей на самой ранней стадии их разработки.

4. МЕТАЛЛЫ И ИХ РЕСУРСЫ

4.1. ВВЕДЕНИЕ

4.1.1. РУДНЫЕ МЕСТОРОЖДЕНИЯ

Большинство металлов, используемых в промышленности, находится в земной коре в малых концентрациях, составляющих, как правило, несколько весовых частей на миллион *. Добыча этих

* Это справедливо для целого ряда элементов (As, Mo, Sn, W, U и др.), однако многие элементы, обладающие металлическими свойствами, содержатся в концентрациях, которые на один-два и более порядков ниже указанных авто-

полезных ископаемых оказывается экономически выгодной только в тех случаях, когда мы имеем дело с рудами, прошедшими, так сказать, процесс природного обогащения. Иными словами, извлечение этих руд из недр становится практически возможным, когда концентрация химических элементов в земной коре возрастает не менее чем на два порядка по сравнению с их средним — кларковым — содержанием **. Соответственно рудные месторождения представляют собой естественные скопления руд металлов, разработка которых является целесообразной ***. При оценке потенци-

Таблица 4.1. **Оценка потенциальных рудных месторождений**

Факторы	Учитываемые параметры и условия
Геологические	1. Главные полезные компоненты руд, их качество, сортность (процентное содержание металлов в руде). 2. Возможные сопутствующие металлы (например, присутствие серебра в качестве примеси в полиметаллических рудах повышает ценность свинцово-цинковых месторождений). 3. Размеры и строение рудных тел. 4. Прогнозные запасы руд.
Добычи и дальнейшей переработки (металлургии) руд	1. Методика добычи рудных ископаемых (открытая или подземная разработка месторождения). 2. Условия извлечения полезных компонентов из руд (технологические свойства руды, ее обогатимость); возможность рентабельной переработки рудных концентратов. 3. Пригодность конечных продуктов переработки рудных концентратов для дальнейшего производства (например, при выплавке стали желательно, чтобы в железной руде присутствовали в небольшом количестве такие примеси, как фосфор).
Прочие	1. Стоимость металлов на мировом рынке (с учетом спроса в будущем). 2. Условия разработки месторождения, стоимость добычи руд. 3. Вопросы законодательства применительно к добыче полезных ископаемых. 4. Вероятность изменения в будущем социальных, политических или экономических условий, что может воздействовать на ход разработки месторождения

ром; с другой стороны, для значительного числа элементов характерны бо́льшие концентрации, например, кларк железа достигает 47 000, а алюминия 75 100 весовых частей на миллион.

** Железо извлекают из руд, в которых его концентрация всего на один порядок (и меньше) превышает кларковое, алюминий — из нефелиновых сиенитов, где содержание алюминия в среднем не больше кларкового. Однако золото добывают из руд с концентрацией этого элемента не менее чем на три порядка выше кларковой.

*** Месторождение — природное скопление полезного ископаемого, которое в количественном и качественном отношении может быть предметом промышленной разработки при данном состоянии техники и в данных экономических условиях [Геологический словарь. М. Недра, 1978, т. 1, с. 423].

Таблица 4.2. **Среднее содержание различных элементов в земной коре и их концентрация в рудах**

Элементы	Пределы содержаний в земной коре, %	Концентрация в образцах различных руд, %
Al, Fe, Mg	1—10	Хр. Хамерслей, Fe $\geqslant$ 65
Ti, Mn	0,1	Марганцевые конкреции, Mn $\leqslant$ 40
S	0,01	
V, Cr, Zn, Ni, Cu, Co, Pb	0,001	Месторождение Камбалда, Ni 3,5%; медно-порфировые руды, Cu 0,5—1
U, Sn, As, Mo, W	0,0001	Данные по урану см. в табл. 1.3
Sb, Cd, Hg, Ag, Pd, Pt, Au	0,0001	Риф Меренски, бушвельдский комплекс, Pt + Pd 0,00057

ального рудного месторождения необходимо учитывать как особенности металлургической переработки руд, так и экономические факторы.

Хотя мы не собираемся детально рассматривать негеологические аспекты, учитывающиеся при проведении геологоразведочных работ, в табл. 4.1 приведем ряд данных об основных факторах, которые могут оказать решающее влияние на экономическую оценку месторождения.

Обнаружение того или иного элемента в аномально высоких концентрациях происходит, разумеется, крайне редко. Поэтому, изучая рудные месторождения, мы, как правило, имеем дело с необычными геологическими явлениями. При сравнении среднего содержания различных элементов в земной коре с их высокими концентрациями в промышленных рудных месторождениях (табл. 4.2) становится очевидным, насколько процессы рудообразования отклоняются от обычных «геологических норм». Специфика этих процессов в основном проявляется в характерных особенностях рудных минералов.

4.1.2. МИНЕРАЛОГИЯ

Бóльшую часть породообразующих минералов составляют силикаты, в то время как подавляющее большинство рудных минералов входит в состав таких природных соединений, как сульфиды, сульфаты, окислы и др. (табл. 4.3). По физическим свойствам и химическим особенностям рудные минералы резко отличаются от породообразующих силикатов, что предопределяет особые черты их поведения при магматических и осадочных рудообразовательных процессах. Эти свойства обусловливают прежде всего способность сегрегации рудных минералов от остальной массы. Так, благодаря своей относительно высокой плотности сульфиды и окислы

Таблица 4.3. **Схематическая классификация рудных минералов**

Соединения	Характеристика
Сульфиды	Общая формула A_mX_n, где A — один или несколько металлов; X — сера, мышьяк, сурьма, висмут, селен или теллур. Такие элементы, как Ag, Co, Cu, Fe, Hg, Ni, Mo, Pb, Zn, образуют важные сульфиды в природе
Сульфосоли	Общая формула $A_mB_nS_p$, где A — один или несколько металлов; B — As, Bi или Sb; S — сера
Окислы, гидроокислы, соли кислородных кислот	Среди них встречаются рудные минералы таких металлов, как Cu, Cr, Fe, Mn, Ti, Sn, W, Zn, Th, U
Самородные элементы	В их числе Ag, Au, Cu, Pt и неметалл C (в виде алмаза)
Галоиды, карбонаты, нитраты, бораты, фосфаты, вольфраматы, силикаты	

металлов, а также самородные элементы обособляются в процессе осадочной дифференциации, образуя тяжелую минеральную фракцию.

В большинстве месторождений главные рудные минералы встречаются совместно с кварцем, кальцитом и другими минералами, не имеющими, как правило, практической ценности. Эти «ненужные» минералы, получившие название жильных, могут давать определенную информацию об условиях рудообразования. Относительное содержание рудных и жильных минералов в руде, а также степень трудности отделения их друг от друга влияют на рентабельность разработки того или иного месторождения. Например, вкрапленные сульфидные руды состоят из вмещающей породы, в которой рассеяны (вкраплены) рудные минералы в виде отдельных мелких зерен и минеральных агрегатов. Массивные же сульфидные руды состоят практически целиком из рудных минералов и содержат очень мало пустой породы; они формируют богатые рудные тела, такие как линзы, штоки, карманы и др.

Для получения достаточно полной характеристики рудных минералов необходимо исследовать их химический состав и изучить структуру кристаллических решеток. Многие минералы, однако, могут быть уверенно идентифицированы в штуфах или в полированных шлифах (так называемых аншлифах) по их характерным физическим свойствам или при помощи довольно простых методов диагностики.

Само собой разумеется, что специалисты знакомы с кристаллографическими особенностями и с физическими свойствами рудных минералов, на основании которых они диагностируются (табл. 4.4). Непрозрачные минералы изучают в аншлифах, помещаемых без покровного стекла на столик специального минералогического

Таблица 4.4. **Основные диагностические признаки, используемые для определения рудных минералов**

Свойства и методы	Исследуемые характеристики (примеры)
Кристаллографическая характеристика	Сингония, симметрия кристаллов, типичные кристаллографические формы, двойники и т. д.
Цвет, черта, блеск	Большинство благородных металлов, сульфидов и сульфосолей имеют металлический блеск
Плотность	Большинство рудных минералов, как правило, имеют более высокую плотность по сравнению с силикатами. Самородные элементы (Au, Ag) и минералы, в состав которых входят свинец и золото, отличаются очень высокой плотностью
Твердость	Рудные минералы классифицируются по твердости согласно шкале Мооса (от 1 до 10 усл. ед.). Микротвердость определяется по шкале Виккерса (к мягким относятся минералы с номерами <85, к минералам средней твердости — с номерами 85—230, к твердым — с номерами >230)
Магнитные свойства	Магнетит является сильно магнитным минералом, пирротин имеет менее ярко выраженные магнитные свойства, ряд других минералов притягиваются электромагнитом
Электропроводность	Благородные металлы обладают высокой электропроводностью, так же как большинство сульфидов и сульфосолей металлов
Флюоресценция	Некоторые минералы, например шеелит, флюоресцируют в ультрафиолетовом излучении
Радиоактивность	Излучение, связанное с радиоактивным распадом урана, тория и некоторых других элементов, фиксируемое счетчиком Гейгера; для диагностики радиоактивных минералов используется также чувствительная пленка
Оптические свойства	Отражательная способность и двуотражение
Признаки, связанные с вторичными изменениями минералов	Окисление сульфидов и сульфосолей некоторых металлов приводит к появлению ярко выраженных диагностических признаков (например, «павлинья руда» на блестящих окисленных поверхностях минералов меди; серые папоротникообразные сростки некоторых минералов марганца)
Микрохимический анализ	Метод контактных отпечатков, применяемый для исследования минералов в полированных образцах — аншлифах
Полный анализ	Выполняется с помощью электронного микроскопа
Исследование кристаллической структуры	Привлекается рентгеноструктурный анализ (получение рентгенограмм)

микроскопа, в котором используются поляризованные падающий и отраженный лучи света.

Основные оптические свойства рудных минералов, которые необходимо усвоить специалистам, это — цвет, отражательная способность и двойное отражение, или двуотражение* (для анизо-

* Способность минерала изменять свой цвет при исследовании в отраженном поляризованном свете в зависимости от ориентировки.

тропных минералов). Отражательная способность определяется относительным количеством света, отраженного от поверхности рассматриваемого минерала. Относительная отражательная способность может быть установлена путем сравнения различных минералов в одном аншлифе. Количественные значения этого параметра изменяются от $<10\%$ для большинства силикатов до $>90\%$ для самородного серебра.

Множество других способов может быть использовано при изучении аншлифов. Например, относительная твердость определяется различной сопротивляемостью минералов полировке. Количественная оценка такого свойства, как микротвердость, проводится путем измерения углублений (вмятин, зазубрин), оставленных алмазным резцом под определенным давлением.

Кроме описанных методов широко применяется микрохимический анализ. Для получения нужного результата на срез минерала помещают химический реагент; при этом может быть использована специальная бумага, пропитанная соответствующими реактивами. В присутствии того или иного минерала бумага изменяет свой цвет (в зависимости от пропиточного состава).

4.1.3. ГЕНЕЗИС РУДНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ

Рудные месторождения классифицируются по условиям их образования и типу полезного ископаемого. Приведенная здесь классификация (табл. 4.5) построена на геологической основе.

Таблица 4.5. **Классификация рудных месторождений (на геологической основе)**

Процессы, обусловившие образование месторождений	Типы месторождений
Магматические	Собственно магматические, образовавшиеся в процессе кристаллизации магматических расплавов. Пневматолитовые, образовавшиеся из остаточных магматических флюидов. Эксгаляционные, генетически связанные с вулканическими очагами. Некоторые гидротермальные
Седиментационные	Россыпные, образовавшиеся в результате процессов физического выветривания. Хемогенные (в том числе морские глубоководные). Остаточные и продукты выветривания. Некоторые гидротермальные
Метаморфические	Пирометасоматические, приуроченные к эндо- и экзоконтактовым зонам интрузий. Другие метасоматические. Месторождения рассмотренных выше типов, измененные под действием процессов метаморфизма
Гидротермальные	Жильные. Метасоматические

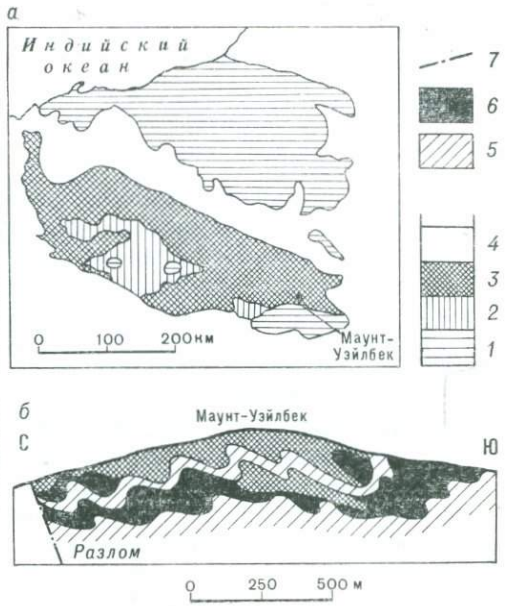


Рис. 4.1. Формирование рудного тела. Две стадии рудообразования, показанные на примере полосчатых железистых кварцитов хр. Хамерслей (Западная Австралия).

Крупное осадочное месторождение железа *(а)* представлено стратиформными залежами. В районе Маунт-Уэйлбек и на других участках рудного поля в результате постседиментационных процессов содержание железа настолько возросло *(б)*, что разработка месторождения стала экономически выгодной. Прослой глинистых сланцев в кварцитах служит маркирующим горизонтом, контролирующим высококачественные руды (профиль по данным М. Ниншоу [1976 г.], экскурсия XXV МГК, путеводитель № 50).
1 — архейский фундамент (граниты и метавулканиты); группы: *2* — Фортескью, *3* — Хамерслей (железистые кварциты), *4* — Уайлу (*2—4* — нижний протерозой); *5* — глинистые сланцы; *6* — железная руда (гематит) с содержанием железа ≥ 63%; *7* — разлом.

Существует принципиальное различие между рудами сингенетичными, возникшими одновременно с вмещающими породами (в результате одного и того же геологического процесса), и рудами эпигенетичными, образовавшимися после сформирования пород, в которых они заключены. В целом руды, происхождение которых связано с магматическими и осадочными процессами, как правило, сингенетичные *; руды пневматолитового и гидротермального генезиса являются эпигенетичными. Как показано ниже, отнесение месторождений к тому или иному типу — сингенетичному или эпигенетичному — достаточно условно.

Хотя месторождения, в том числе и крупные, могли быть сформированы в результате единого одноактного процесса (например, хромиты собственно магматического генезиса), формирование большинства рудных месторождений обусловлено действием многостадийных рудообразующих процессов. Это естественно, так как концентрации многих металлов в земной коре очень низкие (см. табл. 4.2).

Можно привести два примера. Формация полосчатых железистых кварцитов хр. Хамерслей (Западная Австралия) была обогащена железом в результате хемогенных (органогенных) процессов в период седиментации и является, следовательно, сингенетичной вмещающим отложениям (см. раздел 4.4.4). Среднее содержание железа в руде ниже 55%, однако его перераспределение в результате последующей фазы складчатости и трещиноватости привело к повышению концентрации местами до 65%, и основные скопления железных руд оказались приуроченными к участкам эпигенетичного обогащения (рис. 4.1). Второй при-

* Речь идет о так называемых собственно магматических месторождениях (сегрегационных, ликвационных и др.); примерами сингенетичных осадочных месторождений могут служить некоторые месторождения железа и марганца.

мер: оловянные руды, разрабатываемые в небольших масштабах в центральной части Свазиленда, переотложены из коры выветривания, образовавшейся на пегматитах, содержащих касситерит (SnO_2). Концентрация олова в неизмененных пегматитах ниже промышленной, однако частичное удаление разложенных полевых шпатов и других силикатов под влиянием различных поверхностных процессов обусловило повышение концентрации касситерита, что делает экономически приемлемой добычу этой руды.

На заключительной стадии рудообразования часто происходит внедрение горячих химически активных флюидов. Растворимость и устойчивость многих рудных минералов изменяются в зависимости от окислительно-восстановительного потенциала и водородного показателя pH. Например, процесс окисления сульфидов более активно проходит в аэробной (окислительной) среде.

Местонахождение наиболее крупных рудных тел в пределах той или иной провинции часто оказывается непредсказуемым, отсюда и возникла поговорка рудоискателей «золото находится там, где его находят». Мы не ставим задачу детально рассмотреть все аспекты поисков рудных месторождений, но следует отметить, что решающее значение как для поисковиков, так и для геологов-рудников имеют те факторы, которые способствуют определению положения любого месторождения на площади и в разрезе.

4.2. РАЗВЕДКА РУДНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ

Открытие нового рудника обычно является конечным результатом многолетних исследований — разведки месторождения, определения его экономического потенциала (табл. 4.6). Этап разведки месторождения того или иного полезного ископаемого требует значительных затрат; например, в Северной Америке за период 1950—1970 гг. эти затраты составили до 1% общей стоимости добытых металлов.

Перспективные территории, выделенные в результате рекогносцировочных исследований, а также случайных открытий (многие рудопроявления были обнаружены благодаря усилиям «диких» рудоискателей), требуют более детального изучения. Оно проводится с целью выявления и оконтуривания рудных тел, как выходящих на земную поверхность, так и расположенных на некоторой глубине. Кроме того, необходимо проанализировать факторы, контролирующие размещение рудных тел в исследуемом регионе. При поисках новых месторождений в пределах известного рудного поля учитываются геологическая обстановка и структурные взаимоотношения уже обнаруженных рудных тел.

Более точные методы основаны на использовании характерных свойств рудных минералов: их плотности, электропроводности, магнитности либо (для урана и тория) радиоактивности. Окрашенные в «ржавые» коричневато-бурые цвета зоны окисления сульфидов металлов — железные шляпы, формирующиеся в процессе выветривания сульфидных залежей, могут служить надежным поисковым критерием рудных месторождений. Обломки горных пород с признаками рудной минерализации в ледниковых или аллювиальных отложениях либо аномально высокие содержания металлов в тонких фракциях шлихов, намытых из русло-

Таблица 4.6. **Стадии разведки рудных месторождений**

Стадии	*Исследования и их предпосылки*	Результаты и варианты решений
Решение о начале разведки месторождения	Геологические предпосылки, способствовавшие формированию оруденения нужного типа.	
	Данные о добыче рудных полезных ископаемых в прошлом.	
	Находки железных шляп или других признаков непромышленных рудопроявлений	
Региональные рекогносцировочные исследования	Аэрогеофизические исследования (магнитометрические, электромагнитные, радиометрические, гравиметрические).	Геологическая интерпретация геофизических и геохимических аномалий, обнаружение выходов рудных тел на земную поверхность, подача заявок.
	Геохимическая рекогносцировка (опробование донных осадков водотоков и водоемов).	
	Геологическая аэрофотосъемка и фотосъемка со спутников.	Отказ от проведения дальнейших, более детальных работ на бесперспективных территориях, аннулирование намеченной программы исследований
	Наземная геологическая рекогносцировка (например, маршрутные пересечения вкрест изучаемых толщ)	
Специализированное изучение перспективных районов	Геологическое картирование.	Открытие новых месторождений, подача заявок.
	Наземные геофизические съемки (гравиметрическая, магнитометрическая, методом электрических сопротивлений и т. д.).	Обнаружение погребенных («слепых») рудных тел.
	Геохимические съемки с детальным опробованием русловых осадков, наносов и почв.	Отказ от принятой программы и от проведения разведочных работ
	Проходка канав и шурфов, бурение разведочных скважин	
Детальное изучение и оценка рудного тела	Детальные топографическая и геологическая съемки объекта поисково-разведочных работ.	Решение о развитии добычи.
	Проходка буровых скважин, каротаж.	Прекращение работ.
	Петрографическое и химическое исследования керна.	Отказ от подачи заявки
	Отбор и анализ рудных образцов	

вых осадков, могут свидетельствовать о присутствии рудного тела, расположенного выше по течению от места отбора проб. Проходка мелких шурфов и канав может служить для вскрытия почвенного слоя или наносов, а также для обнаружения поверхностных рудопроявлений и железных шляп.

После обнаружения рудного тела начинается детальное изучение его морфологии и состава руд. На этой стадии разведки кар-

Рис. 4.2. Разработка месторождения открытым способом. Добыча железной руды в Хиббинге, штат Миннесота, США (аэрофотоснимок).

тирование рудных площадей дополняется бурением, каротажем скважин, комплексным исследованием керна и анализом образцов руд; это позволяет установить наличие (или отсутствие) промышленного оруденения и определить ценность месторождения в целом. Использование той или иной методики разведки определяется размерами месторождения, а также особенностями строения и генетическим типом рудных тел.

Небольшие рудные тела с очень ценной минерализацией (например, золотоносные жилы) можно разрабатывать с помощью шурфов, канав либо мелких шахт. Крупные же залежи, сложенные сравнительно малоценными рудами (например, медно-порфировыми или некоторыми железными) обычно эксплуатируют открытым способом (рис. 4.2). Глубокая разведка с сопутствующими ей затратами и техническими трудностями применяется в основном для рудных тел, выдержанных по простиранию и содержащих высокоценные руды (например, золото- и урансодержащие рифы Витватерсранда).

4.3. МЕСТОРОЖДЕНИЯ, СВЯЗАННЫЕ С МАГМАТИЧЕСКОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТЬЮ

4.3.1. МАГМАТИЗМ И СОПУТСТВУЮЩИЕ ЕМУ ПРОЦЕССЫ

Магма, образовавшаяся в результате частичного расплавления вещества мантии и глубоких частей земной коры, содержит металлы, которые в процессе кристаллизации расплава обособля-

ются, формируя магматические месторождения. Основные типы рудных месторождений, прямо или косвенно связанных с магматическими процессами, приведены в табл. 4.7 (см. также табл. 4.5).

Собственно магматические месторождения образуются в период затвердевания интрузивных пород и локализуются обычно в пределах магматических комплексов *. За счет металлов, выделяющихся из активного, богатого компонентами остаточного магматического расплава на последней стадии его кристаллизации, формируются так называемые пневматолитовые месторождения. Они получаются в результате реакций между летучими продуктами магматического очага и образовавшимися ранее породами. Такие месторождения встречаются в малых интрузиях, а также в виде жил и метасоматических рудных тел. Пирометасоматические месторождения образуются при высоких температурах в процессе взаимодействия рудных эманаций с вмещающими породами.

Флюиды, выделяющиеся из жерл подводных вулканов, могут создать эксгаляционные месторождения; вулканические газы, поступающие из жерл наземных вулканов, могут привести к формированию фумарольных месторождений. Циркуляция в горных породах вод, нагреваемых поднимающимся из глубин магматическим расплавом и часто имеющих ювенильное происхождение, приводит к образованию гидротермальных и метасоматических рудных тел; для них характерно зональное расположение вокруг плутонических либо субвулканических центров.

Оруденение и его тип, присущие той или иной магматической провинции, определяются составом материнской магмы и дифференциацией магматического расплава в процессе застывания. Поскольку эти особенности зависят от тектонической обстановки, магматические провинции могут быть подразделены на следующие пять типов.

1. Активные (разрастающиеся) окраины литосферных плит (срединно-океанические хребты) — ассоциации главным образом основных и ультраосновных изверженных пород.
2. Деструктивные окраины литосферных плит (орогенические пояса, вулканические островные дуги) — ассоциации основных и известково-щелочных пород, включая гранитоиды.
3. Континентальные рифтовые зоны — ассоциации основных и ультраосновных пород.
4. Континентальные кратоны (устойчивые внутренние участки литосферных плит) — ассоциации основных, щелочных, реже кислых пород; кимберлиты.
5. Раннедокембрийские зеленокаменные пояса, не имеющие аналогов в более молодых образованиях, — ассоциации основных пород, сопровождающиеся породами как ультраосновного, так и кислого состава.

Как видно из табл. 4.7, те или иные металлы преимущественно ассоциируют с изверженными породами определенного химиче-

---

* Собственно магматические месторождения подразделяются на раннемагматические (сегрегационные), позднемагматические (гистеромагматические) — образовавшиеся из остаточных рудных расплавов, и ликвационные — образовавшиеся путем разделения расплава на две несмешивающиеся жидкости: силикатную и рудную.

Таблица 4.7. **Эндогенные рудные месторождения**

Ассоциации магматических пород, геологическая ситуация	Основные рудообразующие процессы	Морфология и тип месторождения	Примеры месторождений	Главные полезные компоненты руд
А. Вулканогенные образования срединно-океанических хребтов. Активные окраины литосферных плит.	I. Эксгаляционные и гидротермальные в очагах подводного вулканизма.	Стратиформные залежи массивных сульфидных руд, сформированные на океаническом дне, или гидротермальные жилы и метасоматические рудные тела.	Комплекс Трудос, Кипр	Cu (Ni)
Реликты древней океанической коры — офиолитовые пояса	II. Магматические в ультраосновных интрузивных породах	Пластообразные залежи и рудные тела неправильной формы	Уральские горы, СССР	Cr
Б. Пояса зеленокаменно-измененных докембрийских вулканитов основного состава	I. Эксгаляционные.	Залежи массивных и вкрапленных сульфидных руд; стратифицированные железорудные формации.	Рудный пояс Абитиби, Канада	Cu, Zn, Fe, Au
	II. Собственно магматические.	Пластообразные залежи хромитов или скопления (сегрегации) никельсодержащих сульфидов.	Камбалда, Западная Австралия (Ni)	Ni, Cu, Cr
	III. Гидротермальные	Кварцевые золотоносные жилы, сформированные постмагматическими гидротермальными растворами	Блок Йилгарн, Западная Австралия	Au
В. Островные дуги, складчатые пояса	I. Эксгаляционные (типа Куроко).	Стратиформные залежи сульфидных руд в вулканитах, близких по составу к риолитам.	Куроко, Япония	Cu (Zn, Pb)
	II. Гидротермальные в районах развития кислых интрузий, в том числе субвулканических штоков (приводят к образованию медно-порфировых руд).	Бедные вкрапленные сульфидные руды в брекчированных и трещиноватых породах, в том числе над субвулканическими штоками.	Бингем, Юта (США)	Cu (Mo)
	III. Гидротермальные преимущественно в субвулканических зонах.	Полиметаллические сульфиды в виде вкрапленных руд, образующих гнезда, штокверки и секущие рудоносные жилы.	Западные районы США	Cu, Zn, Pb, Au, Ag, Sb, Mo
	IV. Пневматолитовые и гидротермальные в пределах и вблизи интрузивных штоков (сложенных породами кислого состава) и субвулканических интрузий (главным образом фанерозойского возраста)	Касситеритсодержащие кварцевые жилы и пегматиты; вкрапленные руды, иногда сопровождающиеся турмалинизацией	Анды, Боливия	Sn (W, Nb), U
Г. Континентальные рифты	I. Гидротермальные в плато-базальтах.	Самородная медь или сульфиды меди в лавовых полостях и в проницаемых слоях вулканитов.	Лавы Кьюинау, оз. Верхнее (Канада)	Cu
	II. Магматические в основных — ультраосновных интрузиях.	Стратиформные залежи хромита либо скопления (сегрегации) сульфидов	Комплекс Далат, оз. Верхнее (Канада)	Cr, Pt, Ni Cu
	III. Метасоматические в пределах и вблизи карбонатитов или в кислых породах щелочного ряда		Восточно-Африканский рифт	Nb, редкоземельные элементы
Д. Океанические острова, внутренние участки океанических плит	Незначительная минерализация			
Е. Континентальные кратоны	I. Геологическая ситуация и рудообразующие процессы аналогичны рассмотренным в пункте Г.I.		Сибирские лавы, СССР	Cu, Ni
	II. То же, что для пункта Г.II.		Бушвельдский комплекс, Южная Африка	Cr, Pt, Ti, Fe
	III. Магматические в анортозитах (большей частью протерозойского возраста).	Стратиформные залежи ильменита—гематита.	Бушвельдский комплекс, Южная Африка	Fe, Ti
	IV. Пневматолитовые вблизи гранитных штоков	Жильные месторождения с касситеритом	«Молодые граниты», Нигерия	Sn, Nb

ского состава. Так, хром, никель и платина почти исключительно связаны с основными или ультраосновными породами. Медь, цинк и золото часто концентрируются в дифференциатах * от среднего до основного состава, распространенных в провинциях основного вулканизма. Медь, цинк, свинец, золото, серебро и молибден ассоциируют с разнообразными вулканическими породами известково-щелочного ряда, приуроченными к островным дугам и орогеническим поясам, в то время как олово, вольфрам и уран тяготеют к плутоническим и субвулканическим центрам, где развиты породы кислого состава. Уран, торий и редкоземельные элементы концентрируются в щелочных комплексах, а источниками алмазов являются, по существу, только кимберлиты.

4.3.2. СОБСТВЕННО МАГМАТИЧЕСКИЕ МЕСТОРОЖДЕНИЯ

Промышленные месторождения хрома, никеля и металлов группы платины формируются в интрузиях ультраосновного — основного состава (либо эпизодически — в лавах) в результате магматической дифференциации. Кристаллизация хромита (Cr_2O_3), единственного минерала хрома, контролируется составом магмы и содержанием в ней кислорода. При определенных условиях достигается критическая стадия, когда этот минерал кристаллизуется в больших количествах и, поскольку он обладает высокой плотностью, скапливается на дне магматической камеры. В результате субгоризонтальные слои, обогащенные хромитом, перемежаются со слоями, образованными погрузившимися на дно силикатами ранних стадий формирования — оливином, пироксеном или плагиоклазом. Из рудных минералов встречаются магнетит и ильменит, а также самородная платина.

Все названные рудные минералы добываются в бушвельдском комплексе (Южная Африка) — в одной из наиболее рудоносных интрузий мира (рис. 4.3). Докембрийский бушвельдский комплекс образует группу гигантских чашеобразных тел — лополитов, представленных расслоенными интрузиями габбро, норитов и анортозитов, достигающих максимальной мощности 8 км. Диориты и граниты, обогащенные железом, кремнием, щелочными металлами и другими элементами, представляют собой конечный остаточный продукт этой магмы. Они перекрываются 2-километровым гранитным телом, образовавшимся, по-видимому, в результате расплавления коры под воздействием горячей основной магмы. Рудные месторождения бушвельдского комплекса дают такие металлы, как хром, платина, платиноиды, железо, ванадий, олово и др. Залежи в расслоенных интрузиях, как правило, приурочены к соответствующим уровням интрузивного тела.

Концентрация никеля в интрузивных комплексах обусловлена частично тем обстоятельством, что растворимость сульфидов в си-

---

* Дифференциаты — породы, образовавшиеся в результате процессов дифференциации магматического расплава.

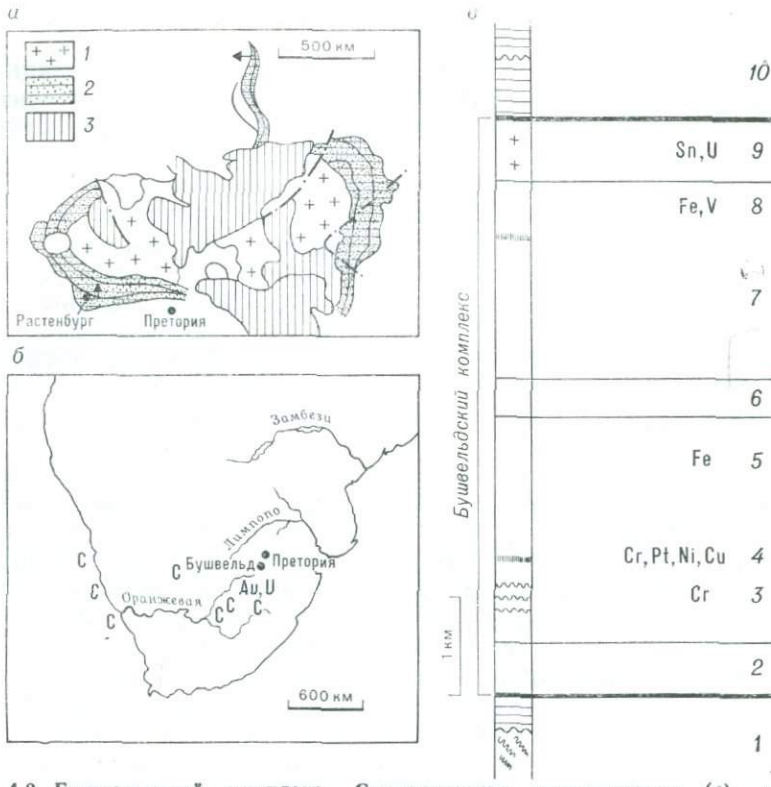


Рис. 4.3. Бушвельдский комплекс. Схематическая геологическая (*а*), обзорная (*б*) карты и характерный разрез близ Растенбурга (*в*).

Рис. *а*, *б*: *1* — граниты; *2* — базальные слои; *3* — перекрывающие слои; С — алмазы; Au, U — золото и уран в породах серии Витватерсранд.

Рис. *в*: *1* — подошва комплекса, осадочные породы протерозоя, лежащие на архейском метаморфическом фундаменте; *2* — базальная зона; *3* — критическая зона, расслоенные изверженные породы (габбро и т. д.); *4* — риф Меренски; *5* — главная зона, расслоенные нориты, габбро, анортозиты; *6* — габбро; *7* — главная зона, нориты с прослоями габбро; *8* — верхняя зона; *9* — кислые интрузивные породы; *10* — кровля комплекса, протерозойские лавы, перекрытые отложениями серии Карру.

ликатной магме ограниченная. При определенном содержании серы сульфидный расплав, в котором есть никель, медь и железо, обособляется в форме капелек; соединяясь, они образуют достаточно плотные жидкие тела, из которых могут быть сформированы залежи массивных сульфидных руд, содержащих пирротин, пентландит и халькопирит; они часто локализуются вблизи основания интрузии либо в подстилающих породах (в виде жилообразных тел).

Несомненно, крупнейшим источником добычи никеля является докембрийский лополит Садбери в провинции Онтарио (Канада) — интрузивное тело сложного состава. В нем представлен ряд магматических пород — от мафических (норитов) у подошвы до кислых в кровле интрузии. Никельсодержащие сульфидные руды встречаются по периферии массива.

4.3.3. ПНЕВМАТОЛИТОВЫЕ И ПИРОМЕТАСОМАТИЧЕСКИЕ МЕСТОРОЖДЕНИЯ

Остаточные флюиды, сохранившиеся после кристаллизации основной части магматического тела, обогащены такими элементами, как калий, рубидий, бериллий, литий, уран и торий, и летучими компонентами (H_2O, CO_2, F, Cl, P и S). Медь, олово, вольфрам и ниобий могут образовывать с летучими компонентами сложные соединения и отлагаться при процессах пневматолиза в дайках, жилах и метасоматических телах. Такие процессы, проходящие обычно при температуре 550—600°С, наиболее часты в пределах гранитных массивов и щелочных интрузивных комплексов, а также вблизи от них.

Пегматиты, наиболее типичные производные магматических флюидов на поздних стадиях их формирования, характеризуются необычно крупными размерами минеральных зерен, что обусловлено как активным ростом кристаллов, так и воздействием летучих компонентов. Гранитные пегматиты состоят в основном из щелочных полевых шпатов, кварца и мусковита. Обогащенные различными минералами гранитные пегматиты могут содержать турмалин, топаз, берилл, литиевую слюду, а также касситерит (SnO_2) — единственный промышленно важный минерал олова. Кроме того, в этих породах встречаются минералы вольфрама, урановая смолка, торианит (ThO_2) и церийсодержащий минерал монацит. Промышленная ценность пегматитов определяется не только содержанием редких элементов, но и присутствием самоцветов, крупнокристаллических полевых шпатов и лейст слюды, используемых как керамический и изоляционный материал.

Взаимодействие летучих компонентов со сформировавшимися ранее изверженными либо с вмещающими породами может приводить к замещению полевых шпатов мусковитом и (или) турмалином; этим процессам в гранитах иногда сопутствует выделение касситерита. Эффектные продукты контактовых изменений пород — скарны — можно наблюдать в известняках, особенно в тех случаях, когда летучие компоненты богаты железом. Скарны представляют собой крупнокристаллические агрегаты силикатов железа и кальция в мраморах *. Со скарнами могут быть связаны промышленные скопления магнетита, гематита и сульфидов.

Классическим примером пневматолитовых месторождений могут служить рудные поля Юго-Западной Англии, приуроченные к герцинским гранитам, которые разрабатывались еще в доисторическое время. Обнажающиеся на земной поверхности граниты представляют собой препарированные участки кровли погребенного батолита. По-видимому, именно вокруг этих интрузивных центров осуществлялся пневматолиз и формировались гидротермальные системы (рис. 4.4). Пегматитовые дайки и силлы, прорывающие палеозойские сланцы (киллас **),

* В советской геологической литературе под скарнами понимают метасоматические образования, развитые как в контактовых зонах карбонатных и силикатных пород, так и вне их, и сложенные высокотемпературными известково-магнезиально-железистыми силикатами и алюмосиликатами.

** Английский термин, принятый для обозначения любых горных пород, подвергшихся метаморфизму в контакте с гранитами.

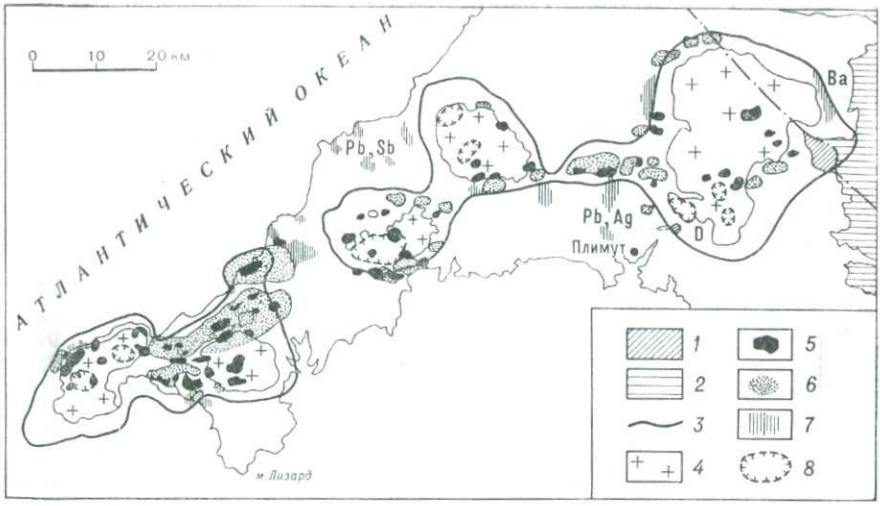


Рис. 4.4. Рудное поле Юго-Западной Англии. Распределение пневматолитовых месторождений олова, гидротермальных месторождений меди, свинца, цинка, серебра и других металлов, а также залежей пластичных глин и каолина (по данным Дж. Мура, с некоторыми изменениями [1982 г.]).

На рисунке показана взаимосвязь между герцинскими гранитами и размещением рудных месторождений.
1 — палеогеновые осадки, в том числе пластичные глины; *2* — пермо-триасовые отложения; *3* — предполагаемый глубинный контур гранитного батолита; *4* — граниты (выходы на земную поверхность); *5* — рудопроявления олова; *6* — системы меднорудных жил; *7* — жилы со свинцовым оруденением и сопутствующими минералами (Zn, Ag, Sb, иногда Ba); *8* — зоны каолинизации.

прослеживаются от гранитов к гидротермальным кварцевым жилам. Характерными минералами не только для пегматитов, но и для контактово-замещенных пород являются мусковит и турмалин. Грейзены, состоящие почти нацело из кварца, мусковита и топаза, и кварц-турмалиновые породы являются конечными продуктами процессов замещения.

Залежи олова и вольфрама, представленных соответственно касситеритом и шеелитом, приурочены к внутренней (эндоконтактовой) зоне гранитных интрузий. Внешняя (экзоконтактовая) зона шириной 5 км и более характеризуется развитием гидротермальных сульфидных месторождений. В пределах этой зоны залежи цинка и меди расположены преимущественно вблизи гранитных тел, а скопления свинцово-цинковых руд локализованы на некотором удалении от них. Спорадически представлены урановая смолка и другие минералы урана.

4.3.4. ЭКСГАЛЯЦИОННЫЕ И СУБВУЛКАНИЧЕСКИЕ МЕСТОРОЖДЕНИЯ

Рудные месторождения, образовавшиеся в результате вулканической деятельности, могут локализоваться в лавах, в туфогенно-осадочных толщах, а также в неглубоко залегающих интрузивных массивах. Иногда месторождения располагаются вокруг выводных каналов вулканов, по которым магма поднимается на по-

верхность из земных недр, либо вблизи вулканических кратеров, из которых она изливается. Третичные вулканические провинции на западе Северной Америки, в Центральной Америке и в Андах, содержат богатые и разнообразные рудные компоненты (см. табл. 4.7).

Выход рудоносных флюидов, поступающих из жерл подводных вулканов, в некоторых местах (например, на дне Красного моря) может приводить к формированию минерализованных рассолов высокой плотности, скапливающихся в пониженных участках донного рельефа. Среди рудоносных осадочных пород, отложившихся в таких условиях, можно упомянуть полосчатые кремнистые сланцы (чёрты), содержащие минералы железа и марганца; местами встречаются рудные тела с сульфидным железным, медным или цинковым оруденением. Согласно подсчетам в глубокой впадине Красного моря Атлантис-II находится 2,5 млн. т цинка.

Эксгаляционные залежи сульфидов часто представлены полосчатыми рудами и обычно локализуются над вертикальными трубообразными зонами минерализации, приуроченными к каналам, по которым рудоносные флюиды поднимаются к поверхности морского дна. К эксгаляционным сульфидным месторождениям островных дуг относятся, например, медные залежи типа Куроко (Япония).

Из вулканических газов наземных вулканов могут отлагаться сера и сульфиды некоторых металлов (мышьяка, ртути и др.), образующих инкрустации *. Совершенно очевидно, что на таких месторождениях особенно сказывается влияние процессов эрозии и выщелачивания, в силу чего они сохраняются только в молодых вулканических провинциях.

В субвулканических регионах рудные месторождения представлены порфировыми (вкрапленными) медными рудами, имеющими важное промышленное значение. Они присутствуют во многих мезозойских и третичных орогенических поясах и островных дугах, где развиты известково-щелочные вулканиты (рис. 4.5).

Оруденение такого типа локализуется обычно вокруг небольших по размеру (как правило, менее 3 км в диаметре) штоков от гранодиорит-порфирового до монцонитового состава, расположенных на глубине не более нескольких километров от земной поверхности.

Руды, состоящие из пирита и халькопирита (иногда сопровождающихся молибденитом) концентрируются в верхней части таких интрузивных тел, проникая обычно и в боковые породы. Как видно на примере медно-порфировых руд Бингема (штат Юта, США), в них часто наблюдается концентрическая зональность. Внутренняя зона характеризуется рассеянной вкрапленностью сульфидов меди и (или) молибдена; она окаймляется зоной, в пределах которой те же сульфиды образуют тонкую сеть прожилков (иногда с присутствием минералов свинца, цинка и серебра). Вмещающие породы в рудных зонах, а местами даже за их пределами сильно изменены вплоть до образования хлорита и мусковита, которые в ряде случаев сопровождаются кальцитом, эпидотом и глинистыми минералами.

---

* Инкрустации — корочки или твердые минеральные оболочки на поверхности горных пород.

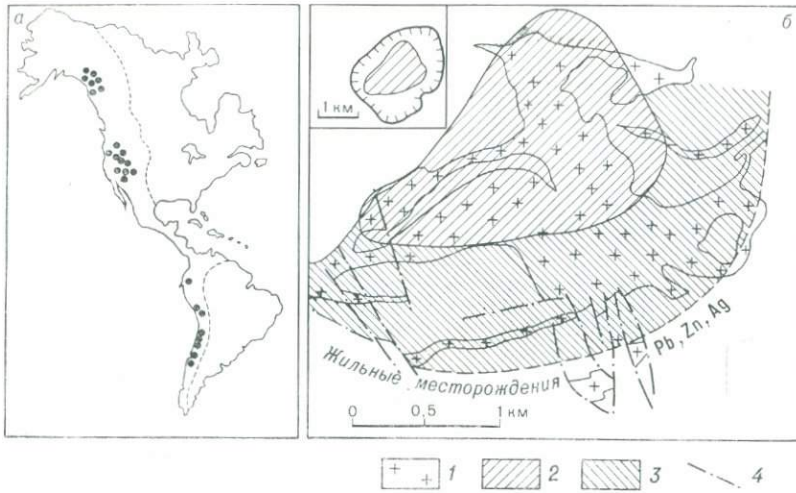


Рис. 4.5. Месторождения порфировых руд (по данным К. Дж. Диксона).

а — распределение главных месторождений медно-порфировых и молибденовых руд в пределах Тихоокеанского орогенического пояса; *б* — оруденение, приуроченное к интрузивному телу гранодиорит-порфиров неправильной формы (Бингем-Каньон, штат Юта, США), на врезке показаны размеры открытой горной выработки (карьера).
1 — интрузивные породы (гранодиорит-порфиры); *2* — медно-порфировые и молибденовые руды; *3* — зона развития меднорудных жил; *4* — разломы.

Рудообразование обусловлено, по-видимому, быстрым осаждением летучих серосодержащих компонентов по мере приближения магматического расплава к земной поверхности. Когда гидротермы распространяются по соответствующим каналам в виде газовых растворов, создается высокое давление, что приводит к разрушению боковых пород. В образовавшихся трещинах отлагаются минеральные компоненты этих флюидов, вследствие чего происходит формирование внешних зон минерализации в виде сети мелких жил и прожилков *. Бедность медных руд (~1% Cu) и рассеянный тип оруденения требуют сплошной выемки рудной массы открытым способом. Однако значительные запасы руд, а также возможность попутной добычи некоторого количества серебра и золота определяют высокую экономическую ценность рассматриваемых месторождений.

4.4. РУДНЫЕ МЕСТОРОЖДЕНИЯ, СВЯЗАННЫЕ С ПРОЦЕССАМИ СЕДИМЕНТАЦИИ, ДИАГЕНЕЗА И ВЫВЕТРИВАНИЯ

4.4.1. РУДНАЯ МИНЕРАЛИЗАЦИЯ В ОСАДОЧНЫХ ТОЛЩАХ

Рудным месторождениям осадочного генезиса свойственны в общем многие характерные черты осадочных пород (табл. 4.8). Рудные тела, залегающие согласно напластованию вмещающих

* Штокверковый тип оруденения.

Таблица 4.8. **Месторождения, обусловленные экзогенными процессами**

Вмещающие породы	Основные рудообразующие процессы	Морфология и тип месторождения	Примеры месторождений	Главные полезные компоненты руд
А. Породы в корах выветривания и остаточные образования	I. Аккумуляция in situ в результате удаления растворимых компонентов (особенно характерна для тропических районов)	Невыдержанные плащеобразные залежи и скопления неправильной формы у земной поверхности или приуроченные к зонам несогласий	Бокситы — Ямайка; силикаты никеля — Новая Каледония; латериты — тропическая Африка	Al, Ni, Fe, Cu, Zn, Pb, стройматериалы
	II. Выщелачивание подвижных рудных компонентов в зоне окисления и последующее переотложение вблизи уровня *грунтовых вод*	Зоны вторичного обогащения сульфидных месторождений у земной поверхности или в *зонах несогласий*		Cu, Pb, Zn
Б. Обломочные отложения	I. Механическая сегрегация и накопление минералов тяжелой фракции	В рыхлых выветрелых наносах (элювий); в виде согласных прослоев и линз в русловых и пляжевых осадках	Россыпи — р. Оранжевая, Намибия (алмазы); побережье Квинсленда (монацит); Калифорния (золото)	Au, Sn, алмазы, монацит
	II. Аналогично пункту Б.I; скопления минералов тяжелой фракции обычно подвергались диагенетической переработке	Древние россыпи, представленные конгломератами или кварцитами	Витватерсранд (Южная Африка); Блайнд-Ривер, Онтарио	Au, U
	III. Аналогично пункту Б.I	Стратиформные, линзовидные залежи	Сулливан, Британская Колумбия; Брокен-Хилл, Новый Южный Уэльс	Pb, Zn
	IV. Отложения рудных минералов *из поровых вод* на стадии диа- и эпигенеза, иногда в восстановительной обстановке	Рудные тела линзовидной *или неправильной* формы	«Красноцветные» залежи меди — плато Колорадо; рудные тела «роллфронт»	Cu, V, U
В. Глинистые осадки обогащенные ОВ (сапропелевые глеевые илы)	Адсорбция рудного вещества на глинистых частицах; редукция сульфатов в результате бактериальной деятельности	Рудные залежи, обычно приуроченные к известковым глинам	Медистые сланцы пермского возраста; месторождение Мансфельд, ГДР	Cu (Zn, Pb)
Г. *Карбонатные породы* и эвапориты	*Отложение рудных минералов* из циркулирующих в породах соленых водных растворов	*Метасоматические* тела неправильной формы, гидротермальные жилы, заполнение полостей в брекчиях, часто — рудные скопления в известняковых рифах, доломитах или эвапоритах	*Месторождения бассейнов* рек Миссисипи и Миссури (миссисипский тип оруденения)	Pb, Zn
Д. Различные типы вмещающих пород	I. Фациальный контроль в областях развития водорослевых рифов	Стратиформные рудные тела; характерны тела неправильной формы	Медный пояс Центральной Африки	Cu, Co
	II. Кислый подводный вулканизм (в морских бассейнах)	Линзовидные рудные тела	Месторождение Маунт-Айза, Квинсленд	Pb, Zn, Cu
Е. Хемогенные осадки	I. Осаждение рудного вещества и диагенетическая переработка, активизированные *в ходе органических процессов*	Полосчатые железорудные формации (железистые кварциты), *залежи с прослоями* чертов и (или) карбонатов; возраст формаций докембрийский	Озеро Верхнее, Канада, хр. Хамерслей, Западная Австралия	Fe
	II. Осаждение рудного вещества в прибрежных условиях; диагенетическая переработка	Железняки (пластовые залежи), часто оолиты	Железные руды Клинтона, США; юрские месторождения Нортхэмптоншира, Великобритания	Fe
	III. Осаждение рудного вещества в мелководных, частично замкнутых морских бассейнах	Согласные рудные линзы в обломочных породах и известняках	Никополь, СССР (никопольский тип оруденения)	Mn
	IV. Осаждение рудного вещества *в глубоководных океанических* бассейнах	Рудные залежи на океанической *дне, сложенные* конкрециями и корковыми образованиями	Марганцевые конкреции — Тихий океан (наиболее характерны для широт 0°—20° с. ш.)	Mn (Fe), Ni
	V. Эксгаляционное рудоотложение			

пород, получили название стратиформных. Большинство таких тел имеют пластообразную форму. Распределение осадочных руд, контролируемое специфическими условиями осадконакопления, определяется палеогеографическими и фациальными факторами. Однако строение многих месторождений детально отражает видоизменения, обусловленные влиянием диагенетических и (или) низкотемпературных гидротермальных процессов, действовавших в постседиментационный период.

В ходе этих процессов на стенках трещин и других полостей образуются небольшие желваки сульфидов, а также кристаллические корочки. Залежи, сформировавшиеся в результате переотложения рудного вещества в пределах осадочной толщи, могут и не быть строго согласными вмещающим породам, хотя многие из них являются стратифицированными, т. е. приуроченными к определенному стратиграфическому подразделению.

4.4.2. МЕСТОРОЖДЕНИЯ, ПРИУРОЧЕННЫЕ К ОБЛОМОЧНЫМ ПОРОДАМ

Россыпные месторождения образуются в результате аккумуляции зерен тяжелых минералов, освободившихся в процессе выветривания более древних рудоносных толщ. Они формируются среди аллювиальных и береговых осадков, где механическая сортировка обломочного материала дополняется активным воздействием волн и течений. Большинство известных россыпей имеют молодой геологический возраст; многие из них приурочены к современным речным системам и морским побережьям.

Золото аллювиальных россыпей, возникших при разрушении коренных месторождений — гидротермальных жил третичного возраста, было главным объектом золотой лихорадки XIX — начала XX столетия, охватившей Калифорнию и Клондайк. Кустарная добыча золота из россыпей проводилась путем отделения его от пустой породы, что достигалось шлихованием — промывкой рыхлых аллювиальных и делювиальных осадков в лотках или ковшах.

Речные и морские россыпи касситерита составляют бóльшую часть ресурсов олова, добываемого в Малайзии и Таиланде, где материнские коренные породы — оловоносные граниты — датируются в первом случае поздним палеозоем, а во втором — ранним мезозоем. Многие из этих залежей могут разрабатываться с использованием драг и землечерпалок.

Более древние россыпи встречаются в тех же литолого-фациальных условиях, но так как аллювиальные и береговые отложения подвергались интенсивной эрозии в течение длительного времени, эти россыпи не столь широко распространены, как современные. Одна группа докембрийских залежей золота и (или) урана, которые скорее всего первоначально являлись россыпями, имеет чрезвычайно важное значение. Это — золото- и урансодержащие конгломераты серии Витватерсранд, которые развиты в Южной Африке, где установлен их типовой разрез, в Бразилии (золото-

рудное месторождение Жакобина), в Канаде (*урагоносные залежи* Блайнд-Ривер к северу от оз. Гурон) и, возможно, в Северной Австралии (уран).

В районе Иоганнесбурга (ЮАР) породы архейского фундамента, содержащие гидротермальные месторождения золота, несогласно перекрываются мощной толщей, самым важным элементом которой является серия Витватерсранд, отложившаяся около 2600 млн. лет назад (рис. 4.6; обзорную карту см. на рис. 4.3). Осадочная толща, сложенная переслаивающимися песчаниками, конгломератами и глинистыми сланцами, сформировалась в бассейне размерами по меньшей мере 350×250 км. Водные потоки, переносившие обломочный материал, впадали в этот бассейн в разных местах у его северного и северо-западного берегов.

Рудные залежи относятся к типу стратифицированных; они локализованы в слоях конгломератов, мощность которых обычно составляет всего несколько метров. Конгломераты, получившие местное название рифов или банкетов *, наиболее широко развиты вблизи северной окраины бассейна, где прослои с богатым оруденением представляют собой русловые залежи, радиально расходящиеся от мест впадения рек в бассейн. «Рифы» обнажаются на поверхности в пределах Иоганнесбурга, именно там, где были найдены первые золотые россыпи.

Конгломераты состоят из небольших галек кварца, плотно «упакованных» в цементирующей массе, сложенной обломками кварца, циркона и хромита наряду с пиритом, уранинитом и мельчайшими частицами золота. Уран заключен главным образом в тонких прожилках, а большая часть пирита (составляющего до 10% породы) встречается в виде тонких зернистых мозаичных образований, которые, по всей вероятности, кристаллизовались in situ. На основании приведенных данных можно сделать вывод, что эти руды по своему происхождению являются не осадочными, а эпигенетичными гидротермальными залежами, приуроченными к конгломератам, которые, очевидно, оказались достаточно проницаемыми для проникновения в них растворов-минерализаторов. В настоящее время многие геологи считают, что рудные тела первоначально сформировались в виде россыпей, но впоследствии были изменены под действием диагенетических и (или) гидротермальных процессов.

Другие рудные месторождения во вмещающих обломочных породах упоминались в связи с урановыми рудами типа «роллфронт». Аналогичные красноцветные руды меди и ванадия сформировались в результате реакций с металлоносными гидротермальными растворами (см. табл. 4.8, пункт Б.IV). Многие глинистые отложения, особенно с относительно высокими концентрациями органического вещества, содержат ионы химически активных металлов, адсорбированные на глинистых частичках, и сульфиды, образующиеся в результате восстановления сульфатов в морской воде. Залежи такого типа представлены пермскими медистыми сланцами, развитыми на территории ГДР и Польши; это битуминозные

---

* Плотные конгломераты, содержащие гальку жильного кварца, заключенного в кремнистом цементе.

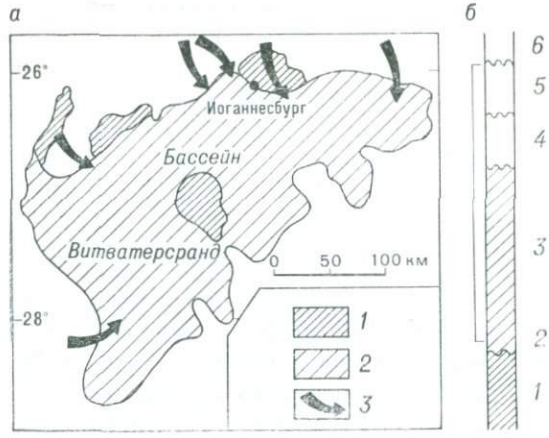


Рис. 4.6. Серия Витватерсранд.

На схематической карте *(а)* показаны предполагаемые первоначальные размеры седиментационного бассейна Витватерсранд и места впадения в него рек, привносивших обломочный материал. На большей части бассейна отложения серии Витватерсранд погребены под отложениями формаций Вентерсдорп, Трансвааль и более молодых толщ. Глубокие шахты вкрыли золотоносные горизонты.

1 — породы фундамента; *2* — серия Витватерсранд; *3* — места впадения рек в седиментационный бассейн.

На стратиграфической колонке *(б)* отражено положение в разрезе серии Витватерсранд и локально развитой формации Доминион-Риф, перекрывающей золотоносные породы фундамента.

1 — архей, метаморфический фундамент — граниты и пояса зеленокаменных пород с широко распространенным золотым оруденением; *2* — нижний протерозой, фельзические (кислые светлоокрашенные) вулканиты и золотоносные осадочные породы формации Доминион-Риф; *3* — серия Витватерсранд, кварциты и глинистые сланцы (большей частью аллювиальные), переслаивающиеся с конгломератами, содержащими кварцевую гальку, к конгломератам приурочено золото-урановое оруденение; *4* — серия Вентерсдорп, лавы основного состава, континентальные осадки; *5* — система Трансвааль, кварциты, доломиты, полосчатые железистые кварциты, глинистые сланцы, фельзические лавы; *6* — верхний протерозой и фанерозой, отложения системы Карру (континентальные осадки).

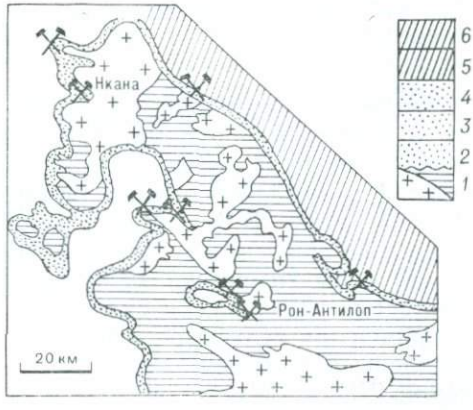


Рис. 4.7. Месторождения меди (показаны скрещенными молотками) в пределах Катангского пояса, Замбия (по данным Ф. Мендельсона).

Показано взаимоотношение между рудоносной нижнероэнской группой и фундаментом. Рудоносная формация мощностью 1—65 м сложена доломитами, образовавшимися из водорослевых рифов, и черными глинистыми сланцами (окаймляющими эти рифы), к которым приурочена медно-сульфидная минерализация.

1 — фундамент, метаморфические породы и граниты; *2—4* — нижнероэнская группа (мощность до 100 м): *2* — формация Футуолл, преимущественно песчаники, *3* — рудоносная формация, *4* — формация Хэнгинг-Уолл, песчаники, глинистые сланцы; *5* — верхнероэнская группа, доломиты, глинистые сланцы, кварциты, 600 м; *6* — группа Мвашиа, глинистые сланцы, доломиты, 600 м.

доломитистые сланцы (так называемый купфершифер), отложившиеся в солоноватоводном анаэробном бассейне. Из них получают главным образом медь и в несколько меньшем количестве — свинец и цинк.

Наконец, следует упомянуть о Медном поясе Центральной Африки, хотя там вмещающие породы представлены как обломочными, так и карбонатными отложениями (рис. 4.7, см. табл. 4.8). Породы верхнедокембрийской катангской надгруппы несогласно залегают на фундаменте, сложенном гранитами и кристаллическими сланцами. Нижние толщи катангской формации представлены континентальными отложениями. Изменение характера осадконакопления, что обусловило медную минерализацию, последовало за вторжением сюда моря. Рудные тела, сложенные пиритом, халькопиритом, борнитом и халькозином, локализованы в глинистых слоях рудной формации и отчетливо контролируются осадочными фациями. Рудные залежи изменялись под влиянием процессов растворения и переотложения в период складчатости и метаморфизма в конце докембрийской эры.

4.4.3. МЕСТОРОЖДЕНИЯ В КАРБОНАТНЫХ ПОРОДАХ

Многие известняки, особенно рифовые, имеют первичные пустоты и вторичные полости, возникшие в процессе доломитизации или химического выветривания. Поэтому такие породы являются благоприятными для формирования постседиментационных и гидротермальных рудных тел, а также залежей нефти и газа. Свинцово-цинковые месторождения миссисипского типа представлены стратиформными залежами, приуроченными к толщам карбонатных пород; они служат одним из главных ресурсов свинца и цинка в США. Месторождения этого типа расположены на стыке штатов Миссури, Теннесси и Оклахома. Они локализованы в известняках различного возраста (от кембрия до карбона), преимущественно мелководных рифовых фаций. Связь с этими осадочными фациями хорошо прослеживается также на месторождении Пайн-Пойнт вблизи Большого Невольничьего озера в Канаде (см. рис. 3.7), приуроченном к девонскому рифу.

Главные рудные минералы свинца и цинка — галенит (PbS) и сфалерит (ZnS) — вместе с типичными жильными минералами флюоритом, баритом и другими иногда слагают пластовые залежи, но более часто — метасоматические рудные тела неправильной формы. Эти минералы встречаются также в виде кристаллических агрегатов, выполняющих трещины и образующих рудные жилы. По составу жидких включений в сульфидных или жильных минералах можно предположить, что отложение рудного вещества происходило в сильноминерализованных водах при температуре 100—150 °С. Изотопный состав свинца свидетельствует о том, что эти рассолы переносили рудные компоненты, происхождение которых связано с несколькими источниками. Во многих месторождениях обнаружено присутствие углеводородов (в незначительном количестве), что способствовало более активному протеканию рудообразующих процессов.

Оруденение миссисипского типа обычно связывают с рассолами, выживаемыми под воздействием диа- и эпигенетических про-

цессов из мощных толщ. Эти погребенные минерализованные воды, нагретые в результате глубокого погружения, захватывали рудные компоненты из осадочных пород, по которым они мигрировали вверх по восстанию пластов к окраинам бассейна либо к его возвышенным участкам. Отложение сульфидов может быть обусловлено изменениями температуры и состава растворов при их внедрении в проницаемые известняки.

4.4.4. ЖЕЛЕЗНЫЕ РУДЫ

Более 90% общего количества железных руд, добываемых ежегодно в мире (800—900 млн. т), приходится на месторождения осадочного генезиса. Формирование этих месторождений и довольно сходных с ними марганцевых залежей (см. табл. 4.8) обусловлено главным образом тем, что закисное (Fe^{2+}) и окисное (Fe^{3+}) *железо в аэробных условиях ведут себя по-разному. Окис*ные соединения железа почти нерастворимы в поверхностных водах и устойчивы в присутствии кислорода воздуха. Поэтому железо, образующееся при процессах выветривания, должно накапливаться в виде окисных соединений в рыхлых остаточных отложениях либо в поровых пространствах аллювия. Ярко-красные, коричневые или желтые цвета гематита (Fe_2O_3) и гидроокисла железа — лимонита — являются причиной характерной «железистой» окраски латеритов, железных шляп и красноцветных отложений континентальных фаций. Железо в растворах переносится главным образом в закисной форме; металл легко выпадает в осадок при изменении показателей Eh или pH либо при смешивании речных (пресных) и морских вод.

Устойчивость соединений закисного железа была, по всей вероятности, более высокой в раннедокембрийское время, когда из-за относительно низкого уровня органической жизнедеятельности земная атмосфера была не столь богата кислородом. Поэтому не удивительно, что среди железных руд осадочного происхождения выделяются две группы, различные по своему химическому составу: 1) полосчатые железистые кварциты, датируемые ранним докембрием — от архея до раннего протерозоя; 2) железняки преимущественно фанерозойского возраста (рис. 4.8).

Полосчатые железистые кварциты. Это наиболее важный источник железных руд на земном шаре. Главные месторождения этого вида сырья находятся в США (район оз. Верхнее, см. рис. 4.2), Канаде (п-ов Лабрадор), СССР (Украина) *, Бразилии, Западной Австралии (Хамерслей). Во всех этих регионах железорудные формации образуют стратиформные залежи мощностью до нескольких сотен метров. Они имеют значительное площадное распространение и выдерживаются по простиранию на 150 км и более.

* Наиболее хорошо изученными и промышленно важными месторождениями железистых кварцитов в СССР являются Кривой Рог и Курская магнитная аномалия (КМА).

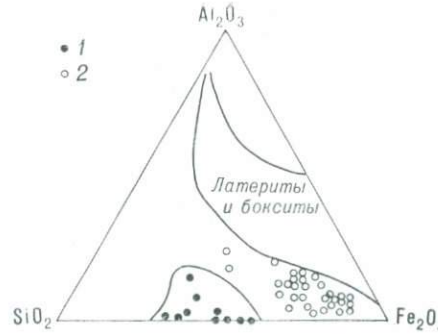


Рис. 4.8. Железные руды осадочного генезиса. Взаимосвязь химического состава руд и типов осадочных пород.

Докембрийские полосчатые железистые кварциты (*1*) — главные мировые ресурсы железа в настоящее время — содержат меньше глинозема по сравнению с фанерозойскими железняками (*2*). Латериты и бокситы, образовавшиеся в результате химического выветривания алюмосиликатов в условиях тропического климата, благодаря выщелачиванию кремнезема относительно обогащаются глиноземом и железом.

В соответствии с названием породы этих железорудных формаций имеют тонкополосчатую текстуру, обусловленную чередованием светло- и темноокрашенных прослоев, сложенных соответственно кремнистыми сланцами и железорудными минералами; ширина полос составляет обычно несколько сантиметров. Основными компонентами пород являются кремнезем и окислы железа: магнетит и (или) гематит; иногда важную роль играют железистые карбонаты (сидерит) и сульфиды (пирит) *.

Отложение железистых толщ проходило, по-видимому, в мелководных, тектонически стабильных бассейнах, куда не поступал (или почти не поступал) обломочный материал. По мнению некоторых исследователей, окисление железа на месте его отложения обусловлено в основном бактериальной деятельностью. Окислы железа составляют 40—60% большинства полосчатых железных руд; они разрабатываются, как правило, открытым способом, в огромных карьерах. Более высокие концентрации железа (около 65%) отмечаются на тех участках, где происходило последующее природное обогащение руд гематитом (см. рис. 4.1).

Фанерозойские железняки. Хотя эта разновидность железных руд распространена менее широко по сравнению с полосчатыми кварцитами, в свое время она сыграла немаловажную роль в истории человечества, так как эти руды были основным источником железа и разрабатывались в Европе и Северной Америке в период промышленной революции. Рассматриваемая группа включает минеттовые руды (оолитовые лимониты) из юрских отложений Эльзаса и Лотарингии в Восточной Франции, юрские железняки Нортхэмптоншира и других месторождений Великобритании (также юрского возраста), силурийские железные руды Клинтона в США.

Отдельные железорудные толщи этой группы редко прослеживаются более чем на 20 км, а по мощности обычно не превышают 15 м. Как правило, слагающие их породы имеют оолитовое строе-

* Главными рудными минералами железистых кварцитов являются магнетит (или мартит) и гематит; они сопровождаются хлоритом, серицитом, биотитом и др. Сидерит встречается очень редко, сульфиды отмечаются только в измененных породах, в железной руде они практически отсутствуют.

ние и переходят по площади и по разрезу в мелководные песчаники и известняки. На большинстве месторождений в качестве главного минерала присутствует силикат железа — шамозит; встречаются гематит, сидерит и другие минералы. В ощутимых концентрациях присутствует глинозем, в то время как отношение Si/Fe более низкое, чем в полосчатых железистых кварцитах (см. рис. 4.8).

4.4.5. МЕСТОРОЖДЕНИЯ НА ОКЕАНИЧЕСКОМ ДНЕ

На глубоководном океаническом дне, куда уже не поступает приносимый с суши обломочный материал, накапливаются кремнистые либо известковые оозы *, свидетельствующие о высокой органической продуктивности бассейна. На некоторых участках океанического дна при медленном осадконакоплении создаются условия для обменных реакций между морской водой и вулканитами, которые протекают наиболее эффективно в случае природного обогащения вод рудными компонентами в результате извержений подводных вулканов.

Рыхлые железо-марганцевые осадки перекрывают вулканические породы на некоторых срединно-океанических хребтах. Марганцевые конкреции образуют обширные подводные скопления; часто минералы марганца встречаются в виде корок, нарастающих на обломках пород. Марганцевые руды покрывают значительные участки океанического ложа в тропических широтах; это особенно характерно для Тихого океана к западу от Центральной Америки. Основными компонентами конкреций являются окислы и гидроокислы марганца; в некоторых регионах в конкрециях присутствуют никель, медь и другие металлы, суммарное содержание которых достигает нескольких процентов. Наличие всех этих металлов делает скопления конкреций потенциальными рудными залежами, заслуживающими разработки в обозримом будущем.

4.4.6. РОЛЬ ПРОЦЕССОВ ВЫВЕТРИВАНИЯ

Сульфиды и многие другие минералы легко разрушаются при выветривании в окислительной обстановке. Рудные компоненты, не переходящие достаточно легко в растворимое состояние на земной поверхности, остаются на месте своего образования, что приводит (после выноса растворимых веществ) к формированию остаточных месторождений. Происходит как бы природное обогащение бедных коренных руд в результате относительного накопления нерастворимых продуктов выветривания в поверхностных элювиально-делювиальных слоях.

К месторождениям такого типа относятся залежи силикатов никеля (например, на острове Новая Каледония), образовавшиеся в процессе выветривания ультраосновных пород, содержащих бо-

* Глубоководные илы — пелагические осадки, состоящие из глинистых минералов и остатков скелетов (карбонатных или кремнистых) морских организмов.

гатый никелем силикат — оливин. Концентрация никеля вследствие частичного удаления растворимых веществ возрастает от 0,3% в материнских коренных породах до 1,5—2,5%.

Интенсивное химическое выветривание проявляется наиболее эффективно в субтропических областях, где сезонные ливни обусловливают периодические колебания уровня грунтовых вод и хошую промываемость зоны просачивания. Происходящие вследствие этого изменения показателей Eh и главным образом pH способствуют разложению полевых шпатов и железомагнезиальных силикатов и выносу щелочных металлов. В итоге осуществляется остаточное накопление каолина, а также окислов и гидроокислов ряда элементов. После интенсивного выщелачивания растворимых компонентов остаются твердые и землистые корки, устойчивые к процессам выветривания. Латериты часто бывают обогащены окислами и гидроокислами железа (гематитом и лимонитом) и окрашены в ржаво-красные, бурые и желтые тона. Они широко распространены на древних эрозионных поверхностях в низких широтах; часто используются в качестве строительного материала, а иногда — как железная руда.

Бокситы, состоящие в основном из гидроокислов алюминия, относительно менее широко распространены и развиваются преимущественно на гранитах, полевошпатовых песчаниках и глинах — породах с низким содержанием железа. Третичные бокситы, сформировавшиеся в зоне выветривания, обнаружены на острове Ямайка и вблизи побережья Суринама. Разработка бокситов, главной руды на алюминий, требует больших энергетических затрат, и поэтому алюминиевые заводы стремятся обычно располагать вблизи ГЭС. Когда во время второй мировой войны спрос на алюминий превысил объем его традиционной добычи, производство этого металла в США возросло втрое за счет использования непромышленных в обычных условиях силикатных руд.

Некоторые металлы, освобождающиеся из сульфидов в процессе выветривания, выносятся грунтовыми водами вглубь, за пределы зоны окисления. Вследствие этого в зоне окисления накапливаются относительно обедненные рудными компонентами соединения, образующие железные шляпы (см. раздел 4.2). Изменение геохимической обстановки вблизи уровня грунтовых вод приводит к переотложению меди, цинка и других металлов из зоны окисления в зону вторичного обогащения, где концентрации этих элементов выше, чем в залегающих на большей глубине коренных (не измененных поверхностными процессами) рудных телах.

4.5. ВЗАИМОСВЯЗЬ МЕЖДУ ПРОЦЕССАМИ РУДООБРАЗОВАНИЯ, МЕТАМОРФИЗМА И ТЕКТОГЕНЕЗА

Многие метаморфические толщи содержат рудные залежи; метаморфизм по праву считают одним из важных рудообразующих процессов. Недавние исследования, однако, показали, что сравни-

тельно немногие месторождения образовались непосредственно под воздействием процессов метаморфизма. Наиболее известными месторождениями такого типа являются пирометасоматические залежи, сформировавшиеся в контакте с плутоническими интрузиями. Другие, более широко распространенные, месторождения образуются за счет ранее существовавших рудных тел, метаморфизованных совместно с вмещающими породами.

Хорошо известный пример таких месторождений — крупные стратиформные залежи массивных сульфидов Брокен-Хилл в Новом Южном Уэльсе. Вмещающие эти залежи породы представлены сильно разрушенными пироксеновыми гранулитами и амфиболитами, образовавшимися из вулканических и осадочных пород. Рудные тела, сложенные преимущественно крупнозернистыми сфалеритом и галенитом, образуют согласные линзовидные залежи, приуроченные к нескольким сжатым складкам; мощность рудных линз достигает 50—100 м в шарнирной части складок. Структурные и текстурные особенности руд свидетельствуют о неоднократных деформациях, которым подвергались рудные тела вместе с вмещающими породами; это означает, что рудная минерализация предшествовала процессам метаморфизма. В результате последующих изменений первоначальная природа рудных тел была настолько замаскирована, что уже нет возможности установить, какое происхождение имели эти руды — вулканическое или осадочное.

Рудные залежи, представленные сульфидами либо окислами металлов, изменяются под воздействием высоких температур и давлений: происходит перекристаллизация и (или) новообразование минералов; возникают более крупнозернистые структуры в результате увеличения размеров минеральных зерен; осуществляются также различные деформации рудных тел (складчатость, разрывные нарушения и т. д.). Эти процессы неизбежно приводят к изменению размеров и формы рудного тела, что надо учитывать при решении вопроса о выборе методики разведки и разработки того или иного месторождения.

4.6. ГИДРОТЕРМАЛЬНЫЕ ЖИЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ

Важная роль горячих водных растворов как минерализаторов подчеркивалась неоднократно. Гидротермальные флюиды могут выносить целый ряд металлов из магматических очагов, осадочных бассейнов или из ранее минерализованных толщ. Это, как правило, соленые растворы, температура которых колеблется в диапазоне 150—160°С. Жильные гидротермальные месторождения являются важными источниками золота (как непосредственными, так и играющими роль «поставщиков» благородного металла для золотоносных россыпей), а также свинца, цинка, серы, вольфрама и висмута.

Отложение минералов из гидротермальных растворов обычно происходит вследствие изменения температуры, давления, значений pH или Eh. При гидротермальном рудообразовании во всех случаях наблюдаются явления замещения боковых пород. Очевидно, что жильные месторождения наиболее часто образуются в верхних горизонтах земной коры, где имеются открытые трещины;

Рис. 4.9. Гидротермальная жила (фотоснимок П. Геррарда).

Крустификационная текстура образована в результате последовательного нарастания кристаллов на стенках открытой трещины; от стенок трещины к ее центральной части из раствора отлагаются следующие главные руды и жильные минералы: шеелит, карбонаты, сфалерит, кальцит (рудник Кэррок, Камберленд, Англия).

рудные жилы бывают приурочены также к зонам тектонических нарушений.

Структурные и текстурные особенности гидротермальных жил обычно отражают процесс выполнения трещин или пустот путем последовательного нарастания кристаллов от их стенок (рис. 4.9); в результате образуется полосчатая (так называемая крустификационная) текстура. Гребенчатое строение жил обусловлено направленным перпендикулярно к стенкам трещин ростом кристаллов кварца, кальцита и других минералов призматического габитуса. Они часто бывают представлены хорошо образованными кристаллами, нарастающими по направлению к не заполненной минеральным веществом центральной части трещины или другой полости. Прохождение гидротермальных растворов по трещинам и связанные с этим изменения боковых пород приводят к замещению слагающих их образований плотными мелкокристаллическими агрегатами хлорита, цоизита, серицита, кальцита, а также глинистыми минералами. Характер оруденения, тот или иной комплекс жильных минералов зависят от генетической природы рудоносных растворов и от температуры рудообразования.

Примеры региональной зональности, при которой распределение как рудных, так и жильных минералов определяется в первую очередь температурой рудообразования, можно видеть на месторождениях, приуроченных к структурам, окаймляющим герцинский батолит в Юго-Западной Англии (см. рис. 4.4), а также на месторождении медно-порфировых руд района Бингема на Западе США (см. рис. 4.5). Северо-Пеннинское рудное поле в Северной Англии (рис. 4.10), в пределах которого жилы, залегающие в породах каменноугольного

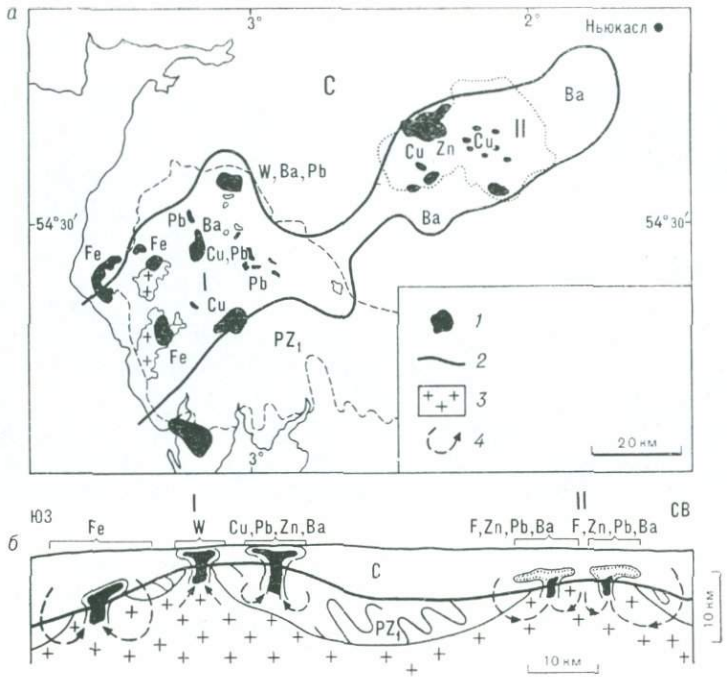


Рис. 4.10. Гидротермальные месторождения Северной Англии (по данным Дж. Мура [1982 г.]).

а — распределение рудных жил в пределах докарбонового гранитного фундамента (рудные поля: *I* — Лейк-Дистрикт, *II* — Северо-Пеннинское); *б* — гипотетический разрез, дающий представление об условиях рудообразования (камберлендские железные руды в основном сложены гематитом).
1 — участки концентрации рудных жил; *2* — приблизительный глубинный контур каледонского батолита (девон); *3* — каледонские граниты; *4* — пути циркуляции гидротермальных растворов и тепловые потоки в гранитном фундаменте, возникающие за счет радиоактивных элементов.

возраста, сформировались в конце палеозоя, представляет собой своеобразную концентрическую структуру. Центр этой структуры расположен над погребенным докарбоновым гранитным массивом, богатым радиоактивными элементами. По-видимому, эти элементы оказывали воздействие на формирование руд как источник теплового потока, контролировавшего конвекционную систему циркуляции гидротермальных растворов.

5. НЕМЕТАЛЛИЧЕСКОЕ СЫРЬЕ

5.1. ВВЕДЕНИЕ

Минералы, горные породы и искусственные вещества, рассматриваемые в этой главе, чрезвычайно разнообразны как по составу, так и по областям их применения. Эта группа вмещает самые раз-

ные природные соединения — от таких широко распространенных пород, как глины, добываемые в огромном количестве, до редких драгоценных камней, например алмазов, места разработок которых на земном шаре можно сосчитать по пальцам.

В первую очередь мы постараемся познакомить вас с естественными материалами, используемыми для строительства различных сооружений, поскольку они представляют собой наиболее важные ресурсы нерудного сырья, хотя бы благодаря их огромным запасам. Вслед за этим попытаемся дать представление о сырье, применяемом в гончарном производстве, так как оно включает многие вещества, являющиеся одновременно и стройматериалами. Вместе рассматриваются органические химикалии и производные нефтехимического синтеза, несмотря на все разнообразие их конечных продуктов. Минералы соляных отложений — эвапориты — описаны в специальном разделе. Конец главы посвящен драгоценным и поделочным камням и некоторым декоративным материалам, причем дана их самая общая, не претендующая на полноту характеристика.

Вначале следует отчетливо представить себе, в каком огромном объеме извлекаются из земных недр наиболее важные нерудные ископаемые. При строительстве крупного индустриального комплекса только на производство бетона необходимо около 2000 т агрегата *, а на прокладку 1 км новой дороги его уходит по меньшей мере 10 000 т. В начале 70-х годов в Великобритании ежегодно добывалось 100 млн. т песка, что сопоставимо с годовой добычей угля. Сыпучие стройматериалы извлекают из недр обычно открытым способом — в карьерах и каменоломнях, причем из-за высокой стоимости транспортировки этого сырья стараются выбирать места разработок как можно ближе к строительным площадкам (рис. 5.1). Непрерывно возрастающая потребность в стройматериалах наряду с необходимостью охраны окружающей среды заставляют возвращаться к повторной эксплуатации старых карьеров, разрезов и других открытых выработок, а также стимулируют развитие добычи сыпучих стройматериалов в зонах пляжей, эстуариев и на других участках прибрежного мелководья.

5.2. СТРОИТЕЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ

5.2.1. СТРОИТЕЛЬНЫЙ КАМЕНЬ И ШИФЕРНЫЙ СЛАНЕЦ

Штучный (блочный) камень в течение веков служил материалом, играющим главную роль в строительстве различных зданий, мостов, портовых сооружений и других объектов. В настоящее время камень в значительной мере заменяется бетоном и сталью. Обычный строительный камень изготавливается в основном из гра-

* *Любой* твердый стройматериал (песок, гравий, шлак и др.), используемый при смешивании с цементом и асфальтом; применяется для производства бетона, штукатурки, как балласт при строительстве дорог, в качестве флюса и т. д.

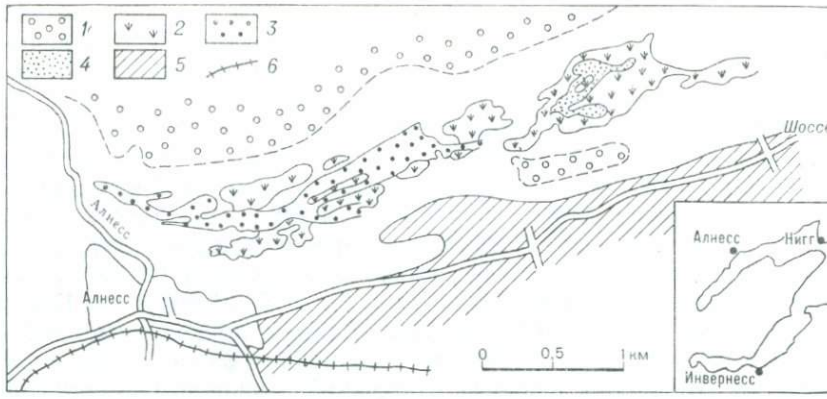


Рис. 5.1. Песок и гравий. Район Алнесс в Северо-Восточной Шотландии, где в 1970-х годах предполагалось широкое промышленное строительство (в частности, возведение завода нефтяного оборудования в городе Нигг).

На схематической карте показано распространение пригодных для разработки ледниковых песков и гравийно-галечных отложений, образующих в рельефе вытянутые гряды. Эти гряды сформировались под действием водных потоков, протекавших вдоль ледникового покрова либо под ним. Близость объектов разработки к дорожным магистралям и рекам облегчает транспортировку стройматериалов и делает возможной промывку песка и гравия на месте их добычи.

1 — тилли, валунные глины; *2* — торфяники; *3* — плохо сортированный галечно-гравийный материал в алевритовой основной массе; *4* — песчано-гравийные отложения, перекрывающие слои гальки и гравия; *5* — ледниковые пески, гравийники и алевриты, частично переработанные постледниковыми морскими процессами (небольшие тела неправильной формы, сложенные песком и гравием); *6* — железная дорога.

нитов, массивных песчаников и известняков, которые добывают в виде прямоугольных блоков, не имеющих внутренних трещин.

Стройматериалы, несущие достаточно большую нагрузку, должны обладать высокой прочностью на сжатие и на сдвиг. Для облицовки фасадов и внутренних стен зданий, а также для мощения дорог широко используются различные горные породы: изверженные (преимущественно порфиры), мраморы, известняки с окаменелостями, туфы (например, барроудельские вулканиты Камберленда), травертины и т. д. Традиционный кровельный материал — это шиферный сланец (или естественный шифер), раскалывающийся по плоскостям сланцеватости на тонкие ровные плитки. Основной источник добычи шиферного сланца в Великобритании — толщи кембрийских сланцев Северного Уэльса.

Наиболее прочный строительный камень получается из гранитов и других магматических пород, обладающих массивной текстурой, низкой пористостью и сложенных устойчивыми к разрушению минералами (рис. 5.2). Песчаники, особенно с известковым цементом, легко разрушаются под действием проникающей в них воды; известняки в еще большей степени растворяются и чаще вступают в химические реакции, приводящие к их разложению. Невзирая на перечисленные недостатки, именно известняки использовались на строительстве в Южной Англии. Здесь среднеюрские известняки кремового цвета украшают большинство самых живописных зданий Бата, Оксфорда и Котсуолда,

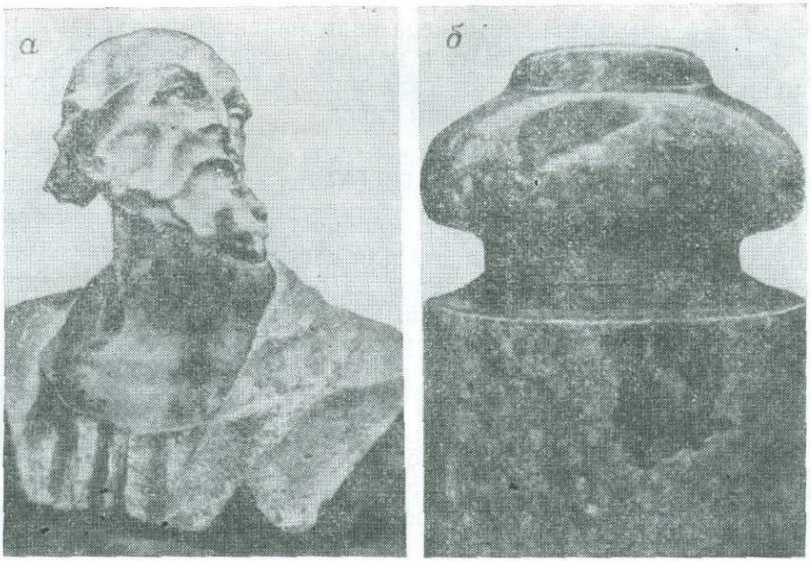


Рис. 5.2. Разная устойчивость горных пород к выветриванию (фотоснимки М. Грея).

Результаты выветривания в городских условиях показаны на двух предметах из кафедрального собора св. Павла в Лондоне.
а — бюст св. Андрея, ранее находившийся на пьедестале у западного фасада собора; известняк (портландский камень), из которого изваяна скульптура, сильно поврежден эрозией; *б* — гранитная тумба, стоящая вблизи того же западного фасада; как видно на фотоснимке, граниты Шепа почти не пострадали от выветривания.

Портландский камень (известняк позднеюрского возраста), из которого сложены многие исторические сооружения Лондона, радует наш глаз, когда мы любуемся собором св. Павла и другими церквями, воздвигнутыми по проектам Кристофера Рена *.

Сохранение каменной кладки — фундамента, на котором покоится целый ряд зданий и памятников, представляющих исторический интерес, связано с большими трудностями. Для преодоления их надо учитывать как характерные свойства самого природного материала, так и климатические особенности района строительства. Главной причиной повреждения сфинксов и других исторических памятников Древнего Египта является ветровая эрозия. В Северо-Западной Европе процесс разрушения строительного камня определяется главным образом действием воды, просачивающейся в поровые пространства и в мелкие трещинки пород.

Физическое выветривание, обусловленное влиянием процессов промерзания и оттаивания, усугубляется химическими реакциями, протекающими при поступлении в воды таких растворимых компонентов, как углекислый газ, сероводород, сернистый газ. В тех

* Рен Кристофер (1632—1723) — английский архитектор и ученый, крупнейший представитель английского классицизма. Построенные им жилые дома и церкви отличаются разнообразием конструктивных и пространственных решений.

районах, где атмосфера загрязнена промышленными отходами, кислая дождевая вода разрушает в первую очередь карбонаты. При наличии в растворе сернистого газа образуются сульфаты, что приводит к серьезным повреждениям гипса.

5.2.2. АГРЕГАТ

Агрегат, который составляет основную массу бетона, а также используется в качестве балласта для дорог, плотин и портовых сооружений, может быть изготовлен из различных, как природных, так и искусственных, материалов. Его основные компоненты — песок и гравий — получают преимущественно из рыхлых ледниковых, речных или морских отложений при помощи механических черпаков и драг. Хотя песок и гравий являются широко распространенными стройматериалами, многие их залежи либо слишком малы по размерам, либо настолько неоднородны по составу, что разработка оказалась бы слишком дорогостоящей. Для оценки ресурсов этих материалов необходимо проводить детальное геологическое картирование ледниковых, аллювиальных и береговых (пляжевых) отложений, часто объединяемых под названием «наносы».

Агрегат, полученный из магматических, метаморфических и плотных осадочных пород, обычно подвергается дроблению и сортировке на месте их разработки. В тропических областях основным источником приготовления агрегата служат латериты. Кроме того, для получения этого стройматериала используются отвалы пустых пород, шлак плавильных печей и целый ряд других промышленных отходов (при условии их относительной химической инертности).

При выборе строительных материалов для сооружаемого объекта приходится учитывать следующие факторы.

1. Стоимость стройматериала, зависящую в основном от требуемого количества, доступности исходной породы и простоты ее разработки.

2. Физические особенности материала, в первую очередь соотношение в нем грубо- и тонкозернистых компонентов. Слишком большое содержание глинистой фракции уменьшает прочность связи агрегата с цементом или битумом. Существенную роль играют форма и характер поверхностей крупных обломков. Избыток чешуйчатых или вытянутых обломков ослабляет структуру материала, а обломки со слишком гладкими поверхностями не скрепляются достаточно прочно, вследствие чего материал становится как бы полированным (если он входит в состав дорожного покрытия, это может вызвать пробуксовку или скольжение колес автотранспорта).

3. Присутствие либо отсутствие активных примесей; например, некоторые глинистые минералы имеют тенденцию разбухать при увлажнении; сульфиды способны окисляться с выделением сероводорода; халцедон и опал в присутствии щелочей переходят в гелеобразное состояние.

5.2.3. ЦЕМЕНТ

Цемент в сухом состоянии представляет собой порошкообразное вещество беловато-серого цвета. В результате взаимодействия с водой цемент дает пластичную массу, которая, быстро затвердевая («схватываясь»), превращается в камневидное тело. Как важный компонент строительного раствора, цемент применяется в смеси с

песком для скрепления кирпичной или каменной кладки. Будучи смешанным с большим количеством агрегата, он используется для производства бетона. Основой цемента является карбонат кальция, из которого часть углекислого газа удалена нагреванием. Низкосортный цемент можно получить путем обжига и измельчения известняков, в том числе глинистых. Портландцемент (это открытие XIX века) получают в результате нагрева смеси известняка и глины до температуры, достаточной для образования силикатов кальция. Возникший при этом цементный («каменный») клинкер размельчают до порошкообразного состояния (разумеется, он должен храниться в сухом виде).

Главными источниками сырья для изготовления цемента в Великобритании служат карбонатные отложения сенона (верхний мел), мезозойские и кайнозойские глины Юго-Восточной Англии, а также известняки карбона и одновозрастные им глинистые сланцы в других районах страны. Основными компонентами цемента являются известь, кремнезем и глинозем; процентные отношения этих компонентов могут варьировать только в определенных пределах. В целом ряде случаев разрушение строительных объектов было обусловлено использованием непрочного бетона, в состав которого входил цемент со слишком высоким содержанием глинозема. К примесям, улучшающим качество цемента, можно отнести вещества, имеющие в своем составе магний, например доломиты. При высокой температуре они переходят в периклаз (MgO), который затем может гидратироваться до брусита ($Mg \cdot H_2O$) с увеличением объема. Сульфиды и сульфаты превращаются в щелочные разности, что также вызывает изменение объема цементной массы. Железо, марганец, фосфор и фтор могут вступать в реакции, в результате которых ухудшается качество конечных продуктов.

5.2.4. КИРПИЧ И ЧЕРЕПИЦА

Кирпичи изготовляют из обожженной глины уже более трех тысячелетий. Ежегодное производство кирпича в Великобритании достигло нескольких миллиардов штук. Глина, идущая на изготовление кирпича, должна отвечать определенным кондициям. Воды должно быть сравнительно немного (17,5—19%), что уменьшает опасность усадки кирпича во время сушки. Незначительное количество углекислого кальция и алеврита * повышает прочность и снижает усыхание кирпичной глины, а присутствие железа окрашивает кирпич в приятные тона. Содержащие в глине органические вещества, сгорая при обжиге, снижают потребность в топливе, а следовательно, и затраты на него.

Кондиционные глины встречаются в Великобритании среди глинистых отложений оксфордского яруса (верхняя юра); это сырье

* Алеврит (силит) — обломки пород или минеральные зерна, меньшие по размеру, чем зерна очень мелкого песка, но более крупные, чем грубые глинистые частицы (приблизительно 0,01—0,1 мм).

перерабатывают многие кирпичные заводы. Для производства кирпича используют и другие глины как мезозойского, так и третичного возраста. Вообще говоря, кирпичи тех или иных сортов можно изготовлять из самых различных материалов. Например, в субтропических районах из латеритов (кстати, later по-латыни означает «кирпич») получают прочные и долговечные стройматериалы в виде стандартных блоков. Именно такие блоки применялись при строительстве многих храмов и дворцов в Кампучии и Таиланде.

5.2.5. СТЕКЛО

Стекло (как природное, так и искусственное) представляет собой переохлажденную жидкость (расплав), чрезвычайно высокая вязкость которой препятствует ионам расположиться в определенном порядке и образовать кристаллическую структуру *. Стекло является прозрачным или полупрозрачным изотропным веществом, разбивающимся при ударе на осколки с раковистым изломом. Основные свойства, которыми должно обладать обычное силикатное стекло, — это прозрачность, гомогенность и бесцветность. Его получают плавкой кварца (SiO_2) в присутствии таких добавок, как карбонаты кальция или натрия либо сульфат натрия.

Наличие некоторых примесей придает стеклу тот или иной цвет (например, зеленая окраска «бутылочного» стекла определяется в основном присутствием железа). Вместе с тем примеси приводят к снижению гомогенности стекла. Поэтому для изготовления стекла применяются пески из дифференцированных и хорошо сортированных осадков, преимущественно шельфовых фаций. Главными источниками стекольного сырья служат кварцевые пески, песчаники с кремнистым цементом, а также метаморфические породы — кварциты.

5.2.6. СТРОИТЕЛЬНЫЙ ГИПС, ШТУКАТУРНЫЕ И ИЗОЛЯЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ

Строительный гипс (алебастр) и штукатурка используются в основном при отделочных работах для обеспечения гладкой поверхности стен и потолков. Исходным сырьем для получения этих материалов служит природный гипс — водный сульфат кальция $CaSO_4 \cdot 2H_2O$. Если этот минерал нагреть до 110—120°С, он теряет часть кристаллизационной воды. При этом образуется белый порошок — строительный, или штукатурный, гипс («парижский алебастр»), затвердевающий при взаимодействии с водой **. В на-

---

* По агрегатному состоянию стекло занимает промежуточное положение между телами жидкими и кристаллическими; характерна обратимость перехода из жидкого в стеклообразное состояние.

** Исходным сырьем для так называемых воздушных вяжущих материалов служит минерал ангидрит — сульфат кальция ($CaSO_4$). Получаемые из него продукты — ангидритовый и отделочный цемент, эстрихгипс — хорошо известны.

стоящее время чаще пользуются готовыми штукатурными плитами, нежели гипсовым порошком; эти плиты пропитываются алебастром, смешанным с каолином.

Природными веществами, из которых в течение многих лет получали изоляционные и огнеупорные (жаростойкие) материалы, были минералы, объединяемые под общим названием «асбест». Они образуют игольчатые нитевидные агрегаты (волокна), которые можно использовать для изготовления асбестовой ткани, войлока или плит. Главные минералы, служащие основой для изготовления технического асбеста, — это хризотил-асбест (тонковолокнистая разновидность серпентина, происхождение которого связано со слабым метаморфизмом вмещающих пород), тремолит-асбест (из группы амфиболов, также приуроченный к слабометаморфизованным породам) и натровый крокидолит, образующий жилы в полосчатых железистых кварцитах (см. раздел 4.4.4) *. То обстоятельство, что асбестовые волокна легко проникают в легочную ткань человека, предопределяет резкое ограничение, а в будущем и полное прекращение использования этих материалов.

Другие природные изоляционные вещества — это диатомит (озерные осадки, сложенные кремнистыми остатками растительных микроорганизмов), вермикулит (хлоритоподобный минерал, образующийся в слабоизмененных ультраосновных породах) и мелкочешуйчатая слюда.

5.2.7. БИТУМ И АСФАЛЬТ

Ряд разновидностей темных вязких, содержащих углеводороды природных продуктов встречается в виде жил, бесформенных скоплений (часто заполняющих различные впадины) и даже битумных «озер». Они образуются из нефтей, потерявших в поверхностных условиях вследствие испарения свои наиболее легкие фракции. Асфальт такого происхождения (например, тринидадский) в течение многих лет использовался в качестве водонепроницаемого материала, а также для скрепления щебня при асфальтировании или гудронировании дорожных покрытий (в том числе для покрытия типа «макадам»). Для той же цели можно применять и различные темные смолистые вещества, образующиеся в процессе перегонки нефти.

5.3. КЕРАМИЧЕСКОЕ СЫРЬЕ, ОГНЕУПОРНЫЕ МАТЕРИАЛЫ И НАПОЛНИТЕЛИ

Горшки, кружки и другая домашняя утварь издавна изготавливались из пластичной (горшечной) глины, отформованной, а

---

* Хризотил-асбест образуется преимущественно в гидротермально-измененных, богатых магнезией ультраосновных породах. Тремолит-асбест (актинолит-асбест, амиант) встречается в кристаллических сланцах и основных изверженных породах, подвергшихся гидротермальному метаморфизму.

затем просущенной под солнечными лучами либо путем нагревания в специальной обжиговой печи.

Действительно, на всех доисторических стоянках чаще всего обнаруживают обломки глиняной посуды; именно по ним удается наиболее точно установить возраст стоянки и определить, к какой культуре она относится. Для простых гончарных изделий может быть использована практически любая глина, и поэтому при изготовлении кухонной посуды, дренажных труб, черепицы, цветочных горшков и других бытовых предметов обычно идут в ход местные ресурсы. Глина, применяемая в гончарном деле, может иметь различную окраску — от белой до красновато-бурой. Глиняная посуда, как правило, сохраняет пористость после обжига, но эту посуду обычно покрывают глазурью. Терракота (керамические неглазурованные изделия), фаянс и дельфт (не покрытый глазурью фаянс) — хорошо известные продукты гончарного искусства.

Фарфоровые изделия, в том числе тонкую керамику высшего качества (включая как наиболее изысканные сервизы, так и обычные электрические изоляторы и лабораторную посуду) делают из глины с высоким содержанием каолинита $Al_4Si_4O_{10}(OH)_8$. При изготовлении керамики и фарфора увлажненная глина перемешивается с природными или искусственными флюсами, такими как размолотые в порошок кремень, кварц и полевой шпат. После формования и сушки керамическая масса подвергается обжигу при температуре приблизительно 1200°С, в процессе которого образуется стекловидный расплав. Так называемый английский твердый фарфор содержит фосфат кальция, получаемый путем прокаливания костей животных. Цвет, отделка и блеск фарфора зависят от вида глазури, добавляемой при обжиге.

Чистейший, высокосортный каолинит, идущий на изготовление фарфора, имеет гидротермальное и пневматолитовое происхождение; он образуется в основном при разрушении содержащих полевые шпаты изверженных пород, преимущественно гранитов. В Великобритании каолинитовые глины высшего качества встречаются в герцинских гранитах (Юго-Западная Англия, см. рис. 4.4). Внедрение в них термальных химически активных растворов привело к каолинизации полевых шпатов и разрушению гранитов с образованием рыхлого материала, содержащего обломки кварца. Для извлечения (вымывания) каолина используется сильная струя воды; затем каолин отделяется от кварцевых обломков в отстойниках.

В настоящее время Сент-Остелл (Корнуолл) является основным центром производства фарфора в Англии. Менее чистые камовые глины, образовавшиеся в результате выветривания и переотложения каолинитовых глин, обнаружены среди озерных отложений раннетретичного возраста в Бови-Трейси и Петрокстоу (Девоншир).

Наполнители, используемые для увеличения объема бумажной массы, каучука и продуктов нефтехимического синтеза, получают из инертных глинистых минералов и барита ($BaSO_4$), который применяется также в качестве утяжелителя глинистых растворов при бурении нефтяных скважин.

Минеральные вещества, форма и химические свойства которых существенно не изменяются при высокотемпературном нагреве, служат огнеупорными материалами для футеровки сушильных и обжиговых печей, как лабораторных, так и заводских. Эти материалы находят также различное применение в электронной и хи-

Таблица 5.1. **Огнеупорные материалы и техническая керамика**

Вид сырья	Источник сырья	Конечный продукт и применение
Огнеупорные глины	Глины, подстилающие угленосные пласты каменноугольных отложений (Великобритания)	Огнеупорный кирпич для бытовых и производственных печей
Кварцевые песчаники, кварциты	Верхнекаменноугольные отложения (Великобритания)	Силикатный кирпич для обжиговых и плавильных печей
Доломиты	Магнезиальные известняки каменноугольных и пермских известняковых формаций (Великобритания)	Огнеупорный кирпич для железо- и сталеплавильных печей
Магнезит ($MgCO_3$)	Ультраосновные породы, подвергшиеся слабому метаморфизму (Греция, Югославия); метасоматические залежи в известняках (Уральские горы, СССР)	То же
Серпентиниты, оливиновые породы	Ультраосновные изверженные породы	„
Муллит ($3Al_2O_3 \cdot 2SiO_2$)	Алюмосиликаты (силлиманит, кианит, андалузит) из метаморфизованных глинистых пород	Свечи зажигания, другое электрооборудование
Глинозем (Al_2O_3)	Бокситы и сходные с ними породы, обработанные каустической содой	Техническая керамика
Тальк, стеатит	Метаморфизованные магнезиальные известняки	Изоляторы для радиотехники
Окислы бериллия, циркония, тория, магния	Берилл, циркон, монацит и другие минералы из пегматитов и россыпей	Техническая керамика

мической промышленности. Огнеупоры и техническую керамику получают как из природных минералов, так и посредством химического синтеза (табл. 5.1).

5.4. ОРГАНИЧЕСКИЕ ХИМИКАЛИИ И ПРОДУКТЫ НЕФТЕХИМИЧЕСКОГО СИНТЕЗА

Лет 50 назад, не говоря уже о более далеких временах, почти все горючие полезные ископаемые — нефть, газ и уголь, извлекаемые из земных недр, — использовались фактически только как топливо. Теперь значительная часть мировой добычи углеводородов служит исходным сырьем для нефтехимического производства (табл. 5.2). Химическая индустрия выпускает относительно недорогие заменители природных органических и неорганических материалов.

Исходными органическими соединениями, из которых получают многие синтетические материалы, являются низшие ненасыщенные олефины (этилен и неко-

Таблица 5.2. **Производные нефти и угля** (за исключением топлива)

Вид	Конечные вещества
Продукты перегонки	Смазочные масла. Дорожные битумы. Парафин. Моющие средства
Продукты глубокого разложения	Аммиак и соли аммония — исходное сырье для синтеза азотных удобрений. Углерод — сырье для добавок, повышающих прочность синтетического каучука, а также для углеродных волокон
Полимеры	Пластмассы (полиэтилен, полистирол, поливинилхлорид). Силиконовые смазки. Синтетические волокна (нейлон, терилен, акрил). Красители и краски. Фармацевтические препараты. Инсектициды. Реактивное топливо. Взрывчатые вещества

торые другие). Такие олефины получают главным образом из парафиновых углеводородов (алканов), содержащихся в нефти, с помощью высокотемпературного крекинга. Этот процесс приводит к разрыву длинных углеводородных цепей и к удалению избыточного водорода. Получаемые таким путем разнообразные продукты служат «строительными блоками» для синтеза высших полимеров, в которых взаимосвязаны тысячи и десятки тысяч атомов. Благодаря процессам полимеризации создают аналоги молекул древесины, хлопка, шелка и многих других природных веществ.

5.5. ПРОИЗВОДНЫЕ ЭВАПОРИТОВ

Эвапориты — хемогенные осадки аридных (засушливых) зон — являются исходными веществами для получения целого ряда химикалий и удобрений, применяются они и во многих других производствах (табл. 5.3).

Морские эвапориты, выпадающие в осадок из вод с высокой концентрацией соли, аккумулируются на дне заливов и лагун, частично отшнурованных от открытого моря, а также в окаймляющих морские бассейны зонах «себха», где рыхлые донные осадки, пропитанные рассолами, все больше обогащаются солями по мере испарения воды. Донные осадки состоят преимущественно из сульфатов кальция (гипса или ангидрита) и каменной соли; в них присутствуют небольшие, но ощутимые примеси солей натрия и магния («горьких солей»), а также брома и иода.

Эвапориты неморского происхождения, отлагающиеся в соляных озерах, формируются в области внутреннего стока с преобладающими процессами испарения. В этих случаях состав минералов эвапоритов определяется составом пород, развитых на территории водосборного бассейна. Области развития древних эвапоритов не совпадают с современными, что объясняется дрейфом материков.

Таблица 5.3. **Эвапоритовые минералы и области их применения**

Минералы	*Условия образования*, распространение	Использование
Сульфаты		
Гипс ($CaSO_4 \cdot 2H_2O$), ангидрит ($CaSO_4$)	Минерал раннего осаждения, обусловленного низкой растворимостью, может встречаться без других эвапоритов	Строительный гипс (алебастр), штукатурные материалы, серная кислота, инсектициды, удобрения
Эпсомит ($MgSO_4 \cdot 7H_2O$)	Связан с поздними стадиями образования эвапоритов морского генезиса	Лекарственные средства
Мирабилит ($Na_2SO_4 \cdot 10H_2O$)	Содовые озера	Бумага, текстиль, красители, взрывчатые вещества, удобрения
Самородная сера (S)	Образуется в соляных куполах *из гипса и ангидрита* в результате бактериальной деятельности	Серная кислота, удобрения
Галоиды		
Галит, каменная соль (NaCl)	Осаждается раньше калийных солей и позднее гипса	Консервирующие средства, каустическая сода, краски, мыло, инсектициды, лекарственные препараты
Сильвин (KCl)	Поздний минерал замещения в отложениях калийных солей	Сильвинит (сильвин с галитом) — калийное удобрение
Карналлит ($KCl \cdot MgCl_2 \cdot 6H_2O$)	Минерал морских эвапоритов поздней стадии образования (стадия горьких солей)	Удобрения
Иодаты кальция, калия, хрома	Побочный продукт чилийских селитр	Антисептические средства, иодиды, фотохимикалии
Карбонаты		
Натрит ($Na_2CO_3 \cdot 10H_2O$)	В растворах содовых озер	Мыло, каустическая сода, стекло
Бораты		
Бура ($Na_2B_2O_7 \cdot 10H_2O$)	В эвапоритах неморского происхождения; поступление бора может быть связано с гидротермами	Глазури, эмали, стекло, бумага, обработка кож
Нитраты		
Селитра (KNO_3), натриевая селитра ($NaNO_3$), комплексные соли калия, натрия, магния	В неморских эвапоритах, главным образом чилийских	Удобрения, взрывчатые вещества, азотная кислота

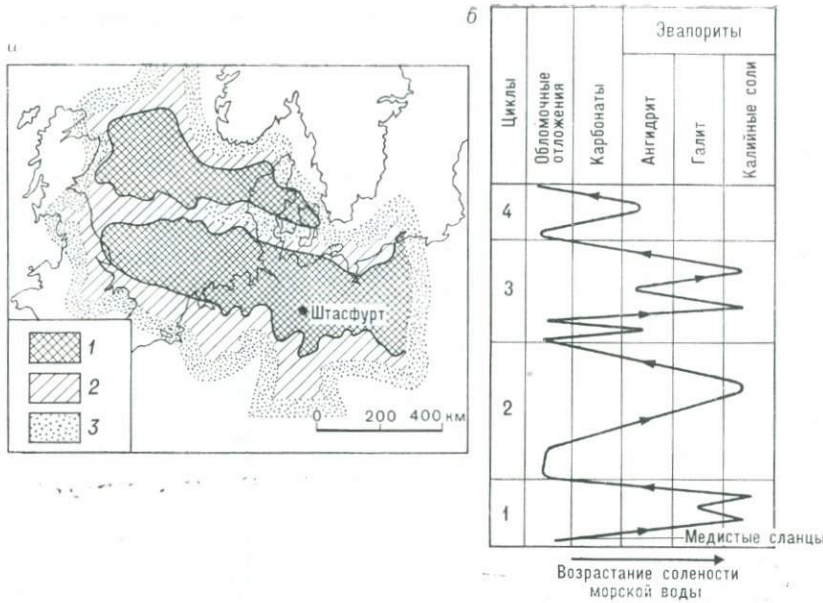


Рис. 5.3. Распространение пермских залежей поташа (карбоната калия) в Северной Европе (*а*) и типовой литологический разрез в районе Штасфурта (*б*).

В пермском море (цехштейн), характеризующемся высокой концентрацией солей, эвапориты отлагались в двух бассейнах, охватывающих современное Северное море и прилегающие районы суши. В эвапоритах Южного бассейна, мощность которых достигает 100 м и более, зафиксировано до четырех циклов осадконакопления.
1 — эвапориты, представленные преимущественно галитом; *2* — карбонаты (местами отмечаются эвапориты); *3* — суша.

Главные промышленные месторождения эвапоритов в Европе приурочены к пермо-триасовым отложениям (особенно к областям развития цехштейна), а также к среднетретичным осадкам.

В обычной морской воде (см. табл. 2.1) содержится 3,5% растворенных веществ, большинство которых поступило туда в результате сноса разрушенного материала обнажившихся на земной поверхности выветрелых пород. Отложение даже наименее растворимых минералов начинается только после того, как объем водной массы уменьшится приблизительно вдвое; наиболее же растворимые горькие соли натрия и магния осаждаются только на заключительном этапе процесса испарения. Поэтому в морских эвапоритах наблюдается характерная последовательность отложений от гипса и ангидрита до мощных соляных пластов и в конечном итоге до горьких солей, представляющих значительную ценность, но довольно редко сохраняющихся в разрезе. Нарушения хода процессов испарения и концентрации солей в результате притоков нормальной морской воды могут привести к последовательной смене циклов осадконакопления (рис. 5.3).

Другие источники калийных солей, имеющие большое значение, приурочены к пермским эвапоритам Нью-Мексико, к нижнетретичным осадочным породам Рейнского грабена, а также к бассейну Эбро в Испании. Каменная соль (галит) — минерал, присутствие которого в пище необходимо для здоровья человека и животных, — с доисторических времен являлась объектом торговых операций. Она значительно более широко распространена по сравнению с ка-

лийными солями; крупные месторождения галита приурочены к триасовым отложениям Европы.

Неморские эвапориты более разнообразны по составу, причем преобладание тех или иных разновидностей этих солей и их сравнительная ценность определяются химическим составом пород, представленных в пределах водосборных бассейнов, и составом веществ, выделяемых при вулканических эксгаляциях и некоторых других процессах. Содовые озера с присутствием карбоната натрия встречаются в засушливой части Восточно-Африканской рифтовой зоны, где широко развит щелочной и мафический вулканизм. В соляных озерах Юты и других среднезападных штатов США содержатся бура * и сходные с ней минералы. Уникальные соляные месторождения в пустыне Атакама (Чили) служат основным источником добычи нитратов калия и натрия (селитры), а также иодидов наряду с боратами, сульфатами и каменной солью.

Формирование соляных залежей, распространенных к западу от Анд на протяжении более 700 км, по-видимому, связано с чрезвычайно засушливым климатом, сохранившимся со среднетретичного времени, а также с малочисленностью в таких климатических условиях растений и бактерий, потребляющих нитраты. Присутствие некоторых минералов обусловлено процессами андского вулканизма. Источником солей, в том числе нитратов, согласно современным гипотезам может быть прибойная зона, обогащенная органическими веществами, из которых образуется аммиак, отлагающийся в виде сухого осадка.

5.6. ФОСФОРИТЫ

Фосфор — элемент, совершенно необходимый для жизненных процессов. Что же касается фосфатных удобрений, то они играют основную роль в повышении плодородия почв. Более 80% таких удобрений получают из осадочных фосфоритов. Главные страны — экспортеры фосфатных удобрений Марокко, Тунис, США, СССР и Того. В некоторых фосфоритах присутствуют повышенные концентрации таких элементов, как уран, редкие земли, ванадий, фтор и даже золото; их извлекают попутно.

Фосфориты образуются на дне морей и океанов биохимическим путем, встречаясь обычно в ассоциации с органическими веществами. Они представлены конкрециями и желваками, а также сплошными землистыми массами светло-серого цвета, главным минералом которых является апатит, имеющий самое высокое содержание фосфатов (солей ортофосфорной кислоты). Фосфориты (особенно среднетретичного возраста) залегают in situ на современном океаническом ложе у побережий Калифорнии, Северо-Западной и Южной Африки, Австралии, Новой Зеландии и западной части Южной

---

* Минерал белого, синего, зеленого или серого цвета ($Na_2B_4O_7 \cdot 10H_2O$); является рудой на бор.

Америки. По всей вероятности, они приурочены к участкам апвеллинга — зонам восходящих глубинных вод, обогащенных полезными компонентами.

Более древние залежи фосфоритов, например позднемеловые — раннетретичные фосфориты Марокко, формировались, по-видимому, в мелководных заливах, где фосфорсодержащие органические остатки были переработаны в условиях слабого доступа кислорода. Очень широко распространены фосфориты позднедокембрийского — кембрийского возраста, многие залежи которых были обнаружены лишь в недавнее время. Этот факт может служить доказательством того, что присутствие скелетов высокоразвитых животных не является обязательным условием для образования фосфоритов. Фосфориты этого возраста известны в пределах Вьетнама, Китая, СССР, Индии, Бразилии, а также в северных районах Центральной Африки и в Австралии.

5.7. ДРАГОЦЕННЫЕ, ПОДЕЛОЧНЫЕ И ДЕКОРАТИВНЫЕ КАМНИ

Минералы и горные породы, имеющие как практическую так и эстетическую ценность, включают целый ряд природных соединений — от драгоценных камней, украшающих королевские регалии, до различных охр и умбр *, которые в прежние времена служили основным сырьем для изготовления минеральных красок. Драгоценные камни радуют глаз богатством красок, прозрачностью и сверканием граней. Алмаз, рубин и сапфир отличаются плотной упаковкой атомов в кристаллических решетках, неясно выраженной спайностью, высокими показателями преломления и так называемым алмазным блеском (табл. 5.4). Все эти качества выявляются традиционной техникой огранки, усиливающей внутреннее отражение света (рис. 5.4). Кроме того, для алмаза характерна сильная дисперсия, благодаря чему возникает игра света на гранях кристаллов, переливающихся всеми цветами радуги. Исключительно высокая твердость (по шкале Мооса твердость алмаза 10, корунда 9) определяет промышленное использование этих минералов в качестве абразивов и режущих инструментов.

Гранат, циркон, берилл и топаз — более распространенные минералы; их кристаллы могут быть отнесены к классу драгоценных камней только при определенных условиях. Редко встречающиеся яркие цвета у обычно тусклых минералов, таких как кварц, обусловлены в первую очередь присутствием в их составе элементов-примесей. Цвет зеленой разновидности берилла — изумруда — также определяется, как правило, хромом или ванадием, в то

* Умбра — природный минеральный пигмент красновато-коричневого цвета, более темный, чем охра; состоит из окислов марганца, гидроокислов железа, глинозема и т. д.

время как цвет его синей разновидности — сапфира — обусловлен железом или титаном. Яркая окраска минералов может быть связана также со специфическими особенностями их кристаллической структуры. Источниками многих драгоценных камней являются изверженные породы. Рубины и сапфиры Кампучии и Таиланда приурочены к неккам щелочных базальтов.

Перидот (драгоценная разновидность оливина, называемая также хризолитом, о котором упоминает Отелло *) встречается в виде вкрапленников в основных породах. Коренным источником алмазов является кимберлит — необычная ультраосновная изверженная порода, залегающая в виде даек или цилиндрических тел, которые называются трубками.

По всей вероятности, трубки формируются в результате взрывов глубинных газов. Особенности состава кимберлитов и тот факт, что во многих кимберлитовых телах обнаружены ксенолиты мантийных пород (эклогита или перидотита), свидетельствуют о больших глубинах образования материнского расплава. Экспериментальные исследования позволили прийти к выводу, что алмазы устойчивы только на глубинах, превышающих 150 км. Представляется вероятным, что алмазосодержащие кимберлитовые магмы мигрировали приблизительно с таких глубин, неся практически не оплавленные ксенолиты и ксенокристы **. мантийного вещества. Вместе с алмазами в ряду ксенокристов представлен также магнезиальный гранат пироп, являющийся минералом-спутником алмаза; его присутствие служит поисковым признаком. Пироп встречается в различных поверхностных наносах и русловых осадках, куда он попадает из разрушаемых выветриванием кимберлитов.

Драгоценные камни образуются также в пегматитах и в метаморфических породах, где высокие концентрации летучих компонентов способствовали формированию крупных кристаллов. Такие месторождения, небольшие по размерам, имеют гнездообразную форму; разрабатываются они обычно открытым способом (единственная горная порода, содержащая драгоценные камни, проходка которой глубокими горными выработками рентабельна, — это алмазоносные кимберлиты). Устойчивость, прочность и высокая плотность многих самоцветов позволяют им сохраняться в неизмененном виде, в то время как материнские породы разрушаются под действием выветривания и других процессов. «Синяя земля» — продукт выветривания кимберлитов, как правило, более алмазоносна, чем неизмененный кимберлит.

В процессе переноса водами самоцветы наряду с другими тяжелыми минералами отделяются от рыхлых осадков, образуя более или менее значительные скопления. Россыпи на реке Оранжевая, а также в отложениях древних пляжей Намибии являются основным источником добычи алмазов в Южной Африке (см. рис. 4.3). В россыпях Шри Ланки обнаружены сапфир, рубин, циркон и другие минералы.

---

* Отелло: «Не эта бы беда, //Так я на целый мир из хризолита //Не променял ее...» [Шекспир В. Полн. собр. соч. Пер. Б. Пастернака. М., 1960, т. 6, с. 415].

** Вкрапленник, чуждый данной породе, захваченный магмой при ее внедрении и представленный (в отличие от ксенолита) кристаллом.

Таблица 5.4. **Драгоценные и поделочные камни**

Наименование	Состав, генезис	Цвет и другие характерные признаки	Геологическая приуроченность, вмещающие породы	Основные районы распространения
Алмаз	Природная кристаллическая форма углерода, образующаяся при очень высоких температуре и давлении	Преимущественно бесцветный; высокий показатель преломления, весьма высокие твердость, плотность, дисперсия	Кимберлиты, выветрелые кимберлиты («синяя земля»); аллювиальные и прибрежные (морские) россыпи	Южная Африка (ЮАР, Намибия), Западная Африка, СССР (Сибирь)
Рубин	Корунд (Al_2O_3)	Красный	Щелочные базальты, бедные кремнеземом метаморфические породы; россыпи	Кампучия, Таиланд, Бирма, Шри Ланка, Восточная Австралия
Сапфир	„	Синий, желтый	Пегматиты, граниты	Колумбия, Бразилия, Южная Африка
Изумруд	Берилл ($BeAl_2Si_6O_8$)	Зеленый	„	
Аквамарин	„	Бледно-голубой	Пегматиты, граниты; аллювиальные россыпи	СССР (Урал), Бразилия, Зимбабве
Топаз	$Al_2SiO_4(OH, F)_2$	Желтый, розовый, голубой	Преимущественно аллювиальные россыпи	Шри Ланка, Бирма
Циркон	$ZrSiO_4$	При нагревании окраска становится более интенсивной	Метаморфические сланцы, скарны; аллювиальные россыпи	Южная Африка
Гранаты	Железомагнезиальные алюмосиликаты	Красный, зеленый и др.	Граниты, пегматиты, гидротермальные жилы	Бразилия, Уругвай
Горный хрусталь	Кварц (SiO_2)	Бесцветный, прозрачный		Шотландия
Аметист	„	Пурпурный, дымчато-желтый	Метаморфические породы, образованные в условиях высоких давлений	Китай, Бирма, Гватемала, США (Калифорния), Новая Зеландия
Жад	Натриевый пироксен жадеит и нефрит (из группы амфиболов)	Массивные волокнистые агрегаты; цвет серый, зеленый	Небольшие низкотемпературные гидротермальные жилы, метасоматические залежи	Австралия (Квинсленд), США (Невада), Мексика
Опал	$SiO_2 \cdot H_2O$	Голубой, зеленый, красный; характерна игра цветов (опалесценция); аморфный	Гидротермальные жилы и миндалины в осадочных и вулканогенных породах	Распространение повсеместное
Агат	Халцедон (массивный скрытокристаллический кварц с опалом)	Концентрически-зональная окраска (серые и коричневатые тона)	Небольшие гидротермальные жилы, метасоматические залежи	Англия (Дербишир)
«Голубой Джон»	Флюорит (CaF_2)	Массивный, мраморно-голубой (до синего), серый, пурпурный	Зоны окисления медных руд	Индия, Иран, США (Аризона)
Бирюза	Водный фосфат меди и алюминия	Переливчато-голубой	Контактово-метасоматические залежи в известняках	Иран, Афганистан, СССР (оз. Байкал)
Ляпис-лазурь (лазурит)	Серосодержащий фельдшпатоидный минерал группы содалита	Массивный, ярко-синий, мраморовидный	Эвапориты, сталагмитовые натеки	Средиземноморье (добывается с глубокой древности, возможно со времен египетских фараонов)
Алебастр	Гипс ($CaSO_4 \cdot 2H_2O$), кальцит ($CaCO_3$)	Тонкозернистый, белоснежный, иногда серый	Палеогеновые осадки морских побережий и эстуариев	Побережье Балтийского моря
Янтарь	Ископаемая смола	Желтоватый, золотистый		

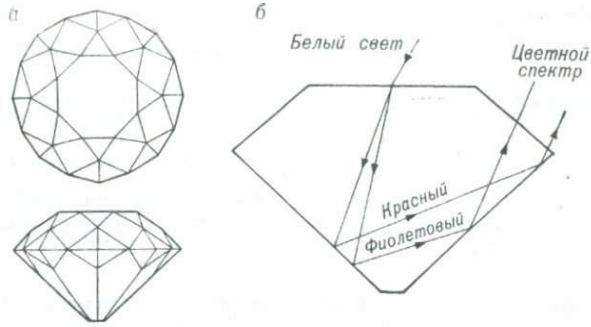


Рис. 5.4. Алмаз бриллиантовой огранки (а); эффект внутреннего отражения и дисперсии света (б) (по данным И. У. Фирнсайдса и О. М. Булмана [1944 г.].

Из менее ценных, но тоже красивых самоцветов, используемых в ювелирном деле, и при создании орнаментов и мозаик, можно упомянуть такие плотные зернистые агрегаты, как жад *, лазурит и алебастр **, скрытокристаллические образования опал и агат и немногие минералы органического происхождения, например янтарь. Поделочные камни нашли свое применение в мозаике, инкрустации и скульптуре наряду с некоторыми горными породами, используемыми и в строительном деле («штучные камни»). Можно упомянуть также мягкие, легко поддающиеся обработке горные породы — серпентин и жировик (мыльный камень или массивный тальк).

Мрамор (метаморфизованный известняк) служил основным материалом при создании скульптур в Древней Греции и Древнем Риме и в эпоху итальянского Возрождения. Мезозойские известняки, среди которых отмечаются многочисленные выходы мрамора, широко распространены в Южной Европе. Главными местами разработки залежей мрамора для древних греков были, вероятно, Аттика и Киклады.

Еще одна группа минералов, которую следует назвать, — это природные красители, применявшиеся в прежние времена для различных росписей; в наши дни, однако, ими почти не пользуются. Окислы и гидроокислы железа, содержащиеся в породе, придают ей разнообразные оттенки. Охры, образующиеся в зоне окисления сульфидных месторождений (хр. Трудос, Кипр), использовались для получения желтой, коричневой и красновато-бурой красок. Примесь окислов и гидроокислов меди придает породе зеленую или синюю окраску, присутствие кобальта — голубую, а лазурита — темно-синюю (ультрамариновую).

---

* Под названием «жад» объединяются два минерала: жадеит (натровый алюмосиликат из группы пироксенов) и нефрит — плотная скрытокристаллическая разновидность актинолита.

** Природный алебастр — снежно-белая волокнистая разновидность гипса.

6. ГЕОЛОГИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ИНЖЕНЕРНО-СТРОИТЕЛЬНЫХ РАБОТ

6.1. ВОПРОСЫ УСТОЙЧИВОСТИ РЕЖИМА ЗЕМНОЙ ПОВЕРХНОСТИ

Природный ландшафт во многих странах претерпел существенные изменения в результате многосторонней деятельности человека. Вырубка лесов и обработка земель для нужд сельского хозяйства с доисторических времен приводили к постепенному изменению растительного покрова, почвенного слоя и водного режима. В сравнительно недавнем прошлом вследствие развития гражданского строительства и горной промышленности существенно преобразились береговые линии морей и озер, речные сети и земной рельеф. Все эти преобразования так или иначе связаны с частичными отклонениями геологической и экологической системы планеты от их нормального состояния, и если не научиться предвидеть и своевременно предотвращать нежелательные последствия, могут развиться необратимые процессы, вызывающие постоянные и широкомасштабные нарушения природного равновесия. Среди наиболее известных и распространенных нарушений такого рода можно назвать оползни, наблюдаемые, например, при прокладке грунтовых и железных дорог (см. рис. 1.5); следует упомянуть также проседания грунта, часто встречающиеся в местах разработок угольных месторождений (рис. 6.1).

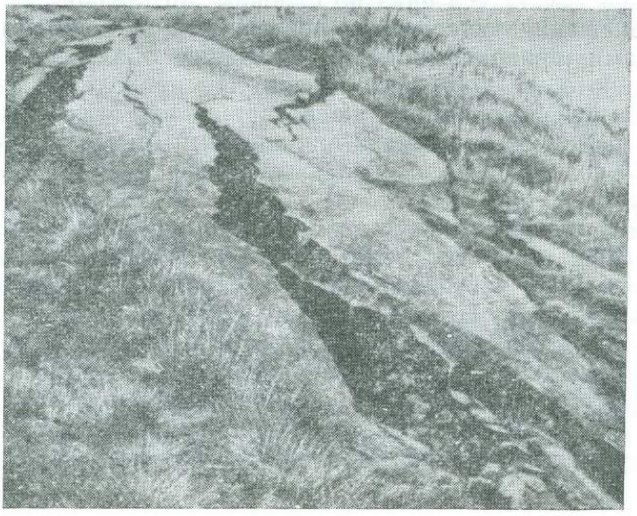


Рис. 6.1. Повреждение дороги в результате просадки грунта (фото Барнеби).

В этой главе мы рассмотрим два основных момента, а именно: 1) факторы, влияющие на устойчивость природных систем и искусственных сооружений; 2) наиболее существенные *преобразования* ландшафтов и используемых земель в результате как естественных процессов, так и деятельности человека.

Для правильной оценки указанных явлений необходимо иметь достаточно полную информацию об основных характеристиках горных пород, служащих основаниями различных сооружений. Такие характеристики включают оценку физико-механических свойств грунтов (коренных пород или поверхностных отложений) и определяют возможность контроля над потенциально разрушительными процессами. Не надо забывать, что не все геологические явления, играющие отрицательную роль в жизни человечества, связаны с вмешательством человека в природу. Ведь и самой земной коре свойственно состояние неустойчивого равновесия и многие естественные процессы в определенных условиях являются пагубными для человека.

6.2. ПРОЯВЛЕНИЯ НАРУШЕНИЙ ПРИРОДНОГО РАЗНОВЕСИЯ

6.2.1. ДВИЖЕНИЕ ПОРОД ПОД ДЕЙСТВИЕМ СИЛЫ ТЯЖЕСТИ

Гравитационные силы являются мощным фактором, влияющим на устойчивость земной поверхности. Из этого следует, что водные массы, скопления наносов и глыбы коренных пород при отсутствии достаточно надежного упора стремятся под действием своего веса сместиться вниз по склонам. Медленное, но необратимое перемещение материала в сочетании с внезапными резкими подвижками, приводящими к образованию оползней, обвалов и грязевых потоков, настолько опасно, что приходится затрачивать много времени и средств на предотвращение этих катастрофических явлений либо возмещать причиненный ими ущерб (только за один 1973 год ремонт федеральных дорог в США обошелся в 43 млн. долл.).

Почти при всех гравитационных перемещениях грунта решающее значение имеет вода, которая, как смазка, уменьшает силу сцепления между частицами пород и увлажняет возможные плоскости скольжения. На протяжении всей истории человечества большинство катастрофических оползней, селевых и грязевых потоков возникало после бурь и периодических ливневых дождей. Другие факторы, влияющие на нарушение природного равновесия, связаны с уничтожением растительного покрова, с резким увеличением крутизны склонов, повышением сейсмической вибрации и т. д.

Существует целый ряд свойств коренных пород и уплотненных осадков, объединяемых согласно инженерно-геологической терминологии под названием «грунт», которые способствуют перемещению материала вниз по склонам:

— высокое гидростатическое давление;
— слабое сцепление зерен в осадках, густая трещиноватость вблизи плоскостей напластования, контактов, участков сланцеватости в твердых породах;
— наличие непроницаемых слоев, экранирующих грунтовые воды, вследствие чего образуется «смазка» оползневых поверхностей;
— встречаемость пластов и пропластов «скользких» или «ползучих» пород, таких как глины, эвапориты, антрациты и др.;
— падение пород в сторону склонов, вдоль потенциальных плоскостей скольжения (ими могут быть плоскости наслоения, трещины, контакты литологических разностей, разломы, участки рассланцевания и т. д.).

Возможность избежать возникновения оползневых явлений в ходе строительства дорог, взлетно-посадочных полос, плотин, зданий и других объектов либо по его завершении зависит от умения вовремя распознать и выделить неустойчивые породы, структуры и формы рельефа еще на стадии инженерно-геологического картирования. За исключением наводнений, во время которых приходится считаться в основном с деятельностью водных протоков, массовые перемещения грунта под действием силы тяжести можно классифицировать следующим образом: а) медленные движения вниз по склонам, наиболее характерные для естественного сползания главным образом сыпучего материала; б) быстрые движения по склонам, типичные для селевых потоков, представляющих собой смесь обломков твердого материала с водой, и для оползней, при которых от основного массива отрываются целые блоки грунта и стремительно смещаются вдоль плоскостей скольжения; в) проседание и вспучивание (выпирание) грунта в связи с перераспределением нагрузок.

Перемещение по склону почв, рыхлых наносов, ледниковых отложений, выветрелых или обломочных образований и другого неуплотненного материала совершается в течение длительного времени, особенно в тех местах, где этот материал подвергается периодическому воздействию увлажнения и высыхания, промерзания и оттаивания (рис. 6.2). При медленном сползании материала деревья, опорные стены, изгороди и другие предметы, а также отдельные глыбы коренных пород приобретают наклонное положение и могут запрокинуться. Дамбы и опорные стены растрескиваются и деформируются; разрушаются дренажные трубы, газопроводы, линии электропередач и другие магистрали. Движение оползающих масс может быть замедлено в результате совершенствования дренажной системы, а в некоторых случаях *благодаря посадкам* деревьев и созданию травяного покрова.

Селевые потоки, состоящие из водонасыщенных продуктов разрушения почвенного и обломочного (делювиального) материала, приходят в движение внезапно и перемещаются с большой скоростью. Эти лавинообразные потоки могут сносить крупные сооружения и увлекать за собой гигантские глыбы пород. Значительную часть селевых потоков, иногда более 30%, составляет вода, и движутся они в виде густопластичных, вязких или жидких масс, часто эродирующих подстилающие породы. Зарождение таких потоков может быть обусловлено землетрясениями, обвалами,

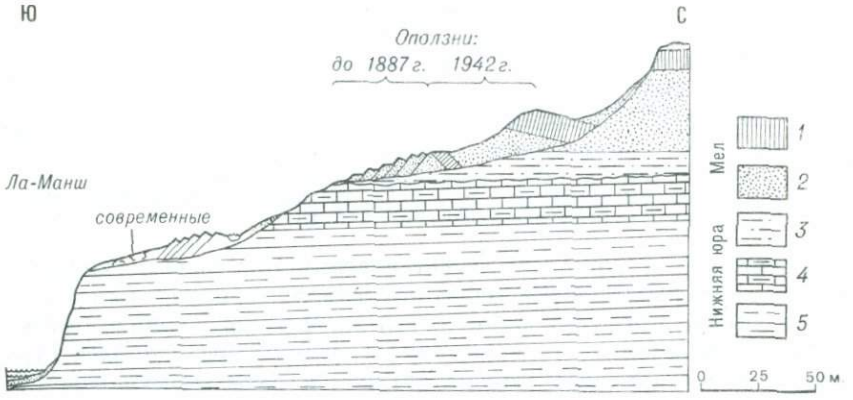


Рис. 6.2. Оползневые явления. Оползень в Фейри-Дэл (Дорсетшир, Великобритания) (*по данным* Д. Брандсена и Д. К. Джонса [1976 г.]).

Обращают на себя внимание пологое падение пластов в сторону моря и присутствие податливых глин, по которым произошло сползание верхней толщи зеленых песков мела. Положение слоя кремнистых сланцев указывает на то, что оползание сопровождалось запрокидыванием пластов.

1 — кремнистые сланцы (чёрты); *2* — тонкозернистые пески (верхняя толща формации зеленых песков); *3* — песчанистые глины нижнемеловой глинистой толщи (гольтский ярус); *4* — переслаивание известняков и глин среднего лейаса; *5* — трещиноватые глины и алевриты нижнего лейаса.

искусственными взрывами и другими причинами. Например, по мнению специалистов, селевой поток, обрушившийся на шведский город Гёта в 1950 г., был спровоцирован вбиванием свай в неустойчивый грунт.

Потоки вулканической грязи — лахары (термин индонезийского происхождения) часто сопутствуют субаэральным извержениям. Накопления пирокластического материала, образующиеся при эксплозивных извержениях, становятся неустойчивыми в результате влагонасыщения за счет дождей, талого снега и воды, выплескиваемой из вулканических озер (мааров). Эксплозивное извержение вулкана Сент-Хеленс на Западе США в 1980 г. сопровождалось образованием нескольких грязевых потоков. В доисторические времена грязевой поток, спустившийся с горы Рейнир в этом же регионе, покрыл территорию более 300 км^2. При извержении Везувия в 79 г. н. э. возник мощный грязевой поток, поглотивший город Геркуланум, находившийся на расстоянии 7 км от кратера вулкана; при этом город оказался погребенным под слоем жидкой грязи, мощность которого достигала 20 м.

Чувствительные глины и зыбучие пески представляют собой такие образования, в которых обломочный материал характеризуется особенно рыхлой текстурой («упаковкой») и, следовательно, высокой водонасыщенностью. Эти осадки разжижаются либо превращаются в плывун при самых незначительных нарушениях природного равновесия, причем они могут стекать по склонам, естественный уклон которых составляет всего несколько градусов. Наличие прослоев морских глин-плывунов в ледниковых отложениях голоцена причинило большой ущерб во время строи-

тельных работ в скандинавских странах и в Канаде. Например, на низменности Св. Лаврентия, к востоку от Оттавы, глинистые слои Леда неоднократно приходили в движение, в результате чего основания зданий становились неустойчивыми, дороги блокировались, а поля разрушались.

В горнодобывающих и промышленных районах значительную опасность представляют массы обломочного материала, образующиеся при разрушении штабелей руды и отвалов пустой породы; это особенно опасно в тех местах, где неустойчивые склоны и неблагоприятные структурные и гидрогеологические условия могут вызвать перемещение этих масс. На угольных месторождениях Южного Уэльса, где в верхнемеловых угленосных отложениях водопроницаемые слои песчаников ограничены аргиллитовыми пачками, в течение нескольких десятилетий пустая порода скапливалась на крутых склонах узких долин. Катастрофический поток 1966 г., разрушивший сельскую школу в Аберфане и погубивший более 140 человек, зародился на 40-метровой вершине породного отвала. Причиной катастрофы послужило размывание водами в период осенних ливней подошвы отвала, который располагался вблизи линии выхода источников, приуроченной к обнажению аргиллитов. Это продолжалось до тех пор, пока водонасыщенный грунт нижней части склона не превратился внезапно в селевой поток, устремившийся вниз, к долине и увлекший за собой массу более сухих обломков, слагавших основную часть отвала. Именно на примере таких разрушительных явлений становится очевидным, насколько тщательно следует изучить местность, прежде чем планировать размещение отвалов либо возведение тех или иных сооружений, создающих ощутимую нагрузку на грунт.

Оползни, осыпи, проседания и обвалы, в результате которых происходит массовое перемещение самого разного материала, могут охватывать площади во многие квадратные километры. Оползневое тело, отделившееся от основания (базиса оползания), движется вдоль одной или нескольких поверхностей. Для распознавания пластов пород, образующих оползневые накопления, используют характерные ступени и уступы, а также наклоны, изгибы плоскостей напластования и другие следы оползневых подвижек. Останцы древних оползней могут сохраняться в виде беспорядочно расположенных бугров и впадин, в которых иногда застаивается вода. Эти топографические особенности свидетельствуют о неустойчивом режиме поверхности, что может привести к катастрофическим последствиям.

Возникновению и развитию оползневых процессов способствуют крутые склоны *. Такие склоны часто встречаются, например, в тектонически активных, быстро разрушаемых эрозией горных районах и в прибрежных зонах (морские обрывы — клифы). Во всех случаях возрастания крутизны склонов, независимо от того, обус-

* Оползни возникают вследствие несоответствия крутизны склона характеру и состоянию пород, слагающих склон и его основание.

ловлено это врезанием реки в долину либо подмывом береговых обрывов или же вызвано сооружением автомобильной либо железной дороги, как правило, возникают оползни. Дренирование склонов и ряд других предохранительных мер могут ослабить катастрофические последствия оползней, однако их редко удается предотвратить, пока сохраняются условия неустойчивого режима местности.

Некоторым *оползням начальный* импульс задают скопления грунтовых вод или внешние толчки. Сползание блоков грунта в узкие долины может вызвать катастрофические наводнения вследствие запруживания рек и вытеснения воды из озер. Эти явления наблюдались во время оползня Вайонт (Северная Италия), описанного в разделе 6.3.1.

Подводные оползни на обширных территориях морского дна наиболее часто встречаются в пределах нестабильных океанических бассейнов, для которых характерно достаточно быстрое осадконакопление. Оползание рыхлого материала, в котором силы сцепления частиц весьма незначительны, иногда приводит к формированию оползневых покровов, наблюдаемых в толщах турбидитов и *других плохо сортированных* песчаных осадков, отложившихся из турбидитовых (мутьевых) потоков. Эти потоки, зарождающиеся обычно под влиянием штормов или землетрясений, повреждают подводные кабели и другие коммуникации и представляют потенциальную опасность при эксплуатации нефтяных месторождений.

Просадка и вспучивание (вздутие, выпирание) грунта в результате перераспределения нагрузок или потери прочности пород могут иметь место на земной поверхности в тех случаях, когда она подстилается неустойчивыми породами, такими как глины и эвапориты. Эти явления наблюдаются также на участках проведения горных или строительных работ, в том числе при открытой разработке месторождений полезных ископаемых или стройматериалов.

Явление естественной разгрузки грунтов на территории Великобритании можно наблюдать в долинах Нортхэмптоншира и Линкольншира, где лейасовые глины, перекрытые более жесткими породами, оказались выведенными на земную поверхность. Это произошло вследствие разрушения вышележащего покрова, сложенного песчаниками, известняками и железняками. Разгрузка глинистых отложений от давления перекрывающих их пород привела к образованию куполовидных вздутий, выраженных в рельефе узкими гребнями, ориентированными согласно общему простиранию современной долины на протяжении 15 км (рис. 6.3).

В меньшем масштабе эти явления могут быть прослежены при проведении горнопроходческих работ, когда происходит выпирание грунта из-под оснований горных выработок — карьеров или тоннелей, особенно на тех участках, где уровень грунтовых вод достаточно высокий. Вспучивание может достигать высоты нескольких метров. В результате вертикальной нагрузки на грунт, вызываемой весом сооружений значительных размеров, глины и другие пластичные материалы начинают течь по направлению от центра основания к периферии, что приводит к просадкам фундамента.

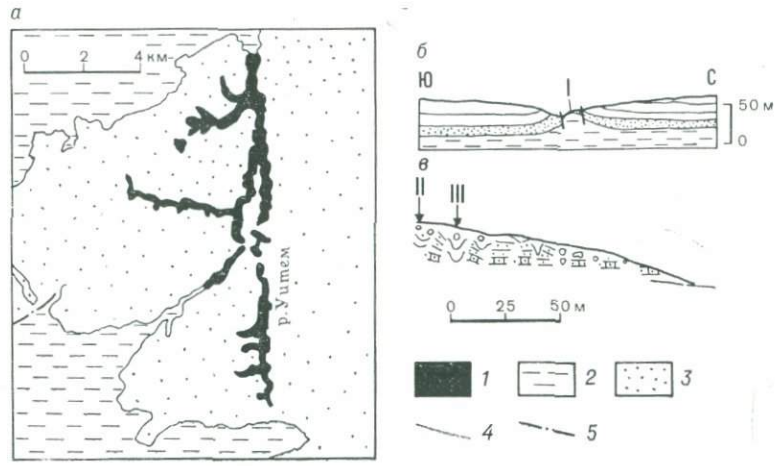


Рис. 6.3. Структуры вспучивания (вздутия) в долинах рек (по С. Э. Холлингуорту [1944 г.]).

а — карта распространения структур вздутия, сложенных *лейасовыми глинами, в долине* р. Уитем; *б* — разрез структуры вздутия и приподнятых ею вышележащих слоев более жестких пород; *в* — вспучивание глин на склоне долины (глыбы песчаников и железняков, перемещаясь вниз по склону, оставляют «галлы» — широкие трещины растяжения, заполняемые обломками оползающей массы).

1 — лейасовые глины, образующие структуры вздутия в долине реки; *2* — обнажения ненарушенных лейасовых глин; *3* — известняки, песчаники и железняки нижней толщи оолитовой формации; *4* — подошва толщи нортхэмптонского песчаника; *5* — сброс.

I — глины, образующие структуры вздутия; *II* — глыбы железняков и песчаников, *III* — «галлы».

Такие движения сопутствовали возведению комплекса «Шелл» на южной отмели Темзы (Лондон), вследствие чего возникла угроза разрушения метро-тоннелей, проложенных под рекой. Второй возможной причиной просадок грунта является естественное ослабление его прочности, направленное снизу вверх. Это может быть связано с растворением известняков или солей; кроме того, потеря устойчивости бывает вызвана проходкой тоннелей или шахт.

Процессы оседания грунта могут быть также результатом откачки жидкости (воды, нефти) или газа в тех случаях, когда эти процессы сопровождаются уплотнением грунта или вмещающих пород. В районе города Лонг-Бич (Калифорния) выкачивание нефти из месторождения Уилмингтон в течение 30 лет повлекло за собой просадку грунта до 10 м. После 1958 г. закачка воды в пласты-коллекторы приостановила эту просадку, поскольку значительно возросло гидростатическое давление в недрах.

6.2.2. ГЛУБОКИЕ ГОРНЫЕ ВЫРАБОТКИ

Эксплуатационные шахты при добыче ценных металлов (например, золота в бассейне Витватерсранд) достигают глубины 2—3 км. На таких глубинах шахтные стволы и штреки, проходка которых приводит к созданию пустот в коренных породах, образуют систему, характеризующуюся внутренней неустойчивостью. При

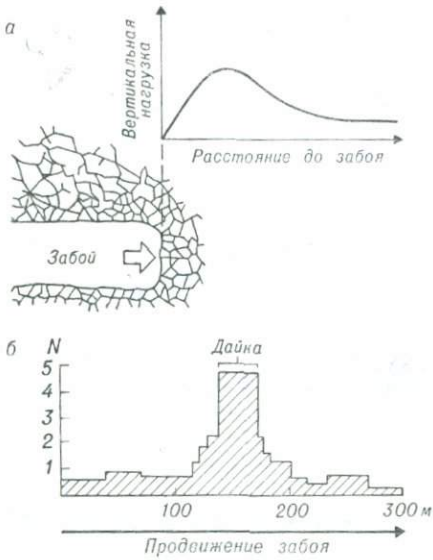


Рис. 6.4. Действие нагрузок на подземные горные выработки.

а — трещиноватость и возрастание нагрузок в зоне рабочего забоя; *б* — частота горных выстрелов в шахтах бассейна Витватерсранд (*N* — число горных выстрелов на единицу площади выработки).

высоком гидростатическом давлении, которое, как правило, возникает в подобных условиях, обвал можно предотвратить только в том случае, если вмещающие породы обладают достаточной прочностью. Такие тектонические нарушения, как сбросы и зоны трещиноватости, создают угрозу обрушения при проходке и эксплуатации шахт. Поэтому для придания прочности всей системе следует в необходимых случаях цементировать подземные выработки или применять специальные крепления.

Твердые породы, например кварциты или долериты, могут стать неустойчивыми при изменении внутренних напряжений во время проходки шахт. При значительном возрастании нагрузок возможно разрушение даже крепких пород. В этих случаях может произойти так называемый горный выстрел — внезапный отрыв массы пород от стенок выработки, что сопровождается оглушительным грохотом и образованием многочисленных обломков. Горные выстрелы представляют особую опасность для глубоких шахт, например, в Витватерсранде, где золотоносные конгломераты залегают среди докембрийских кварцитов и секутся дайками, имеющими разные физико-механические свойства (рис. 6.4).

Вода и природный газ (в том числе легко воспламеняющийся метан и другие углеводородные газы) имеют тенденцию проникать во все ходовые выработки на шахтах, а предотвратить это можно только с помощью сложных установок для откачки воды и вентиляции. Поскольку нижние горизонты глубоких шахт расположены, как правило, ниже зеркала грунтовых вод, окружающие породы являются водонасыщенными. Поэтому, если рабочий забой находится в зоне трещиноватости или разлома, т. е. в зоне с повышенной гидравлической проводимостью, возникает опасность затопления шахты.

В связи с возможностью заводнения и возникновения обвалов шахтные геологи должны прогнозировать местонахождения зон тектонических нарушений, а также расположение водоносных горизонтов при планировании горных работ. Для этого необходимо провести геологические и геофизические наблюдения на земной

поверхности, выполнить детальное изучение керна и получить информацию по действующим шахтным горизонтам. Поскольку водонасыщенные зоны, связанные с разломами и трещиноватостью, имеют низкое электрическое сопротивление, по этому и другим признакам можно определить положение подобных зон и, следовательно, принять соответствующие меры против локальных обрушений стенок и кровли горных выработок в процессе проходки.

6.2.3. ВЕЧНАЯ (МНОГОЛЕТНЯЯ) МЕРЗЛОТА

В полярных, субарктических и горных областях, где температура воздуха в течение длительных периодов времени сохраняется на уровне 0°С или ниже, развивается многолетнемерзлый грунт — так называемая вечная мерзлота. В районах распространения вечной мерзлоты, занимающей около 20% поверхности суши на земном шаре, мы встречаемся с целым рядом проблем при сооружении и эксплуатации зданий, дорог и других строительных объектов. В этих районах вопросы водоснабжения, а также размещения производственных и бытовых отходов представляют особые трудности. В связи с бурным промышленным развитием Сибири и Северной Америки и с недавними открытиями арктических месторождений нефти специалистам пришлось обратить пристальное внимание на изучение особенностей районов распространения вечной мерзлоты.

Слой многолетнемерзлых пород, в котором поровые воды находятся, как правило, в замерзшем состоянии, колеблется по мощности от нескольких десятков сантиметров до нескольких сотен метров. Он перекрывается над мерзлотным слоем (именуемым иногда словом «талик»), в пределах которого процессы промерзания и оттаивания подвержены сезонным изменениям *. В областях развития вечной мерзлоты температурный режим очень неустойчивый, колебания температуры наблюдаются во всех местах, за исключением районов, находящихся в наиболее холодных климатических условиях. Поэтому даже незначительные отклонения от нормы могут привести к необратимым изменениям, связанным с частичным оттаиванием многолетнемерзлого слоя.

Специфические особенности районов вечной мерзлоты обусловлены двумя основными факторами. Во-первых, замерзание в зимний период воды в талике приводит к нарастанию больших масс льда непосредственно под самой поверхностью почвы, что разрушает почвенный слой. Масса небольших морозных бугров — «пинго» ** — выпирает из земли, нарастая над мерзлым грунтом, а во время таяния льда они проседают, превращаясь в заполнен-

---

* Русский общепринятый термин «талик» (от «таять») используется для обозначения слоя незамерзшего грунта с температурой выше 0°С в течение всего года и влагой в жидкой фазе, окруженного мерзлой толщей горных пород; встречается чаще всего в зонах «пятнистой» многолетней мерзлоты.

** В нашей литературе такие бугры называются якутским словом «булгуннях».

ные водой выемки. Неоднократные промерзания и оттаивания приводят к образованию «структурного» или «узорчатого» грунта; скопления гравийно-галечного материала на поверхностях склонов образуют полосы и гирлянды, нарушенные солифлюкцией *. Во-вторых, во время летнего оттаивания грунта движение подземных вод оказывается ограниченным, так как слой мерзлых пород служит для них барьером, препятствующим просачиванию вглубь. Поэтому вода задерживается в верхнем слое (мощностью до нескольких метров), который тем самым разрыхляется.

Катастрофическое разрыхление грунта, сопровождающее весеннее снеготаяние, в летние периоды приводит к выходу из строя многих шоссейных и железных дорог и взлетно-посадочных полос в аэропортах. Солифлюкция на склонах, уклон которых не превышает нескольких градусов, может вызвать разрушения оснований различных построек; при замерзании же наблюдается вспучивание грунта вместе с находящимися на нем сооружениями. В результате таких явлений дороги оказываются поврежденными, а опорные сваи зданий и мостов могут быть буквально выдавлены из грунта или даже выброшены на поверхность. Поэтому самое главное в условиях вечной мерзлоты — при сооружении тех или иных объектов выбрать места, наименее подверженные действию указанных процессов, т. е. выбрать участки, представленные коренными породами либо грубозернистыми, хорошо дренированными отложениями (гравийниками и песками).

При строительных работах всех видов, как правило, отмечается нарушение температурного режима подстилающих пород, иными словами, нарушение природного равновесия (рис. 6.5). Оттаивание грунта в летние месяцы становится очень интенсивным и слой вечной мерзлоты может оказаться нарушенным на целом ряде участков. Так, под дорогой, проложенной в начале 1950-х годов на Аляске, отмечались сезонные температурные колебания, в 3—4 раза превышающие нормальную смену температур в ненарушенном грунте. Эта дорога, как и многие другие трассы такого типа, была сильно искорежена в результате просадки и морозного вспучивания. Современные дороги обычно прокладываются на мощной насыпи, позволяющей изолировать дорожное покрытие от слоя вечной мерзлоты.

Нарушения температурного режима отмечаются также под зданиями или другими крупными строительными объектами, сооружаемыми непосредственно на грунте, без изолирующего прослоя. В результате теплоотдачи от основания здания к почве происходит сокращение или разрушение многолетнемерзлого слоя, что в свою очередь способствует притоку грунтовых вод, которые, замерзая, превращаются затем в подземный лед. Воздействие хорошо отапливаемых зданий, построенных в 1950-х годах в Барроу (Аляска), привело к повышению температуры грунта на 5—6°С на глубине до 6—7 м от земной поверхности, вследствие чего эти здания пострадали в результате неравномерного проседания и растрескивания. Поэтому современные дома и трубопроводы в районах веч-

* Солифлюкция (буквально «течение почв») — медленное (0,5—5,0 см/год) вязкое течение вниз по склонам протаивающих, переувлажненных почвенных и других несортированных материалов в зонах развития вечной мерзлоты.

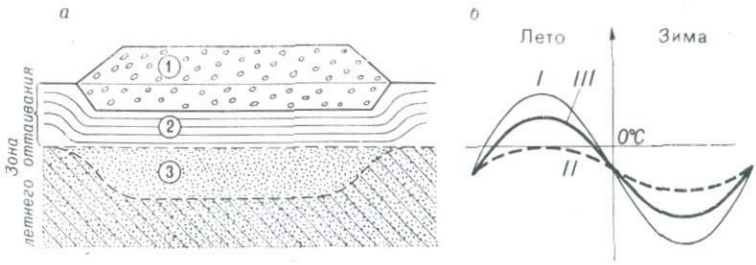


Рис. 6.5. Устойчивость грунта в районах развития многолетней (вечной) мерзлоты.

а — нарушение температурного режима, обусловленное строительными работами: кровля многолетнемерзлого слоя гипсометрически понижается в течение летнего оттаивания почвы, вследствие чего основания дорог теряют устойчивость; для изоляции многолетнемерзлого слоя и сохранения устойчивости грунта необходима более мощная гравийная насыпь. *1* — гравийная насыпь; *2* — уплотненный грунт под насыпью; *3* — оттаявшая часть много летнемерзлого слоя.

б — температурные колебания: *I* — сезонные на земной поверхности, *II* — первоначальные в грунте, *III* — после завершения прокладки дороги.

ной мерзлоты возводятся на сваях, а значит, под ними может свободно циркулировать холодный воздух, благодаря чему сохраняется естественный температурный режим.

6.2.4. СЕЙСМИЧНЫЕ РАЙОНЫ

Совершенно очевидно, что для районов с повышенной сейсмической или вулканической активностью особенно важным является вопрос о сохранении устойчивого режима. Главные сейсмичные районы и большинство активных вулканов нашей планеты приурочены к границам литосферных плит, которые перемещаются друг относительно друга со скоростью несколько сантиметров в год (рис. 6.6). Эти подвижки подразделяются на два вида: либо постоянное медленное скольжение, либо периодическое резкое смещение до нескольких метров вдоль разломов. Начальные эффекты подобных землетрясений обусловлены волнообразными колебаниями, распространяющимися от гипоцентра. Это может привести к обрушению зданий, к разрывам газо- и водопроводов, канализационных труб, линий электропередач. Сейсмическая активность сопровождается зарождением волн (цунами), затапливающих иногда обширные участки побережий. Наводнения происходят также в результате разрушения водохранилищ и выхода озер из берегов. Землетрясениям обычно сопутствуют пожары, нарушения коммуникаций, загрязнения вод и тем самым распространение заразных заболеваний.

Многочисленные человеческие жертвы и катастрофические разрушения — вот трагические последствия землетрясений в густонаселенных районах земного шара (например, во время токийского землетрясения 1923 г. погибло 143 тыс. человек). Чтобы свести до минимума разрушительную силу землетрясений, приходится строить антисейсмичные сооружения, а также разрабатывать ме-

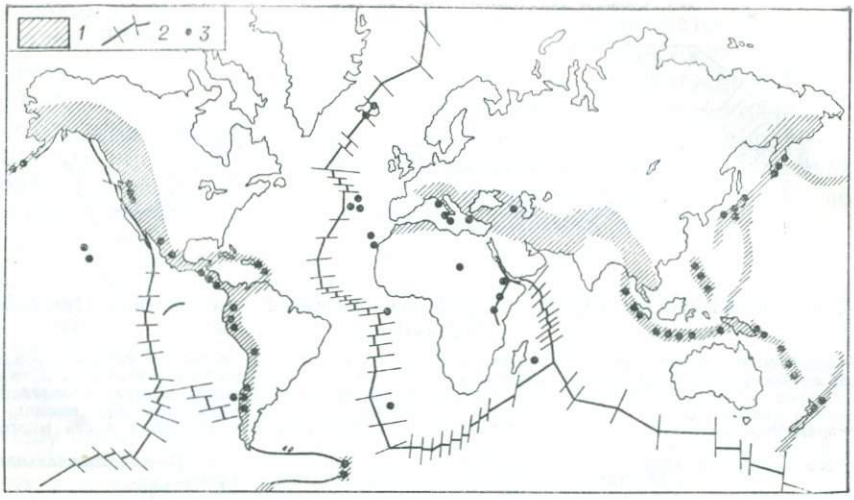


Рис. 6.6. Размещение «горячих точек», представляющих потенциальную опасность для человека.

Показаны зоны, приуроченные к краевым частям литосферных плит, и главные вулканические центры.
1 — подвижные орогенические пояса; *2* — срединно-океанические хребты и трансформные разломы; *3* — действующие вулканы.

тодику выявления наиболее опасных мест и совершенствовать службу прогноза землетрясений. Необходимо выполнять детальное геологическое картирование всех сейсмических территорий; надо при этом глубоко разбираться в динамике сейсмических толчков применительно к данному конкретному региону.

Сейсмологов привело в недоумение почти случайное открытие, состоящее в том, что изменения давления жидкой среды в зоне разрывов вблизи Денвера (Колорадо, США) были взаимосвязаны с амплитудой и частотой подземных толчов в этом районе. Эта интересная зависимость была установлена в начале 1960-х годов, когда было проведено закачивание сточных вод в глубокую скважину, пробуренную в трещиноватых породах докембрийского фундамента. Тогда и выяснилось, что частота слабых подземных толчков находится в прямой зависимости от объема закачанной жидкости. Был сделан вывод, что высокое давление жидкости продуцирует небольшие (а следовательно, менее разрушительные) смещения пород, находящихся в напряженном состоянии *. Из этих примеров можно судить, насколько сложны взаимоотношения между разными факторами, влияющими на сейсмическую характеристику того или иного района.

Возможность предсказать крупные землетрясения с такой степенью точности, чтобы успеть эвакуировать население за пределы сейсмоопасного района, определяется точностью прогнозирования

* Отечественная практика показала, что аналогичный эффект достигается и при создании искусственных водохранилищ.

Таблица 6.1. **Явления, служащие предвестниками землетрясений**

Основные признаки опасности	Краткая характеристика
Разрушения на земной поверхности	Систематическое нивелирование и использование датчиков смещения земной поверхности позволили установить заметные изменения за несколько недель до начала японских землетрясений 1943 и 1969 г.; аномальные колебания уровня морей и озер были зафиксированы непосредственно перед землетрясениями
Сейсмичность	Изменения частоты и силы небольших подземных толчков могут быть связаны с надвигающимися крупными землетрясениями. Например, за период 1965—1967 гг. в районе Мацусиро (Япония) групповые проявления небольших сейсмических толчков были зарегистрированы вблизи потенциальных эпицентров землетрясений, которые произошли несколькими месяцами позднее
Другие геофизические аномалии	Изменения магнитного поля и электропроводности пород перед землетрясением
Аномальный режим грунтовых вод	Необычно обильные притоки из источников или трещинных выходов в результате повышения гидростатического напора, внезапные изменения уровня воды в скважинах наблюдались за несколько дней и часов до землетрясения
Выделение газов	Изменение скорости выделения радона и других газов из зон разломов может служить признаком приближающегося землетрясения
Необычное поведение животных	Несмотря на неоднозначность этого признака, жители сейсмически активных районов (особенно в Китае) обращают серьезное внимание на отклонения в поведении различных животных, что может служить предвестником землетрясения

силы и времени подземных ударов. Нужно научиться распознавать отклонения от нормального сейсмического режима за несколько месяцев, дней или хотя бы часов до начала разрушительного землетрясения (табл. 6.1).

6.2.5. РАЙОНЫ АКТИВНОГО ВУЛКАНИЗМА

Можно выделить четыре основные категории пагубного воздействия вулканической активности на жизнь человека.

I. Пирокластические (пепловые) потоки. Они большей частью образуются при крупных извержениях риолитовых * вулканов. Это — быстро движущиеся раскаленные потоки пепла и газа, покрывающие обширные территории и уничтожающие на своем пути все живое. Хотя во время извержения вулканов Везувий (79 г. н. э.), Кракатау (1883 г.) и Мон-Пеле (1902 г.) потоки лав вызвали катастрофические опустошения и унесли множество человеческих жизней, все же эти

* Риолиты — группа эффузивных пород, в основном порфировых, с вкрапленниками кварца и щелочного полевого шпата в стекловатой массе.

бедствия уступают последствиям «деятельности» пирокластических потоков. При широкомасштабных извержениях эксплозивного (взрывного) типа возникали пепловые потоки, наиболее мощные и обширные из когда-либо наблюдавшихся человеком. Например, в 186 г. н. э. игнимбритовый * поток в Туапо (Новая Зеландия) покрыл территорию диаметром около 70 км.

II. Пеплопады. Они образуются при менее мощных эксплозивных извержениях, таких как извержение вулкана Сент-Хеленс в 1980 г. Пеплопады являются более частыми результатами вулканической активности, но относительно меньшая скорость выпадения и менее значительные масштабы распространения снижают их вредное воздействие на природу и человека. Вместе с тем даже тонкие слои пепла могут уничтожить растительность, а более мощные пеплопады приводят к разрушению зданий и повреждению коммуникаций. Лахары представляют такую же опасность, как и другие грязевые потоки, распространяющиеся с большой скоростью.

III. Лавовые потоки. Они изливаются преимущественно из базальтовых вулканов, выделяющих лавы с относительно низкой вязкостью. Лавовые потоки разрушают здания, пристани и дороги на своем пути. Катастрофические извержения, сопровождаемые потоками лав, происходят время от времени на склонах таких вулканов, как Этна (Сицилия), и в вулканически активных районах Исландии и Гавайев, хотя человеческие жертвы при этом, как правило, невелики.

IV. Наводнения. При проявлениях сейсмической активности наводнения обычно бывают незначительными по своим масштабам. Они обусловлены либо опустошением кратерных озер, либо подпруживанием речных русел. Более разрушительные наводнения происходят в тех случаях, когда пирокластические потоки или крупные пеплопады вызывают перемещения больших водных масс. Несмотря на то что наводнения — это побочные явления при вулканических извержениях, для человека они зачастую бывают губительными. Например, во время извержения Кракатау в 1883 г. из 36 тысяч погибших при этом людей большинство утонуло в волнах цунами, пронесшихся по Зондскому проливу после излияния в море пирокластических потоков **.

Характер и частота вулканических извержений зависят в значительной мере от генетической природы материнской магмы. Относительно спокойные и частые излияния лав характеризуют гавайский тип вулканизма, наиболее типичный для базальтовых вулканов. Извержения вулканов этого типа представляет относительно меньшую угрозу для жизни и имущества человека. Несравненно более мощные взрывные извержения вулканов с выделением вязких (особенно риолитовых) лав происходят настолько редко, что мы не имеем пока полного представления о их значимости в общем цикле вулканизма.

В результате контроля над деятельностью некоторых вулканов выяснилось, что подъем магмы по соответствующим каналам, предшествующий многим извержениям, приводит к целому ряду разрушений на земной поверхности, к притоку тепловой энергии из недр (иногда вскипает вода в кратерных озерах), к магнитным аномалиям и возрастанию сейсмической активности. Проблема заключается в том, чтобы использовать перечисленные и другие признаки надвигающегося извержения для научного прогноза как его времени, так и предполагаемых масштабов.

---

* Игнимбриты — породы, образовавшиеся в результате консолидации пепловых потоков и отложений палящих туч.

** Цунами, как правило, возникают в результате тектонических подвижек морского дна, вызывающих землетрясения, в том числе катастрофические.

6.3. ВОДОХРАНИЛИЩА И РЕГУЛИРОВАНИЕ РЕЖИМА РЕК

6.3.1. ВЫБОР МЕСТ ДЛЯ СООРУЖЕНИЯ ВОДОХРАНИЛИЩ И ВОПРОСЫ УСТОЙЧИВОСТИ ПЛОТИН

Основной проблемой, связанной с инженерно-геологическими исследованиями на протяжении более столетия, является создание искусственных водохранилищ с целью использования водных ресурсов для гидроэнергетических систем, ирригации и регулирования паводков. В первую очередь необходимо всесторонне изучить геологические условия района, которые зачастую могут оказаться весьма сложными. Кроме того, следует учитывать такие факторы, как благоприятное расположение резервуара, политическая ситуация и стоимость строительства. В ряде случаев нужно дать ответ на вопрос о необходимости сооружения искусственного водоема именно в этом месте, а не в каком-либо другом. Например, пришлось создавать целый ряд резервуаров, предназначенных для водоснабжения крупных городов Калифорнии, хотя возведение гидротехнических объектов в таких высокосейсмичных районах сопряжено с огромными финансовыми затратами.

Главные местные факторы, влияющие на устойчивость плотины и на герметичность водохранилища, — это строение коренных пород (состав, структура, особенности залегания), глубина и характер грунтовых вод. Там, где основанием плотины служат слабые породы (неконсолидированные отложения), нагрузка на них может быть уменьшена благодаря возведению широких дамб, в которых непроницаемое «ядро» (цемент или валунные глины) окружено дробленым материалом и слоями тонкозернистых осадков.

Фильтрация вод под основание плотины может быть уменьшена путем опускания непроницаемого «ядра» вниз — к коренной основе. Слабое основание плотины может быть укреплено предварительным дренированием и уплотнением грунта, а также цементацией, которая осуществляется введением жидкого цементного теста, эмульсии либо цементирующего раствора, заполняющих пустоты и поровые пространства в рыхлом материале. Можно также повысить устойчивость плотины забивкой шпунтов и свай в коренное основание. Жесткая бетонная плотина возводится обычно на крепких коренных породах (рис. 6.7). При выборе мест для строительства плотин и водохранилищ следует избегать участков с разломами, крупными несогласиями, а также с развитием тонкослоистых и рассланцованных пород.

Запруживание реки плотиной влечет за собой нарушение режима поверхностных и грунтовых вод. Вследствие этого начинают действовать процессы, направленные на восстановление природного равновесия. В связи с повышением базиса эрозии поднимается уровень грунтовых вод. В результате нагрузки на подстилающие породы, которую оказывают накопленные массы воды, речной аллювий может прийти в движение либо уплотниться, а вдоль новообразованной береговой линии будут действовать эрозионные про-

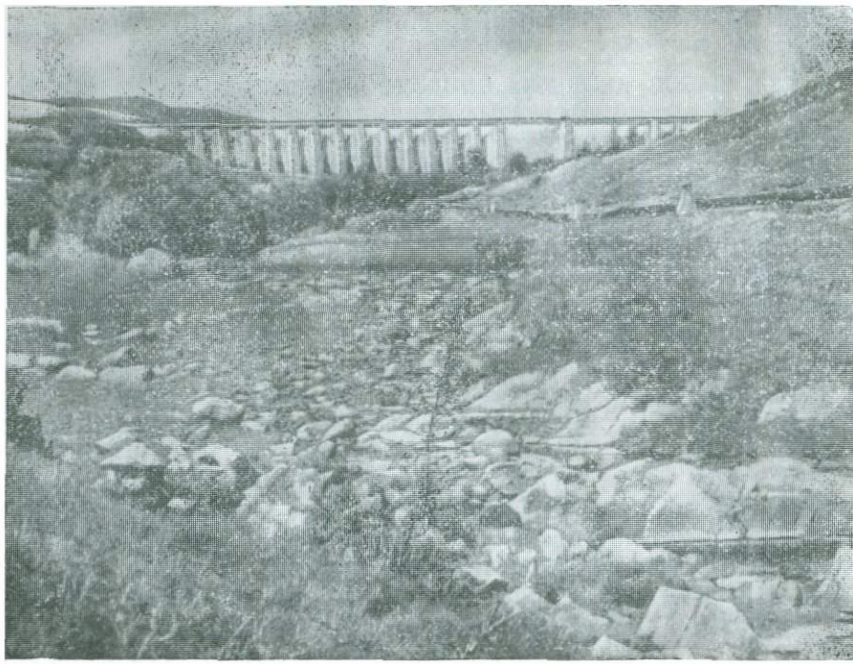


Рис. 6.7. Бетонная плотина (часть гидроэнергетической системы в Глен-Эррохти, Шотландия).

цессы. В тех местах, где склоны речных долин неустойчивы, эти изменения могут вызвать массовые подвижки, иногда приводящие к катастрофическим последствиям.

В качестве примера можно привести оползень, случившийся в Северной Италии в 1963 г. после сооружения плотины на р. Вайонт (приток р. Пьяве, впадающей в Адриатическое море). Здесь было создано водохранилище на участке, неустойчивом по геологическим условиям (рис. 6.8). Коренное основание под плотиной сложено известняками и глинами юрского — мелового возраста, образующими открытую синклинальную складку. В связи с этим плоскости напластования пород, в том числе легко сползающие слои глин, оказались наклоненными в сторону ложа долины. Неустойчивость, изначально присущая такой структуре, усугубилась сильной трещиноватостью пород.

Подъем зеркала грунтовых вод в процессе заполнения водохранилища расширил зону сатурации по обоим бортам долины, и с середины сентября 1963 г. скорость оползания грунта в этом потенциально оползневом районе возрастала от 1 до 30 см/сутки. 9 октября оползневой блок объемом почти 0,25 км^3 отделился от склона и начал перемещаться вдоль плоскости скольжения на глубине около 100 м со скоростью 25—30 см/сек и в конечном итоге целиком сполз к основанию склона.

Интересно, что «эхо» этого оползня в виде сейсмических сотрясений было зафиксировано даже в Брюсселе. Когда вся огромная масса грунта обрушилась в водохранилище, вода из него была вытеснена под таким чудовищным напором, что она каскадом перехлестнула через край плотины и низверглась в долину р. Пьяве. В результате этой катастрофы погибло 2600 человек и было разрушено несколько деревень, сама же плотина существенно не пострадала.

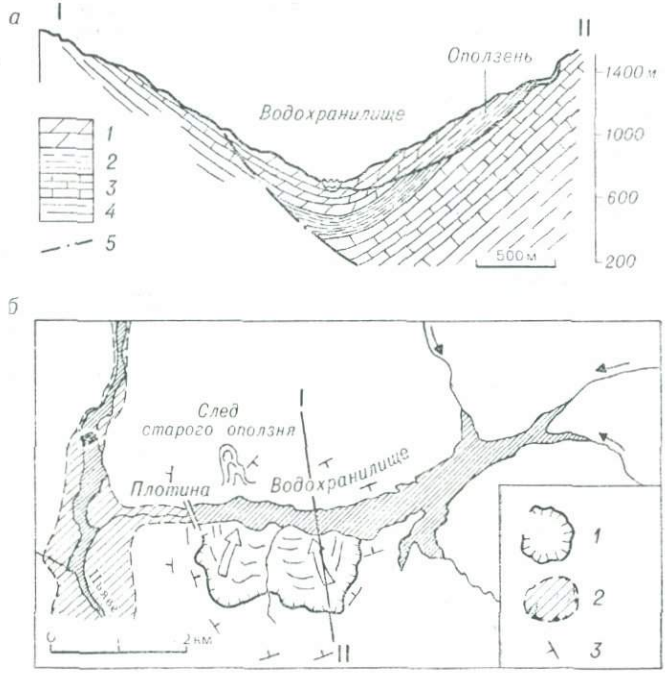


Рис. 6.8. Катастрофический оползень в долине р. Вайонт (по данным А. Кирша [1965 г.]).

Показаны размеры оползня (сентябрь 1963 г.), а также территория, затопленная водой в результате этого оползня.
Рис. *а*: *1* — меловые известняки и мергели, *2* — известняки с прослоями глин мальма, *3* — известняки доггера, *4* — известняки и мергели лейаса, *5* — тектоническое нарушение.
Рис. *б*: *1* — внешний контур оползня 1963 г., *2* — территория, залитая при наводнении, *3* — элементы залегания пород.

Поскольку вода, заполняющая искусственные резервуары, находится в контакте с грунтовыми водами, герметичность плотины зависит не столько от ее прочности, сколько от гидравлического градиента и способности коренных пород задерживать воду. По движению грунтовых вод, характер которого должен быть установлен до начала строительных работ, можно получить представление о масштабах фильтрации.

Как правило, водохранилища, водное зеркало которых расположено ниже локального уровня грунтовых вод на окружающих склонах, оказываются водонепроницаемыми, в то время как водохранилища, водное зеркало которых находится выше этого уровня, постепенно теряют воду, отдавая ее в систему подземного стока (рис. 6.9). Примером резервуаров первого типа служит водохранилище Ков-Грин в Пеннинских горах Северной Англии, которое удерживает воду, несмотря на то что оно окружено проницаемыми известняками. К резервуарам второго типа относится Асуанское водохранилище на Ниле, во́ды которого питают проницаемые слои нубийского песчаника. После сооружения здесь первой плотины в

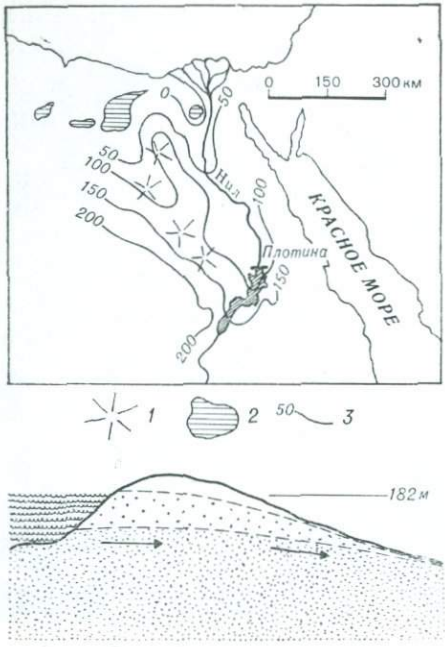


Рис. 6.9. Асуанская плотина (Египет).

Водоносные слои толщи нубийского песчаника, наклоненной к северу (по направлению к Средиземному морю), питают оазисы, возникающие в тех местах, где водное зеркало в этой толще пересекается с земной поверхностью. В окрестностях водохранилища водное зеркало расположено, как правило, на высоте 100—150 м над уровнем моря. Максимальный уровень воды в водохранилище (182 м) находится выше уровня грунтовых вод, вследствие чего возможны потери водных ресурсов (на схематическом разрезе показан редким крапом возможный подъем уровня грунтовых вод в толще нубийского песчаника).

1 — оазисы; *2* — участки суши, расположенные ниже уровня моря; *3* — высота водного зеркала (над уровнем моря, м).

1902 г. оазисы, расположенные к северу от плотины и питаемые водоносными горизонтами нубийского песчаника, некоторое время получали дополнительный, все возрастающий приток воды.

Постоянная проблема при эксплуатации водохранилищ связана с поступлением в них поверхностных наносов, транспортируемых питающей резервуар рекой либо отлагающихся в нем в результате размывания соседних склонов. Заиливание водохранилища приводит к уменьшению объема воды и, следовательно, к снижению его эффективности. Согласно результатам исследований, проведенных в США, выяснилось, что 15% водохранилищ теряют ежегодно более 3% своего полезного объема. Вредное воздействие заиливания можно существенно снизить, если соорудить на реках наносоуловители.

6.3.2. РЕГУЛИРОВАНИЕ РЕЧНОГО СТОКА (на примере р. Теннесси)

Интересный эксперимент, связанный с благоустройством одного из регионов США (штаты Теннесси, Кентукки и Северная Каролина), был поставлен в бассейне р. Теннесси. Этот эксперимент являлся составной частью энергетической программы «нового курса» президента Франклина Делано Рузвельта. Он был начат в 1933 г. и заключался в попытке упорядочить водоснабжение на территории водосборного бассейна р. Теннесси. В первую очередь были созданы многочисленные плотины и искусственные водохра-

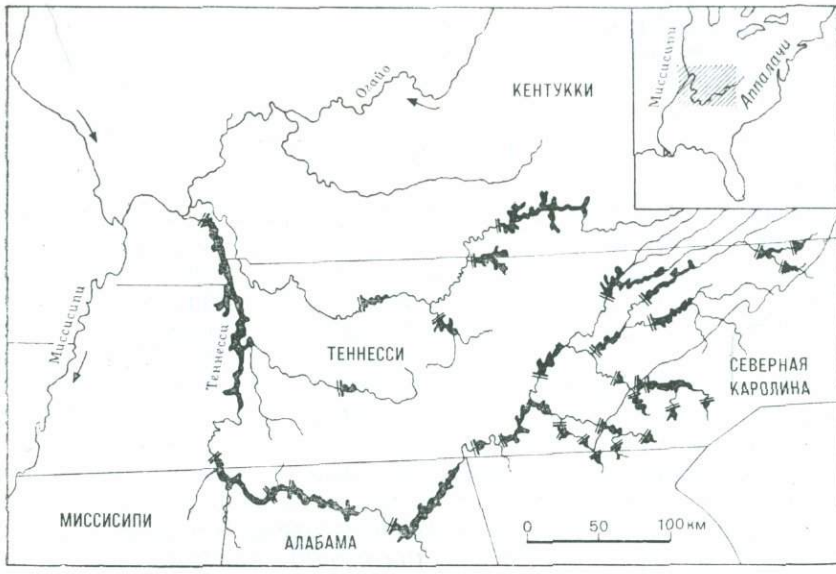


Рис. 6.10. Регулирование режима водотоков в широком масштабе.

Показаны многочисленные плотины и водохранилища, сооружение которых осуществлялось правительственными организациями в долине р. Теннесси.

нилища в долинах р. Теннесси и ее притоков (рис. 6.10). Эти сооружения предназначались для решения нескольких задач, краткая характеристика которых приводится ниже.

I. Регулирование паводков. Обильное выпадание дождевых осадков в Аппалачах — в верховьях бассейна р. Теннесси — вызывало неоднократные наводнения на протяжении многих десятилетий. Сооружение в 1930-х годах на главных притоках реки искусственных резервуаров помогло разрешить проблему борьбы с наводнениями на значительной территории — практически по всему бассейну р. Теннесси вплоть до впадения ее в Миссисипи.

В апреле 1977 г. всего лишь за 30 часов в западной части Аппалачей выпало почти 400 мм дождевых осадков, что вдвое превысило ожидаемый максимум. Хотя в долинах притоков рек Теннесси и Огайо возникли довольно сильные паводки, при отсутствии плотин уровень воды ниже по течению от тех мест, где были сооружены водохранилища, оказался бы на 4 м выше; это, безусловно, привело бы к более значительным опустошениям.

II. Пути сообщения. Благодаря подъему уровня воды, вызванному сооружением плотин, река Теннесси в своем нижнем течении стала открытой для судов большого водоизмещения. В результате новые промышленные центры в долине Теннесси оказались связанными с мощной водной артерией — рекой Миссисипи. Кроме того, появилась возможность использовать некоторые водохранилища как места отдыха.

III. Гидроэнергетика. Основной целью преобразования речной системы было стимулирование развития промышленности в долине Теннесси благодаря строительству гидроэнергетических объектов. В начале 1940-х годов этот район стал вторым крупнейшим производителем гидроэнергии в США, что позволило в годы второй мировой войны резко поднять здесь выработку алюминия, стали, фосфатов и химикалий.

IV. Помощь сельскому хозяйству. В результате выполненных работ снизился ущерб, наносимый разрушительными наводнениями, и появилась возможность регулировать речной сток для более рационального применения ирригации.

Кроме того, эти преобразования способствовали обеспечению района энергетическими ресурсами. Перечисленные мероприятия в совокупности позволили осуществить возрождение земель, ранее бесплодных из-за почвенной эрозии, хищнической эксплуатации и явно недостаточного водоснабжения.

6.4. ПРИБРЕЖНЫЕ ЗОНЫ

Очевидно, что пляжи, дельты и эстуарии, т. е. те участки побережий, где «встречаются» море и суша, характеризуются относительной неустойчивостью, поскольку они подвергаются одновременному воздействию как эрозии, так и седиментации; кроме того, на них сказываются даже незначительные изменения уровня моря. После завершения плейстоценового оледенения колебания уровня Мирового океана были особенно частыми, о чем можно судить по многочисленным затопленным поселениям и оказавшимся на суше гаваням на различных участках европейских побережий. В связи с этим уместно вспомнить о гравюре с изображением так называемого Серапионова храма (точнее, храма Сераписа) вблизи Неаполя, которую английский естествоиспытатель Чарлз Лайелл использовал для фронтисписа издания своего капитального труда «Основы геологии», вышедшего в 1830 г. (см. обложку). Следы жизнедеятельности морских двустворчатых моллюсков на колоннах этого храма, наблюдаемые значительно выше их цоколей, свидетельствуют о том, что побережье вначале испытало погружение, а затем поднялось на высоту более 7 м.

Человек не может противостоять мощным природным процессам, совершающимся в течение многих тысячелетий. Но специалист-геолог обязан уметь прогнозировать геологические события и научиться разрешать трудные проблемы, стоящие перед человечеством.

6.4.1. ЗАЩИТА БЕРЕГОВ, СОХРАНЕНИЕ СУДОХОДНЫХ КАНАЛОВ

Вдоль берегов, подвергающихся абразии, море отнимает один за другим участки суши, подрывая береговые склады и размывая пляжи. Как правило, этим процессам сопутствуют оползни. Кратковременными защитными средствами против разрушающего воздействия морских волн и вдольбереговых течений, переносящих большие массы наносов, являются волноломы, волноотбойные стены и буны. Самой важной проблемой, однако, остается защита прибрежных низменных равнин от затопления во время штормов и необычно высоких приливов. Особо уязвимыми оказываются дельты крупных рек (например, дельта Ганга в Бангладеш), расположенные почти на уровне моря.

Если говорить о Северо-Западной Европе, то штормовое Северное море неоднократно затопляло прибрежные равнины Нидерландов и Восточной Англии. В результате возведения дамб и волноломов на протяжении столетий сформировались береговые линии,

конфигурация которых в значительной степени обусловлена деятельностью человека. В Нидерландах защита побережий в течение веков сочеталась с широкомасштабным восстановлением ранее затопленных участков суши. В Великобритании последнее катастрофическое наводнение произошло в 1953 г. во время шторма на Северном море. Впоследствии были разработаны проекты защиты Лондона, часть территории которого (около 50 км^2) лежит ниже возможного уровня воды, поднимаемого ветронагонными приливными течениями. Эти проекты сводятся в основном к сооружению бара, способного оградить эстуарий Темзы.

Абразионные процессы сопровождаются осадконакоплением в реках, эстуариях и в защищенных от разрушительного действия волн узких заливах. Это приводит к заиливанию гаваней, бухт и каналов, которые приходится неоднократно прочищать с помощью драг и землечерпалок, чтобы сохранить их пригодными для судоходства.

6.4.2. ВОССТАНОВЛЕНИЕ ПРИБРЕЖНЫХ ЗЕМЕЛЬ

Для того чтобы отвоевать хотя бы небольшие участки земли у моря, приходится осушать прибрежные заболоченные районы —

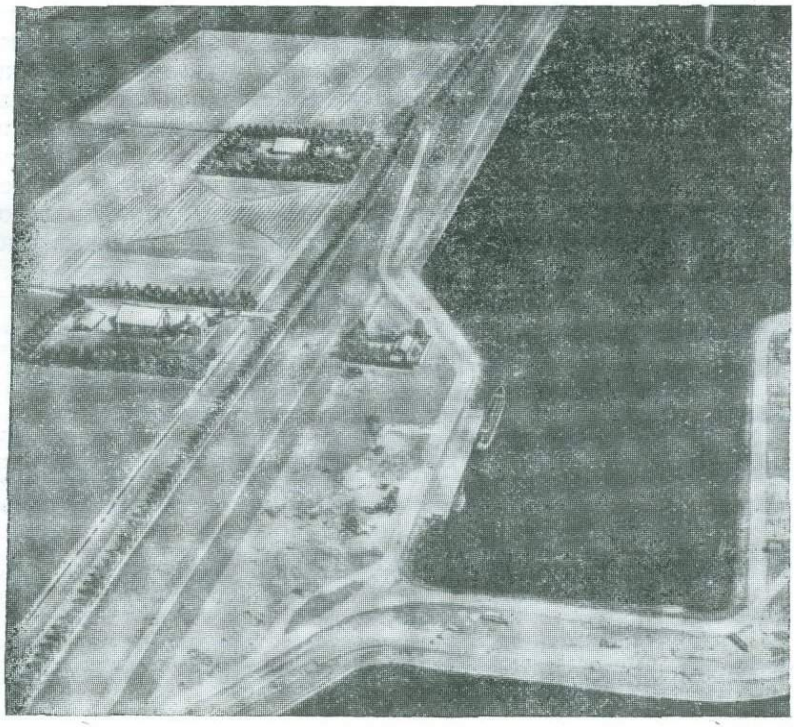


Рис. 6.11. Освоение отвоеванных у моря земель. Польдер «Северо-Восточный» в Нидерландах (аэрофотоснимок).

Рис. 6.12. Контроль над наводнениями, регулирование каналов и сооружение противоштормовых баров в устье Шельды и Рейна (Нидерланды).

1 — участки побережья, расположенные преимущественно ниже уровня моря; *2* — бары, сооружаемые или проектируемые; *3* — польдеры.

лагуны и эстуарии, отгороженные природными или искусственными насыпями, предохраняющими их от вторжения прибойных волн и морских течений. На британском побережье отторжение у моря пригодных для обработки земель осуществлялось в довольно скромных масштабах (например, в районе залива Уош). В Нидерландах на протяжении более 600 лет выполняются значительно более обширные работы по восстановлению заливаемой морем суши. Они включают последовательное огораживание польдеров* защитными дамбами, осушение их и удаление соляных отложений (рис. 6.11). В 1980-х годах осуществляется программа дренирования земель в пределах дельтового комплекса, включающего многочисленные острова и протоки в устьях Рейна и Шельды (рис. 6.12). Следует хотя бы в самых общих чертах ознакомиться с этими планами, чтобы представить себе те трудности, с которыми сталкиваются специалисты при широкомасштабных преобразованиях абрадируемой суши.

Глина, песок и торф аккумулируются в дельтах Шельды и Рейна начиная с позднего неогена вплоть до настоящего времени, скапливаясь в лагунах и маршах, с внутренней стороны вдольбереговых дюн. Плейстоценовые — голоценовые осадки такого типа мощностью несколько десятков метров поставляют хороший материал для строительства инженерно-геологических сооружений. На протяжении нескольких столетий в результате возведения бун и ограждения дамбами устьев узких протоков («криков») идет постепенное сращивание островов, сглаживание их внешних очертаний. Осушение польдеров при этом дает возможность использовать для сельского хозяйства значительную часть новообразованной суши.

Периодические вторжения вод Северного моря, причиняющие значительный ущерб, заставили надстроить и укрепить защитные сооружения на флангах сохранившихся приливно-отливных каналов. После больших разрушений, вызванных известным штормом 1953 г., был разработан проект, по которому море должно отступить с большей части этой территории. Для этого устья почти всех проток должны быть перекрыты дамбами, расположенными согласно общему простиранию полосы вдольбереговых дюн. С осуществлением указанного проекта

* Польдеры — искусственно осушаемые марши (участки земель, часто лежащие ниже уровня моря), отгораживаемые от открытого бассейна с последующей передачей под обработку.

воды Рейна и других рек, распределяющиеся по многочисленным извилистым протокам и рукавам, будут поступать в море по нескольким строго регулируемым каналам, таким как «Новый водный путь» или Западно-Шельдский. Эти каналы должны открыть доступ к Роттердаму, крупнейшему морскому порту Европы, и через бельгийскую границу — к Антверпену.

Как изменятся вследствие указанных преобразований геологические условия этого района, площадь которого превышает 1000 км², покажет будущее. Значительное упрощение очертаний береговой линии (протяженность которой будет сокращена на 600 км) может вызвать морскую абразию и ускорить осадконакопление вдоль внешней зоны баров. Поступление речных вод через несколько спрямленных каналов должно сказаться как на отложении речных наносов, так и на результатах дренирования суши. Наконец, превращение солоноватоводных проток и лагун в пресноводные водоемы и предотвращение подъемов и спадов уровня воды должны повлиять на режим грунтовых вод. Таким образом, расширение территории возделываемых прибрежных земель, продиктованное социальными причинами, может, судя по всему, привести к дальнейшим нарушениям природного равновесия.

6.5. РЕСУРСЫ ДНА МИРОВОГО ОКЕАНА

До недавнего времени изученность океанической коры была явно недостаточной для реальной оценки потенциальных ресурсов, скрытых в глубинах Мирового океана. В результате проведенных за последние десятилетия исследований с использованием геофизических методов, глубоководного бурения, а также отбора образцов донного грунта (при помощи драг, дночерпателей, грунтовых трубок) удалось установить, что морские бассейны содержат промышленно значимые скопления горючих и рудных ископаемых. Возможность использования ресурсов Мирового океана зависит, с одной стороны, от негеологических аспектов деятельности человека — от совершенствования морского законодательства (морского права) и развития технологии инженерно-строительных работ в глубоководных условиях, а с другой — от результатов поисков и разведки полезных ископаемых на дне морей и океанов.

Право собственности на полезные ископаемые, находящиеся на морском дне либо под его поверхностью, является предметом юридических споров в течение десятилетий. Прежде всего приходится считаться с многовековой традицией, согласно которой морские пространства за пределами территориальных вод могут использоваться в своих целях кем угодно. Немаловажным дополнением к этому неписаному закону служит то обстоятельство, что границы территориальных вод до сих пор зачастую не являются общепризнанными. Наряду с возможностью свободного пользования открытым морем за государствами, имеющими морские границы, сохраняется право эксплуатации ресурсов примыкающих к его территории участков континентального шельфа. Переговоры под эгидой ООН, касающиеся собственно морских бассейнов, ко вре-

мени завершения этой книги еще не привели к заключению правового соглашения, которое могло бы послужить основой для разрешения тех или иных споров.

Очень высокая стоимость глубоководных исследований определяет первоочередность поисков и разведки месторождений либо очень крупных, либо содержащих высокоценное сырье. В настоящее время следует сконцентрировать внимание на наиболее важном сырье — на скоплениях нефти и газа в мощных осадочных толщах, приуроченных к континентальным окраинам или к микроконтинентам, а также на металлоносных осадках и марганцевых конкрециях с высокими концентрациями никеля, цинка, меди и других металлов.

В процессе разведки таких месторождений часто приходится модифицировать общепринятые стандартные методы; особенно это относится к подводным исследованиям на глубинах порядка 5 км. Первым необходимым условием является наличие специально оборудованных судов, способных неподвижно стоять над участком проведения разведочных работ. Практическое изучение пород и геологических структур на морском дне с помощью водолазов ограничено сравнительно небольшими глубинами. Применение на более значительных глубинах погружных камер обеспечивает непосредственное, хотя и несколько одностороннее ознакомление с изучаемыми объектами, а сканирующий сонар дает достаточно полное представление о рельефе морского дна. Драгирование и глубоководное бурение обеспечивают получение грунта для последующего изучения его состава посредством геохимических и петрографических анализов. Геофизические методы исследований дают информацию о глубинном строении океанической коры (см. главу 8). Благодаря методике, разработанной в рамках международного проекта глубоководного бурения, обычная разведка на нефть и газ может проводиться при глубине моря 3—4 км.

Размещение промышленно ценных залежей углеводородов определяется наличием достаточно мощных осадочных толщ, содержащих зрелое сапропелевое органическое вещество, прошедшее соответствующие стадии катагенетического преобразования. Из рис. 6.13 видно, что глубоководное океаническое ложе в основном покрыто лишь тонким слоем осадков. Мощные морские отложения, являющиеся возможными объектами поисков нефти и газа, приурочены главным образом к стабильным континентальным окраинам, а также к узким структурным элементам, например желобам.

Разработка нефтяных месторождений в условиях очень больших глубин невозможна с платформ, неподвижно закрепленных на морском дне; по-видимому, при этом наиболее целесообразно применять плавучие платформы. При добыче марганцевых конкреций возникают дополнительные трудности, поскольку они выстилают участки морского дна в виде слоя толщиной в одну-две конкреции; к тому же, чтобы разработка этих донных осадков была рентабельной, сборы конкреций должны проводиться на значительной площади.

Существует еще ряд обязательных условий: во-первых, среднее содержание конкреций на морском дне должно быть не меньше 10 кг/м^2 при концентрации

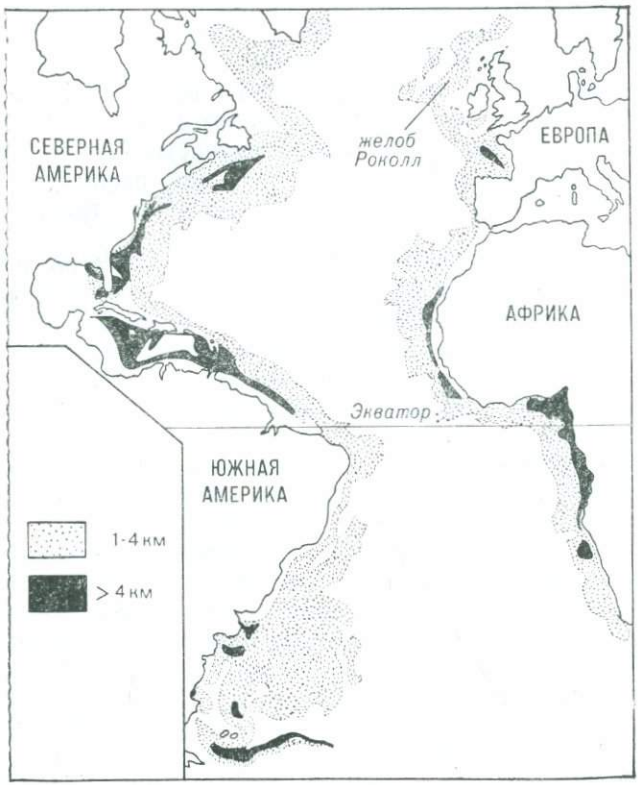


Рис. 6.13. Мощность океанических осадков на дне Атлантического океана.

Видно расположение мощных осадочных толщ, к которым могут быть приурочены потенциальные ресурсы углеводородов.

в них 2—3% никеля и меди (в совокупности); во-вторых, климатические условия должны обеспечивать приблизительно 300 рабочих дней в году. Таким условиям отвечают различные районы Тихого океана у побережий Центральной и Южной Америки. Сбор конкреций может осуществляться либо механическим способом — с применением прочных ковшей или дночерпателей, закрепленных на тросе между двумя движущимися параллельно судами, либо при помощи гидравлических установок.

6.6. ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ГОРНЫХ ПОРОД

Представляется несомненным, что наиболее важное значение для специалистов по инженерной геологии имеют те физические свойства горных пород, которые определяют их поведение в поверхностных или близповерхностных условиях. Главными свойствами природных материалов, используемых в качестве оснований

для различных зданий, дорог, плотин, дамб и других сооружений, являются проницаемость, прочность, сжимаемость и химическая устойчивость. При выборе подходящих мест для строительства тех или иных объектов необходимо учитывать все перечисленные свойства, измеряя их на образцах в лаборатории, а также проводя необходимые технические испытания на месте. Цель испытаний — обнаружить такие местные недостатки, как неоднородность или нарушение сплошности материала, наличие трещин, разрывов и т. д.

Особенности поверхностных отложений (согласно инженерно-геологической терминологии — «наносов») изучает механика грунтов, или грунтоведение. Размером зерен или обломков рыхлых материалов, их сортированностью и текстурой определяются проницаемость грунтов, их устойчивость под действием вертикальной нагрузки и сопротивление сдвигу. Как известно, гравий, галька и всякие пески находят широкое применение в различных областях инженерно-строительных работ. Тонкозернистые алевриты, глины и органогенные осадки имеют более ограниченное применение, поскольку они в водной среде легко разбухают или растрескиваются. Бентонитовые глины, образовавшиеся из выветрелых вулканических пород, и некоторые глинистые минералы, в первую очередь монтмориллонит, характеризуются особенно значительным увеличением объема при увлажнении. Глины, залегающие на больших глубинах (переуплотненные), при снижении внешнего давления также подвержены разбуханию.

Физико-механические свойства и текстура уплотненных осадочных и кристаллических пород определяют их ценность как материалов для оснований плотин и других сооружений; эти свойства необходимо учитывать и при выборе мест для заложения карьеров, тоннелей и шахт. Изменения таких пород под воздействием различных нагрузок часто бывают менее значимыми, чем влияние их выветрелости и естественной трещиноватости. Сильновыветрелые и трещиноватые породы представляют потенциальную опасность не только по причине их недостаточной прочности и способности к быстрому разрушению, но и потому, что они могут служить проводниками грунтовых вод и тем самым вызывать наводнения в шахтах или тоннелях.

Важность проведения предварительных исследований на месте диктуется необходимостью установления типов горных пород и особенностей их трехмерной структуры. Детальное геологическое картирование территорий обычно сопровождается бурением мелких скважин, сейсмо- и электроразведкой. Эти методы предназначены для определения глубины залегания коренных пород, мощности выветрелого покрова и т. д. Например, основу участка, где сооружается плотина, должны составлять крепкие монолитные породы, не содержащие прослоев и включений, менее устойчивых разновидностей или зон сильной трещиноватости. В этих толщах не должно быть угловых несогласий, размывов и других нарушений сплошности, которые могли бы способствовать образованию

оползней. При проходке шахт и тоннелей выемка грунта в зонах рыхлых или трещиноватых пород сопряжена с определенной опасностью. В этих случаях нужно использовать надежное крепление.

7. ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ С БИОСФЕРОЙ

7.1. ГЕОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ В БИОСФЕРЕ

Поверхностная, химически активная зона Земли, в пределах которой твердые породы взаимодействуют с водной и воздушной оболочками планеты, является естественной средой обитания почти всех форм жизни. В этой среде — биосфере — активная жизнедеятельность животных и растительных организмов влияет на ход таких неорганических процессов, как эрозия, выветривание и осадконакопление, изменяя их в ту или другую сторону. Природное равновесие между сообществами животных и растений и средой их обитания является довольно неустойчивым, так как оно нарушается под влиянием климатических, геоморфологических и геологических условий, с одной стороны, и под воздействием эволюционных изменений органической жизни и миграции видов — с другой. Человек как доминирующий вид в большинстве регионов нашей планеты играет ведущую роль в биосфере не только потому, что его деятельность приводит к геологическим изменениям, но и вследствие своего непосредственного воздействия на развитие земной фауны и флоры.

В этой главе обсуждаются некоторые аспекты взаимосвязи между биологическими и геологическими процессами. Мы начнем с характеристики почвы — среды, в которой сосуществуют различные представители растительного мира. Изменения в распределении рассеянных элементов, одни из которых совершенно необходимы для жизни растений, животных и человека, а другие, наоборот, вредны, описаны в зависимости от степени их влияния на сельское хозяйство и здравоохранение. В связи с этим нам приходится учитывать возможную роль, которую играют горное дело и промышленность в перераспределении токсичных минералов и элементов. Кроме того, требует решения проблема размещения и обезвреживания различных отходов и отбросов.

7.2. ПОЧВЫ

7.2.1. СОСТАВ ПОЧВ

Почвы, представляющие собой исходное звено в обеспечении продуктами питания всех наземных живых организмов, образуются из выветрелых коренных пород или рыхлых поверхностных отло-

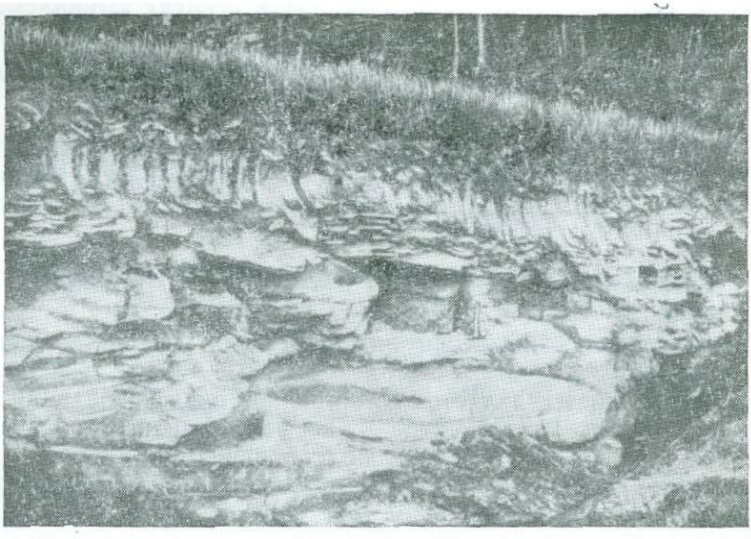


Рис. 7.1. Образование почвы. Формирование почвенного слоя in situ на коренных породах — известняках в Уорчестершире (Англия).

жений в результате их взаимодействия с атмосферным воздухом и водой и под влиянием жизнедеятельности растений, животных и микроорганизмов (рис. 7.1). Только одновременное наличие таких природных агентов, как кислород, вода и органические вещества, может обеспечить высокий уровень биологической активности почв.

Мощность сформировавшегося почвенного слоя, где все процессы находятся в состоянии относительного равновесия, может варьировать от нескольких сантиметров до нескольких метров. Цвет, структура и состав почвы определяются климатическими условиями, особенностями рельефа, составом материнских пород, и в свою очередь почвы определяют характер растительного покрова. Для почвенного профиля характерно наличие более или менее отчетливо выраженных зон по вертикали, однако совместное воздействие корней растений (скрепляющее) и роющих организмов (разрыхляющее) в той или иной степени изменяет структуру почвы, сохраняя ее тем не менее относительно массивной. Что касается состава почвы, то он определяется присутствием четырех главных компонентов: минеральной основы, органического вещества, воды и воздуха.

Минеральные компоненты почвы. Большинство минеральных компонентов поступает в почву в результате выветривания и разрушения материнской породы. Иногда содержание минеральной основы может возрастать за счет частиц, приносимых ветром или водными потоками. Минеральные компоненты, составляющие, как правило, около 50% объема почвы, представляют собой частицы песчаной, алевритовой и глинистой (пелитовой)

размерности. Структура и состав почвы зависят главным образом от количественных соотношений этих фракций.

Песчаные почвы — рыхлые, легкие, хорошо проницаемые, легко выщелачиваются. Глинистые почвы — тяжелые, вязкие в мокром состоянии и довольно твердые в сухом, слабопроницаемые, выщелачиваются медленно. Третья разновидность почв, для которой принят термин «пылеватые», развита большей частью на аллювиальных равнинах. В этих почвах песок, алеврит, ил и глина представлены приблизительно в равных количествах; они легкие, плодородные и хорошо поддаются обработке. Структура почв на возделанных землях изменяется после вспашки, в результате чего в почвах повышается пористость. Добавка гумуса и удобрений также изменяет структуру почвы.

Тип почвы в основном зависит от состава материнской породы, на которой почва развивается, хотя на эволюции почвенного слоя сказываются также и климатические условия. Например, граниты, песчаники и богатые кварцем метаморфические породы образуют, как правило, тощие песчаные почвы, в то время как на глинистых отложениях, а также на лавах среднего и основного состава формируются более тонкозернистые и более плодородные почвы. Известняки в природных условиях легко подвергаются растворению; в этом по существу и заключается химическое выветривание данных пород. При их разрушении образуется небольшой объем почвы, а в ряде случаев от значительной массы известняка остается лишь маломощный слой глинистых почв, сформировавшийся из содержащихся в известняках терригенных примесей. В процессе разрушения ультраосновных пород и над рудными месторождениями возникают аномальные почвы, в которых концентрация отдельных металлов может достигать токсичного уровня.

Плодородные аллювиальные илы, пополняемые из отложений, приносимых ежегодными паводками, служили основой для расцвета древних цивилизаций в дельте Нила и на Среднем Востоке. Тонкозернистый, слабоизвестковистый перигляциальный лёсс также формирует плодородные почвы; они широко распространены в некоторых областях Китая.

Необходимые для развития растений элементы, содержащиеся в минеральной части почв, могут быть усвоены корнями растений только после того, как эти элементы поступят в почвенные воды. Глинистым минералам присуще свойство так называемого основного обмена; оно состоит в том, что эти минералы способны создавать свободные связи и вступать в химические реакции с различными катионами, образуя нестойкие соединения, в которых одни катионы могут замещаться другими, находящимися в растворе. Глинистые минералы, связанные с органическими молекулами, образуют отрицательно заряженные частицы (мицеллы), способные абсорбировать H^+, Ca^{2+}, K^+, Mo^{2+}, NH^+ и другие катионы. Обменные свойства почвы определяются количеством ионов, которые она способна удерживать. Бактерии могут служить катализаторами в некоторых обменных процессах.

Органические вещества. Продукты разрушения органических веществ, аккумулирующиеся в поверхностном слое почвы, перерабатываются организмами, которые питаются отбросами и падалью, и разлагаются в результате жизнедеятельности червей, бактерий и грибков. Таким путем происходит распад растительных и животных остатков на более простые органические

соединения и смешивание их с минеральными компонентами почвы, вследствие чего почва приобретает более темную окраску, а структура ее претерпевает ряд изменений. Органические компоненты почвы, составляющие несколько процентов от общей ее массы, получили общепринятое в настоящее время название «гумус».

В окислительной обстановке органические соединения распадаются в конце концов на воду и углекислый газ. Там, где почвы становятся анаэробными в результате слабого дренирования или слишком быстрого накопления гумуса, бактериальное разложение может оказаться заторможенным и распад на конечные продукты не завершается. В химически активной почвенной среде, особенно там, где органические вещества быстро аккумулируются и грунтовые воды становятся кислыми, такие металлы, как железо, марганец, кобальт, уран, ванадий, могут образовывать комплексные металлорганические соединения, достигая при этом иногда токсичных концентраций.

Роль грунтовых вод и воздуха. В высокопористых почвах вода и воздух составляют в совокупности около 50% их объема. Поскольку почвенный слой залегает, как правило, выше уровня грунтовых вод и не испытывает постоянного влагонасыщения, содержание воды в пустотах изменяется в зависимости от дождей и испарения. В районах умеренного выпадения дождей вода обычно проникает сквозь почвенный слой и поступает в более глубокие горизонты. Задержке влаги в почве способствует присутствие гумуса, а также ощутимых количеств тонкозернистой фракции, что повышает воздействие капиллярных сил. В засушливом же климате, где происходит сильное испарение влаги, почвенные воды под влиянием капиллярных сил могут подниматься вверх и испаряться, не принося практически никакой пользы.

Грунтовые воды выносят как анионы, так и катионы неорганических веществ, выделяющиеся в результате протекающих в почве реакций; в воду поступают также органические соединения, образующиеся в процессе разложения гумуса. Когда почва хорошо дренирована, кальций, щелочи и магний вымываются вниз — по направлению к зеркалу грунтовых вод, причем на мицеллах они замещаются ионами водорода. Процесс выщелачивания приводит к обеднению верхнего слоя почвы, который теряет элементы, необходимые для жизни растений.

В регионах с засушливым климатом поверхностное испарение может привести к накоплению карбонатов кальция, сульфатов и некоторых галоидов в высоких концентрациях, в результате чего почва становится неплодородной. После длительного испарения в почве могут появиться твердые корки. Их разновидности — калькреты или каличе — состоят главным образом из $CaCO_3$, силькреты (кремнистые корки) — из SiO_2. Показатель концентрации водородных ионов pH варьирует приблизительно от 3 в кислых почвах до 9 в известковых (pH=7 отвечает нейтральной среде). Значением pH определяется характер растительного покрова, способного развиваться на тех или иных почвах. Этот показатель можно прибли-

зительно оценить, используя такие индикаторы, как лакмус. Если почва оказывается слишком кислой или, наоборот, щелочной, в нее приходится добавлять нейтрализующие компоненты.

Почвенные пустоты, в которых отсутствует вода, обычно заполняются воздухом, непосредственно связанным с атмосферой. Почвенный воздух насыщен влагой, а количество в нем углекислого газа несколько более высокое, чем в атмосфере. Содержание кислорода в почвенном воздухе (около 20%), как правило, вполне достаточное, чтобы обеспечить полное разложение органических веществ и воспрепятствовать тем самым образованию избыточного количества гуминовых кислот, задерживающих процессы бактериального разложения. Почвы, обедненные кислородом, приобретают серую или черную окраску, неприятный запах и часто оказываются неплодородными (глеевые почвы). Быстрое накопление органического вещества в условиях дефицита кислорода приводит к образованию гуминовых кислот, к приостановлению бактериальной деятельности, накоплению торфа и, следовательно, в конечном счете к формированию угля.

Азот, составляющий почти 80% объема атмосферы и являющийся необходимым для жизни элементом, большинство растений не способны извлекать непосредственно из почвенного воздуха. Годный для обменных процессов азот в форме солей аммония NH_4, содержащихся в почвенных коллоидах, легко окисляется до нитратов (солей азотной кислоты) и, поскольку большинство нитратов растворимо, выносится в процессе выщелачивания. Благодаря тому что фиксирующие азот бактерии находятся в симбиозе с корнями бобовых растений, посадки этих растений используют для сохранения плодородия почвы.

7.2.2. ПОЧВЕННЫЙ ПРОФИЛЬ И ТИПЫ ПОЧВ

Почвенный профиль отражает изменения по вертикали в составе и структуре почвы. Самый верхний почвенный слой (зона *А*), часто выщелоченный, но обогащенный гумусом, резко отличается от подстилающего его слоя (зона *Б*), в котором минеральные компоненты почвы иногда являются переотложенными, и от нижележащего слоя зоны *В*, который постепенно переходит в неизмененные коренные породы.

Воздействие потоков грунтовых вод на развитие почвенного профиля зависит от типа почвы и климатических условий (табл. 7.1). Поэтому региональное распространение основных типов почв в общих чертах соответствует климатическим зонам. Менее значительные колебания типов почв обусловлены составом коренных пород и характером рельефа. В горных районах изменения климата по вертикали вызывают соответствующие вариации состава и структуры почвы. Локальные отклонения от нормы, связанные, например, с оползаниями почв или с небольшими задержками их дренирования, могут также заметно изменить развитие почвенного профиля.

Таблица 7.1. Типы почв в зависимости от климатических условий

Типы почв	Характеристика почв
Тундровые (субарктические)	Образуются в основном в районах многолетней мерзлоты. Характеризуются ограниченным водосбором и неустойчивостью дренажной системы, обусловленной летним оттаиванием почв в надмерзлотных слоях, что препятствует формированию хорошо развитого почвенного профиля. Почвы главным образом тонкозернистые, часто обводненные и анаэробные (глеевые). Флора угнетенная (преимущественно карликовые растения)
Подзолы (подзолистые)	Формируются в холодном влажном климате. Зона *А* сильно выщелочена, окрашена в белые и светло-серые тона; зона *Б* может содержать твердые корки с такими элементами, как железо, марганец, кобальт и т. д. Из-за низкого уровня средних температур процессы бактериального разложения замедленные; доминируют окислительные условия (в результате образования гуминовых кислот); идет аккумуляция торфа над зоной *А*. Флора представлена главным образом хвойными
Серо-бурые подзолы (бурые)	Формируются в умеренно влажных климатических условиях. В результате менее сильного выщелачивания, быстрее протекающих процессов бактериального разложения и перемешивания гумуса зона *А* в серо-бурых подзолах имеет более темную окраску и более плодородна, чем в подзолах. Флора — преимущественно смешанные леса
Черноземы (черноземные)	Формируются в условиях полувлажного (субгумидного) климата. Выщелачивание незначительное либо вообще отсутствует, что обусловлено небольшим количеством дождевых осадков. В зоне *Б* происходит образование карбонатов. Плодородные почвы имеют значительную мощность, но легко разрушаются почвенной эрозией. Флора — преимущественно луговая растительность, травяные покровы и т. д.
Пустынные	Формируются в условиях аридного (засушливого) климата. Почвы тонкозернистые с низким содержанием гумуса. В результате окислительных процессов почвы приобретают характерную красновато-бурую окраску; происходит засоление поверхностных слоев, местами образуются твердые (железистые или кремнистые) корки
Тропические и субтропические	Формируются в условиях жаркого влажного климата. В результате быстро протекающих процессов разложения и сильного выщелачивания образуется зона *А*, которая под воздействием обработки имеет тенденцию терять свое плодородие и может быть латеритизована. Флора — дождевые леса (тропические леса, произрастающие в районах с годовым объемом осадков не меньше 2500 мм; для них характерна пышная вечнозеленая растительность)

Климатический контроль формирования типов почв особенно ярко выражается в низменных регионах, и поэтому отнюдь не случайно, что общепринятая терминология принадлежит советским и американским специалистам. Как детально показано в табл. 7.1, такие резко неблагоприятные климаты, как арктический, пустынный или тропический, способствуют формированию бедных почв, которые быстро истощаются в результате интенсивной эксплуатации.

Наиболее продуктивные сельскохозяйственные зоны на земном шаре находятся в условиях умеренного и умеренно теплого климата, где развиты бурые подзолы (подзолистые почвы) и темноцветные черноземы. В этих почвах значительная скорость бактериального разложения и активный характер реакций с участием минеральных компонентов сами по себе обеспечивают образование достаточного количества питательных веществ. Для этих почв процесс выщелачивания в зоне *А* оказывается незначительным, а в зоне *Б* замедляется формирование твердых корок. Высокий уровень плодородия может поддерживаться внесением в почву удобрений, питательные вещества которых переходят в хорошо усвояемое растениями состояние при активном воздействии процветающих почвенных ценозов (сообществ).

7.3. ОБРАБОТКА И ОХРАНА ПОЧВ

7.3.1. УСТОЙЧИВОСТЬ ПОЧВЕННОГО РЕЖИМА

В зрелой почвенной системе живой растительный покров не только извлекает из подстилающего слоя питательные вещества, но и в свою очередь обогащает почву, благодаря чему поддерживается определенное равновесие. На этот естественный баланс воздействуют природные факторы — климатические и геологические, в том числе и некоторые отрицательные явления, но куда более разрушительными оказываются изменения, которые вызываются деятельностью человека. Для поддержания устойчивого почвенного режима приходится, во-первых, внимательно следить за сохранением стабильных физических свойств почвы и, во-вторых, обеспечивать ее необходимыми питательными веществами. Стабильность почвы определяется состоянием ее растительного покрова, благодаря которому частицы почвы соединяются, образуя достаточно плотный слой, способствующий замедлению оттока дождевых осадков. В пределах этого же целостного слоя идет образование гумуса, также удерживающего почвенную влагу.

Уничтожение растительного покрова, что может случиться в естественных условиях в результате засухи, наводнений или пожаров, обычно сопровождается ускорением оползания почвы вниз по склонам, а также развитием речной и ветровой эрозии. Чересчур интенсивный выпас (на подножном корму) домашнего скота, вырубка лесов и возделывание только злаковых культур приводят,

как правило, к обнажению почвенного слоя и в результате этого к эрозии почвы.

В северной части бассейна Миссисипи в 1960-х годах потери почвенной массы с культивируемых земель (что было установлено по количеству переносимого рекой осадочного материала) оказались почти на три порядка выше, чем на залесенных землях. Катастрофическая засуха в центральных районах США, получивших образное название «чаша пыли» («dust-bowl»), в годы депрессии (1933—1934 гг.) сопровождалась пылевыми бурями, буквально унесшими почвенный слой с пересохших полей. В результате этого природного бедствия на большей части штата Оклахома прекратилось производство пшеницы.

Эрозия (в широком смысле слова) охватывает обычно не только верхний плодородный почвенный слой, но также и выветрелую часть коренных пород, обнажающихся в результате разрушения почвы. В районах с полупустынным климатом, таким как на территории среднезападных штатов США, развеивание почвы сильными (до ураганных) ветрами сопровождается развитием оврагов и смыванием почвенной массы мощными ливневыми потоками. В конечном итоге образуются рассеченные оврагами бесплодные земли (с общепринятым названием «бедленд»), почти непригодные для сельского хозяйства.

Восстановление земель, разрушенных ветровой эрозией, и задержание перемещающихся песчаных дюн может быть осуществлено путем создания покрова из быстрорастущих видов растений, которые связывают частицы почвы и обеспечивают сохранение в ней влаги.

В горных районах потеря почвенного слоя в результате его смыва и оползания вниз по склонам ускоряется после уничтожения растительности. В Непале (Гималаи) эрозия почвы усиливалась в минувшее десятилетие параллельно с ростом населения. Более интенсивная вырубка леса на дрова и расширение площадей возделываемых земель (хотя и то и другое было необходимо для обеспечения потребностей растущего населения) ускорили разрушение верхнего плодородного слоя почвы, который в конечном итоге оказался вынесенным в Бенгальский залив. Традиционными способами предотвращения таких потерь в горных районах являются террасирование склонов и сооружение дренажных канав для удаления избытка воды (рис. 7.2).

7.3.2. УДОБРЕНИЯ

В результате производства сельскохозяйственной продукции (независимо от того, имели ли мы дело с хлебными злаками, сахарным тростником, лесоматериалами, шерстью или мясом) оказывается, что из года в год часть плодородного слоя почвы обедняется. В благополучных условиях плодородие почв может восполняться естественным путем, но чаще всего приходится добавлять в почву удобрения, чтобы компенсировать утраченные элементы почвенных комплексов и предотвратить обеднение почвы. С удобрениями в почву поступают такие необходимые для жизни растений элементы, как азот, калий, кальций, фосфор и сера (табл. 7.2). Органические удобрения, например навоз домашних животных, компост и морские водоросли, использовались практически с самых первых шагов земледелия.

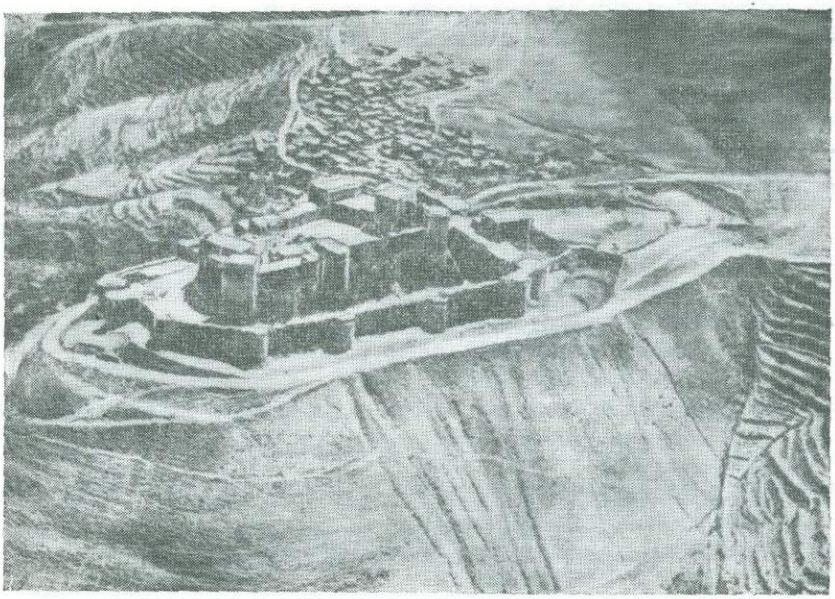


Рис. 7.2. Террасное земледелие на открытых склонах.

На аэрофотоснимке видны террасы, которые возделывались в древние времена. В верхней части снимка — замок крестоносцев Ле-Крак-де-Шевалье, Ливан.

Естественные неорганические удобрения получают из материнских горных пород, содержащих повышенные концентрации необходимых элементов. Такие породы встречаются довольно редко, и поэтому получение из них удобрений является весьма дорогостоящим процессом. Так, в середине 1970-х годов английские фермеры тратили приблизительно 300 млн. фунтов стерлингов ежегодно на обогащение почвы удобрениями, содержащими азот (основной питательный элемент), фосфор и калий.

После внесения удобрений в почву эффективность их действия определяется тем, как они включаются в естественную почвенную систему. Процессы выщелачивания приводят к удалению растворимых веществ из зоны *A*, куда вносятся удобрения. Нитраты, сульфаты, кальций и магний легко вымываются как из песчаных, так и из пылеватых почв, а натрий удаляется главным образом из песчаных почв. Фосфор может стать недоступным для корней растений вследствие выпадения в осадок и перехода в нерастворимое состояние либо в результате абсорбции его глинисто-гумусовыми частицами. Наконец, удобрения любого вида могут оказаться полностью удаленными в процессе эрозии почвы либо в результате смыва ливневыми потоками.

Потери питательных веществ, вызванные этими причинами, а также загрязнение почвы, обусловленное поступлением нитратов в дренажную систему, могут быть сведены до минимума при строгом соблюдении непременного условия: вносимое удобрение

Таблица 7.2. **Удобрения**

Основной питательный компонент	Источники
Азот (N)	Органические удобрения, в том числе навоз домашних животных, растительные остатки, морские водоросли, рыбная мука, кровяная мука; все эти вещества дают обменный азот. Азотофиксирующие бактерии в почвах либо в симбиозе с бобовыми растениями. Нитраты, неморские эвапориты Чили. Аммиак (NH_3) и его производные из продуктов переработки нефтяного сырья
Калий (K)	Органические удобрения, в первую очередь животного происхождения. Рапа, соли морских эвапоритов
Кальций (Ca)	Раковины моллюсков и других организмов, кости животных. Карбонатные породы, в том числе известняки, известковые туфы, калькреты (известковые корки)
Фосфор (P)	Костяная мука. Гуано (окаменевший помет морских птиц, накопившийся на океанических островах; к настоящему времени практически выработан). Суперфосфат, получаемый из фосфоритов. Побочные продукты из шлака, образующегося при выплавке стали
Сера (S)	Соляные купола (восстановление серы из гипса). Сульфиды железа

должно соответствовать типу почвы. Кроме того, необходимо выбирать наиболее благоприятное время для внесения удобрений, чтобы обеспечить возможно более быстрое их усвоение в периоды активного роста растений.

7.4. ГЕОХИМИЧЕСКИЕ ФАКТОРЫ В ЖИЗНИ РАСТЕНИЙ, ЖИВОТНЫХ И ЧЕЛОВЕКА

7.4.1. ИСТОЧНИКИ ПОЛЕЗНЫХ И ВРЕДНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

Почти все химические элементы, представленные на поверхности Земли, встречаются в очень незначительных концентрациях, отмечаемых как «следы». Содержание любых элементов в тканях растений или животных не находится, однако, в прямой зависимости от их количества в горных породах, поскольку метаболические (обменные) процессы в органическом мире протекают избирательно. Многие рассеянные элементы играют важную роль катализаторов при одном или нескольких биологических процес-

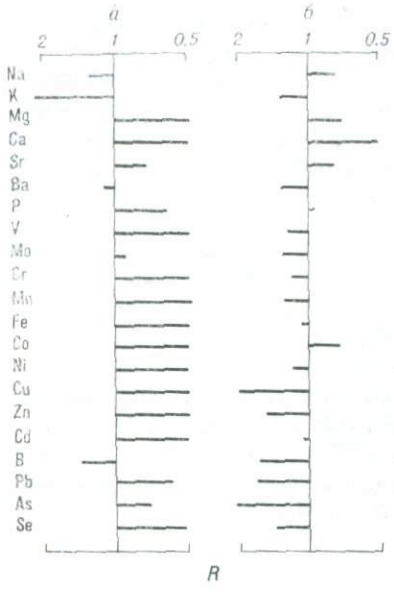


Рис. 7.3. Зависимость состава почв от материнских пород (Шотландия) (по данным Т. С. Уэста [1981 г.]).

Почвы, сформированные: *а* — на гранитах, *б* — на слюдистых сланцах (метаморфизованных глинистых породах).
R — отношение содержания химических элементов в исследуемой почве к осредненному по 10 типам коренных пород.

сах и в силу этого являются полезными для здоровья животных и человека. Многие элементы, в том числе некоторые из тех основных, которые необходимы для жизни растительных и животных организмов, при возрастании их концентрации выше определенного предела становятся токсичными. В естественных условиях популяции растений и животных получают питание непосредственно из почвы, воды и воздуха (либо через короткую пищевую цепь) на ограниченной площади. Недостаточно высокое (или слишком высокое — токсичное) содержание элементов может быть связано в пределах таких территорий с геохимическими аномалиями в почвах и грунтовых водах.

В тех районах, где производят сельскохозяйственные культуры и разводят домашний скот, в условиях, когда необходимо использовать удобрения и подкормку животных, взаимосвязь с геохимической обстановкой поверхностного слоя почвы устанавливается без особого труда. Это наблюдается в большинстве поселений человека. Для целого ряда заболеваний, вызванных недостатком либо избытком тех или иных элементов, отмечена региональная изменчивость частоты их встречаемости. Это, по-видимому, определяется различным содержанием соответствующих элементов в природной среде.

Состав почв и вод варьирует в различных регионах в зависимости от климата, которым определяется тип выветривания; локально такие изменения бывают обусловлены составом коренных пород. С ролью коренных пород мы можем ознакомиться на рис. 7.3, где сопоставляется относительная встречаемость некоторых важных рассеянных элементов в почвах, развившихся на гранитах и на глинистых породах Шотландии. Такие естественные изменения подвергаются различным колебаниям под влиянием человеческой деятельности. Внесение удобрений для пополнения дефицита питательных веществ не только изменяет состав почвы, но и загрязняет поверхностные и грунтовые воды.

Разработка угольных и рудных месторождений и добыча неметаллического сырья приводят к накоплению отвалов пустой породы, из которых в процессе выветривания и выщелачивания вы-

деляется целый ряд элементов в очень высоких концентрациях, поступающих в почвы, русловые отложения и грунтовые воды. Сходные процессы имеют место на промышленных и бытовых свалках. На литейных заводах, очистных и других предприятиях образуются отходы, которые рассеиваются и распространяются в виде дымов, газов и сточных вод. Наконец, процессы ядерного распада при наземных испытаниях атомного оружия приводят к выделению радиоизотопов в атмосферу. Повышенные концентрации вредных веществ, поступающих в результате человеческой деятельности, накладываются на природные аномалии (обусловленные геологическими факторами) и взаимодействуют с ними.

В числе элементов, присутствие которых необходимо для жизни растений, животных и человека, могут быть названы:

а) главные элементы — C, H, O, N, S, Ca, P, K, Na, Cl, Mg;

б) рассеянные элементы — Fe, I, Cu, Mn, Zn, Co, Mo, Se, Cr, B.

К числу элементов, токсичных при аномально высоких концентрациях, относятся мышьяк, кадмий, ртуть, свинец, селен, а также уран и некоторые другие радиоактивные элементы.

7.4.2. ВЛИЯНИЕ ГЕОХИМИЧЕСКИХ АНОМАЛИЙ НА СЕЛЬСКОЕ ХОЗЯЙСТВО И ЗДРАВООХРАНЕНИЕ

О многовековой осведомленности людей относительно важной роли некоторых элементов в сохранении здоровья человека говорит тот известный факт, что древние греки при лечении анемии использовали питьевую воду, в которую заблаговременно погружали ржавый меч (так как железо необходимо человеку для синтеза гемоглобина в крови). Только теперь нам удается выяснить, сколь разнообразны рассеянные элементы, участвующие в обменных процессах растительных и животных организмов, хотя пути поступления их туда остаются до сих пор не вполне изученными. В табл. 7.3 детально показаны как дефицитные (аномально низкие), так и токсичные концентрации, обусловленные значительными колебаниями в содержаниях рассеянных элементов, что в свою очередь частично определяется геохимической обстановкой.

Сложность биогеохимических процессов, контролирующих поглощение полезных или токсичных элементов, может быть проиллюстрирована тремя примерами.

1. Для синтеза витамина B_{12} в животных организмах необходимо присутствие кобальта. Недостаток содержания этого элемента пагубно отражается на здоровье животных; при умеренном (субклиническом) течении заболевания оно приводит к замедлению их роста, а в случае обострения дело доходит до истощения и мышечной дистрофии. Кобальт, задерживающийся в почве, будучи связан с глинисто-гумусовыми частицами, сравнительно медленно поглощается корнями растений.

Скот, выращенный на плохо орошаемых низкокачественных пастбищах Малайзии, не обнаруживал никаких признаков, свидетельствующих о недостатке кобальта. Но именно после того, как качество пастбищ было повышено путем насаждения быстрорастущих видов растений, у животных стали замечаться признаки кобальтовой недостаточности. В этом случае оказалось, что более высо-

Таблица 7.3. **Рассеянные химические элементы и их влияние на здоровье человека и животных**

Элементы	Воздействие элементов	Источники и районы
	Пониженные концентрации	
Кобальт (Co)	Исхудание и анемия домашних животных	Почвы, формирующиеся на кислых изверженных породах, песчаниках, известняках
Медь (Cu)	Истощение, задержка полового созревания пастбищных домашних животных	Те же условия, что и для кобальта, а также почвы, обогащенные молибденом
Иод (I)	Зоб (базедова болезнь) — нарушение нормальных функций щитовидной железы у человека и домашних животных	Районы, подвергавшиеся оледенению (Альпы, Пиренеи, Гималаи, Анды). Дефицит иода в почвах большей частью обусловлен низким уровнем его концентрации в водах
Железо (Fe)	Анемия, связанная с недостаточным синтезом гемоглобина	У человека дефицит железа может быть обусловлен диетическими ограничениями или некоторыми физиологическими факторами
Селен (Se)	Мышечная дистрофия у ягнят, вялость сердечной мышцы у человека	Песчаные или сильно выщелоченные почвы, иногда черноземы; центральные районы США, провинция Сычуань (Китай), Новая Зеландия
	Повышенные (токсичные) концентрации	
Мышьяк (As)	Избыток мышьяка ведет к задержке роста растений; очень высокие концентрации оказываются смертельными для животных	Почвы, загрязненные в результате выщелачивания сульфидных рудных тел и рудных отвалов или зараженные жидкими промышленными отходами. Случаи мышьякового отравления могут иметь и другие причины
Кадмий (Cd)	Перерождение почек, распад костной ткани, цирроз печени	Те же условия, что и для мышьяка
Свинец (Pb)	Нарушение деятельности почек и нервной системы, задержка синтеза протеина в крови	Те же условия, что и для мышьяка, а также загрязнение мягкой воды промышленными отходами и продуктами сгорания бензина
Ртуть (Hg)	Нарушение деятельности центральной нервной системы (болезнь Минамата)	Те же условия, что и для мышьяка. Районы вблизи некоторых фумарол и вулканических жерл. В Японии (залив Минамата) заболевание связано с особенностями питания (основные продукты — морские водоросли, содержащие ртуть)

Продолжение табл. 7.3

Элементы	Воздействие элементов	Источники и районы
Молибден (Mo)		Подножный корм пастбищного скота, обедненный медью, чем обусловлено повышенное усвоение молибдена. Главным образом морские черные глинистые сланцы
Радиоактивные элементы	Заболевание некоторыми формами рака; возможны нарушения генетического кода организма	Продукты выщелачивания урановых залежей, эманации радона из радиоактивных материалов. Последствия ядерных взрывов
Селен (Se)	У крупного рогатого скота и лошадей — выпадение волос, хромота, истощение; в острой форме — болезни дыхательных путей, резкий упадок сил, коллапс	Морские черные глинистые сланцы

копроизводительные виды растений менее эффективно снабжали кобальтом пасущиеся стада, хотя почвенный слой не был в существенной мере обеднен этим элементом.

2. Недостаток меди, особенно часто обнаруживаемый в песчаных, кислых или известковых почвах (см. рис. 7.3), ведет к снижению урожайности зерновых культур и вызывает целый ряд заболеваний — от замедления роста и задержки полового созревания до серьезных органических нарушений и ранней смертности среди домашнего скота. Следует подчеркнуть, что признаки дефицита меди у животных часто отмечаются в районах, где ее содержание в почвах нормальное, но где высокие концентрации молибдена препятствуют усвоению меди. В Англии, в районах, «обедненных» медью из-за избытка молибдена, широко развиты толщи темноцветных сланцев каменноугольного и юрского возраста, содержащие довольно высокие концентрации молибдена. Добавление меди в пищу крупного рогатого скота способствует быстрому росту молодняка.

3. Свинец в высоких концентрациях вреден для здоровья человека, и, по-видимому, именно этот фактор обусловливает в некоторых случаях задержку умственного развития детей. Во многих районах с сульфидной минерализацией отмечаются аномально высокие содержания свинца в русловых осадках и почвах. В качестве примеров можно привести районы Мендип-Хиллс и Пеннинских гор, где выведенные на земную поверхность сульфидные руды свинцовых рудников долгое время подвергались выщелачиванию. В таких районах содержание свинца в русловых осадках на некоторых участках достигает 3% (при фоновых значениях 0,001—0,015%).

Кроме того, свинец может ассоциировать с другими токсичными элементами, такими как кадмий, медь, цинк и мышьяк. Усвоение этих элементов из растений (а для маленьких детей — путем непосредственного попадания земли в рот) в ряде районов приводит к случаям свинцового отравления. Однако более частыми источниками заболеваний являются мягкая вода, в которой растворяется свинец, поступающий из старых свинцовых водопроводных труб, а также свинцовые белила и выхлопные газы, образующиеся при сгорании бензина с примесью свинца. Ни один из этих источников заражения не связан с повышенными концентрациями свинца в почвах или в коренных породах.

7.5. МИНЕРАЛЫ, ПРИНОСЯЩИЕ ВРЕД ЗДОРОВЬЮ ЧЕЛОВЕКА

Заболевания людей, источником которых послужили не токсичные концентрации тех или иных элементов, а вдыхание мельчайших частиц некоторых минералов, были зарегистрированы среди обитателей нескольких местностей с аномальными условиями окружающей среды. Однако в значительно большей степени эти болезни распространены среди групп населения, связанных с промышленными процессами, где при обработке минералов неизбежно вдыхается минеральная пыль. Заболевания вызываются поступлением в организм пылинок диаметром меньше 10 мкм либо волоконец диаметром меньше 3 мкм в количествах, превышающих защитные реакции организма.

Как только такие частицы попадают в альвеолы (мельчайшие воздушные пузырьки) легких, они начинают стимулировать разрастание легочной ткани, что сопровождается разрывом капиллярных сосудов. В связи с этим способность альвеол усваивать кислород безнадежно снижается. Как следствие таких изменений, возникает опасность заболевания (через более или менее длительный период времени) туберкулезом либо раком легких или легочной плевры. Для этого достаточно засорения легких несколькими десятками граммов минеральных пылинок указанной выше размерности либо проникновения в легкие не более одного грамма волокнистых частичек.

В течение многих веков эти заболевания считались профессиональными среди шахтеров, а также каменщиков и каменотесов, работающих в каменоломнях и карьерах. Тяжелым недугом является силикоз, обусловленный попаданием в легкие частиц силикатной пыли. Заболевания, связанные с засорением легких минеральными волокнами, зарегистрированы в одной из сильно запыленных местностей Турции, где молодые вулканические породы, используемые в качестве стройматериалов, содержат волокнистые агрегаты цеолитов. Еще более широко распространен этот недуг среди людей, имеющих дело с добычей, обработкой или использованием асбеста.

Болезнь, получившая название «асбестозис», в основном обусловлена общением с двумя разновидностями минерала. Волокнистый серпентин-асбест (хризотил) образует волнистые, «вьющиеся» волокна, которые не проникают сквозь легочную ткань и в конечном счете разрушаются. Натриевые амфиболы крокидолит и амезит («голубой асбест») представляют собой более ровные, жесткие и прочные волоконца. Очевидно, поэтому лица, работающие с этими минералами, наиболее подвержены заболеванию злокачественными опухолями, проявляющимися у них спустя несколько лет после засорения легких волокнистой пылью.

Благодаря новым методам добычи и обработки минералов, а также улучшению вентиляции в шахтах случаи заболевания силикозом и прочими тяжелыми недугами стали более редкими. Что

же касается опасности, связанной с использованием «голубого асбеста», об этом стало известно только недавно; этот минерал, очевидно, придется заменить в будущем какими-то другими изолирующими материалами.

7.6. ЗАГРЯЗНЕНИЕ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ, ВОПРОСЫ РАЗМЕЩЕНИЯ ВРЕДНЫХ ОТХОДОВ

Побочные продукты человеческой деятельности — бытовые, сельскохозяйственные, промышленные, военные и т. д. — рассеиваются в воздухе, распространяются по земной поверхности, проникают в грунтовые воды, почвы и другие отложения, изменяя при этом естественное распределение элементов (рис. 7.4). Значительная часть таких отходов, хотя и не радует глаз, особого вреда не приносит. Большинство органических отбросов оказываются быстро обезвреженными благодаря бактериальному разложению и процессам окисления и могут быть вновь использованы для поддержания плодородия культивируемых земель.

При решении вопросов, связанных с обработкой и размещением отходов, нам приходится иметь в виду три вида этих образований: 1) очень громоздкие объекты, например отвалы пустой породы, составлявшей кровлю залежи и удаленной в процессе открытой разработки месторождения; 2) отходы, где в довольно высоких концентрациях представлены токсичные металлы или другие вредные соединения; 3) радиоактивные отходы.

Загрязнение окружающего нас пространства происходит потому, что в результате человеческой деятельности в естественную среду обитания поступают вредные вещества, вызывающие заболевания или же способные причинить ущерб экологическим системам в целом. Загрязнение воды при спуске неочищенных сточных вод на земную поверхность или в систему грунтовых вод является одним из наиболее серьезных видов нанесения ущерба окружающей среде, особенно в условиях городской жизни. Это в значительной степени способствует распространению болезней, которые переносятся через воду; в их числе следует назвать дизентерию, холеру и тиф.

Сооружение закрытых сточных систем, отводящих жидкие отбросы на перерабатывающие заводы, было, пожалуй, самой важной мерой, обеспечившей подъем общественного здравоохранения в Англии XIX века. В наше время менее половины населения развитых стран имеет доступ к безопасным, незагрязненным источникам воды, и поэтому строительство очистных систем все еще является насущной потребностью. Стандартные методы обработки воды, включающие такие процессы, как бактериальное разложение и окисление органических веществ, дают возможность возвращать жидкие конечные продукты переработки в реки уже в очищенном виде; их можно даже использовать для пополнения водных ресурсов, предназначенных для удовлетворения бытовых потребностей населения.

Рис. 7.4. Слив жидких промышленных отходов.

На аэрофотоснимке видно распространение жидких выбросов в морской воде у побережья Камберленда (Англия).

Однако этих методов обработки воды недостаточно, чтобы удалить из отходов некоторые синтетические соединения, такие как моющие препараты, проникающие в поверхностные дренажные системы. Твердые вещества, осаждающиеся в отстойниках, можно иногда использовать в качестве органических удобрений, но если они загрязнены тяжелыми металлами из промышленных стоков, то становятся непригодными для удобрения почвы и должны быть удалены. В конечном итоге бóльшая часть отходов, обработанных очистными заводами, сбрасывается в океан.

Поверхностные и грунтовые воды могут загрязняться также сельскохозяйственными стоками, растворимыми компонентами удобрений (особенно нитратами), растворами, которые насыщены металлами, выщелоченными из рудных штабелей, отвалов и промышленных свалок (рис. 7.5). В русловых наносах, отлагающихся ниже по течению от старых разработок либо индустриальных комплексов, могут присутствовать токсичные металлы в повышенных концентрациях и (или) радиоактивные элементы. Загрязнение окружающей среды можно показать на примере старых оловянных

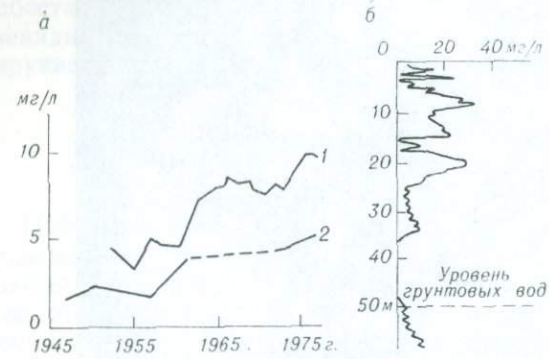


Рис. 7.5. Загрязнение грунтовых вод нитратами — отходами удобрений (по данным У. Б. Уилкинсона и Л. Э. Грина [1982 г.]).

а — повышение концентрации нитратов за период 1945—1975 гг. в водоносных слоях: *1* — триасовых песчаников в Уорчестершире, *2* — меловых горизонтов в графстве Суррей; *б* — изменение содержания нитратов с глубиной (октябрь 1975 г.) в меловых отложениях, подстилающих возделываемые земли в Гэмпшире (Англия).

рудников Корнуолла (Англия), где выявлено накопление тяжелых металлов в русловых наносах (табл. 7.4).

Загрязнение атмосферы в результате сгорания ископаемого топлива и выделения дымов различными фабриками, нефтеочистительными и плавильными заводами приводит к временному накоплению газов, капелек жидкости и твердых частичек в воздухе (с образованием общеизвестного «смога»). Спустя какое-то время эти вещества с дождями возвращаются на землю и загрязняют почвенный покров и грунтовые воды. С промышленной революцией ежегодные отложения сажи на территории таких городов, как Лондон, стали достигать 1 кг/м². Эти ошеломляющие показатели снизились довольно заметно за последние десятилетия благодаря вводу в действие законодательства, запрещающего использовать уголь в качестве топлива при открытом сжигании и отсутствии сажеулавливателей. Тем не менее до 12 г/м² серы продолжает оседать ежегодно на подветренной стороне различных объектов в индустриальных районах. Повинен в этом выделяющийся в атмосферу сернистый ангидрид (содержание серы составляет в среднем около 1,5% в угле и 3% в нефти). Сернистый ангидрид, окисляясь до сульфата, возвращается на землю в виде «кислых дождей», что вызывает разрушение каменных кладок, не говоря уже об ущербе, наносимом растительности, речной и озерной фауне.

Отходы плавильных и других заводов, особенно в XIX и в начале XX столетия, содержали целый ряд токсичных металлов, что в свою очередь сказалось на почвах и русловых осадках, где с подветренной стороны ряда предприятий обнаружены аномально высокие концентрации этих металлов (рис. 7.6). Такие аномалии были выявлены вблизи цинкоплавильных заводов в Южном Уэльсе и Авоншире (Бристольский залив). Еще более ярко выражены эти явления в районе известного никелевого месторождения Садбери (Канада), где наблюдается почернение горных пород на земной поверхности, а деревья, растущие в округе, имеют карликовый рост.

Таблица 7.4. **Содержание металлов (ppm) в русловых осадках водотоков, обусловленное рудной минерализацией и разработкой месторождений**

Районы	As	Cd	Co	Cu	Pb	Zn
Англия и Уэльс (модальные значения)	7—15	0—1	10—20	15—30	0—40	50—200
Редрут, Корнуолл (максимальные значения)	>150	>5	>80	>120	>320	>800

Рис. 7.6. Влияние атмосферных загрязнений на состояние земной поверхности. Загрязнение почвы, поверхностных вод и растительного покрова в результате выбросов промышленных отходов в атмосферу (по данным П. Литтла и М. Х. Мартина [1974 г.]).

Показана концентрация кадмия (ppm) в сфагнуме торфяных болот на подветренной стороне промышленного комплекса Эйвонмут в течение 1972 г., когда преобладали ветры юго-западного направления.

Чтобы ограничить загрязнение воды и воздуха в процессе промышленного производства, совершенно необходимо как можно быстрее уничтожать или обезвреживать токсичные вещества в непосредственной близости от места их образования. Максимально допустимые уровни выхода вредных веществ во многих странах определены специальным законодательством. В Великобритании применение этих законов на практике руководствуется идеей о «лучшем практическом мероприятии»: преследуется цель ограничить загрязнение окружающей среды на уровне, позволяющем удовлетворить интересы общества в целом.

Вопрос об удалении радиоактивных отходов, образующихся на атомных электростанциях, является особенно трудноразрешимым. Здесь мы имеем дело с опасностью заражения природной среды радиоизотопами, само присутствие которых в ней носит аномальный характер. В отходы поступают переработанные материалы из атомных реакторов, обладающие высокой радиоактивностью, что обусловлено короткоживущими изотопами с периодами полураспада до нескольких лет. В результате распада этих соединений образуется значительно менее радиоактивный остаток. Так, например, отработанное ядерное топливо, удаленное из Канадского реактора с первоначальной радиоактивностью 2 млн. кюри, через 10 лет имело остаточную радиоактивность всего 1600 кюри. В этих отходах содержались и долгоживущие изотопы, такие как иод-129, цезий-135 и нептуний-237, с периодами полураспада до 1 млн. лет.

Вначале, когда отходы обладают максимальной радиоактивностью, их хранят над земной поверхностью в изолированных антикоррозионных контейнерах. Поскольку необходимо создать такие условия, чтобы радиоактивные отходы были изолированы от биосферы в течение по меньшей мере миллиона лет, возникли дискуссии о целесообразности использования некоторых подземных хранилищ. Чтобы воспрепятствовать участию захороненных радиоактивных отходов в естественных геологических процессах, надо совершенно обязательно свести до минимума обменные реакции внутри подземных контейнеров, а также между этими контейнерами и прилегающими горными породами или поровыми водами. В настоящее время обсуждается предложение о заключении радиоактивных отходов в стеклянные контейнеры или, что более интересно с геологической точки зрения, в контейнеры из синтетических, устойчивых к радиации минералов. Рассматриваются также возможности использования контейнеров из инертных металлов или корунда.

Для долговременного хранения радиоактивных отходов необходима соответствующая геологическая обстановка, при которой любые жидкости, оказавшиеся загрязненными, должны подниматься к земной поверхности очень медленно и в весьма разбавленном виде. Это обязательное условие навело на мысль использовать для захоронения отходов зону Беньофа, где по мере погружения коровой плиты отходы все глубже удалялись бы от земной поверхности. Учитывая еще некоторые другие соображения, следует выбирать тектонически стабильные участки (асейсмичные, с низким геотермическим градиентом). При этом вмещающие породы должны соответствовать следующим требованиям: быть либо крепкими и нетрещиноватыми (как, например, массивные граниты), либо непроницаемыми и пластичными (как глины или эвапориты).

Захоронение радиоактивных отходов на глубину более 1 км снижает возможность утечки радиации, так как проницаемость пород уменьшается с глубиной. Требование изоляции таких отходов на очень длительный срок, а также тот факт, что поведение содержащихся в них вредоносных элементов недостаточно хорошо изучено, весьма обостряют проблему консервации. Необходимость захоронения уже существующих отходов атомного сырья вынуждает продолжать исследования, невзирая на их высокую стоимость.

8. МЕТОДЫ ПОИСКОВО-РАЗВЕДОЧНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Эффективность применения геологических данных для практических целей, обсуждавшихся в главах 2—7 этой книги, определяется в основном целесообразностью выбора тех или иных методов исследований. В первую очередь необходимо обнаружить конкретный объект геологической разведки, например полезное ископаемое; во-вторых, нужно собрать соответствующую информацию о тех местах, где будут проводиться разведочные или строительные работы; в-третьих, следует учитывать потенциальную или уже имеющуюся опасность тех или иных геологических осложнений. На раннем этапе подобных исследований необходимо провести рекогносцировочные работы, благодаря которым для обширных территорий получают значительное количество сведений достаточно оперативно и при небольших финансовых затратах.

Детальное изучение конкретных объектов имеет целью обеспечить получение данных в таком объеме, чтобы они могли послужить основой для дальнейших разработок. В приводимой ниже информации автор попытался дать читателю общее представление о том, как именно используются общепринятые методы поисково-разведочных исследований. В книге не рассматриваются математические методы обработки данных, так же как и не разбираются детали практического применения той или иной методики — на эту тему существует много специальных публикаций.

Для успешного использования наук о Земле применительно к нуждам человека следует учитывать региональную и (или) ло-

Таблица 8.1. **Методы поисково-разведочных исследований**

Виды исследований	Основные области использования
	Геофизические методы
Сейсмические (МОВ, МПВ)	Выявление погребенных (подземных) структур, преимущественно в осадочных бассейнах; установление опорных *горизонтов, несогласий, складчатости, разрывных нарушений* на месторождениях полезных ископаемых; разведка поверхностных отложений под строительные объекты
Сейсмограммы (данные сейсмического зондирования)	Наблюдения в районах активной вулканической деятельности, зон разломов и т. д.
Гравиметрические	Выявление структур в осадочных, метаморфических толщах, в изверженных породах; на рекогносцировочной стадии поисков месторождений полезных ископаемых. Обнаружение аномалий, связанных с погребенными телами изверженных пород, рудными месторождениями, соляными куполами (ловушками для нефти и газа)
Магнитометрические	Изучение регионального строения толщ изверженных и метаморфических пород; на различных этапах поисков месторождений полезных ископаемых. Выявление аномалий, связанных с погребенными интрузивными очагами и рудными формациями
Электроразведочные и электромагнитные	Метод сопротивлений — для прослеживания рудных тел при изучении структур осадочных пород и в инженерной геологии. Эквипотенциальные и индукционные методы — для оконтуривания рудных тел. Электромагнитные методы — для определения положения рудных тел, обнаружения и регистрации подъема магматических расплавов из вулканических жерл
Радиометрические	При поисках радиоактивных элементов (урана, тория); при каротаже буровых скважин
	Дистанционные методы
Аэрофотосъемка	При изучении геологического строения исследуемых территорий (аэротопографическая съемка, аэрогеологические рекогносцировки). Наблюдения за потенциально опасными объектами, например вулканами. Аэровизуальный и аэрофотометрический контроль за изменениями окружающей среды
Космическая съемка	*Геологические, топографические и другие исследования*
	Исследования в скважинах
Глубокое бурение	Определение регионального строения и стратиграфии толщ. Анализ бурового шлама для литологической *характеристики пород; сборы микрофауны (в нефтеносных районах).* Детальные структурные и петрографические исследования керна скважин при поисках и разведке месторождений полезных ископаемых

Продолжение табл. 8.1

Виды исследований	Основные области использования
Мелкое и ручное бурение	Изучение покрова выветрелых наносов и поверхностных отложений. Выбор мест для инженерно-геологических объектов
	Геохимические и минералогические методы
Рекогносцировочные	Опробование русловых и озерных донных осадков, отбор гидрогеологических проб, рекогносцировочные маршруты в связи с поисками месторождений полезных ископаемых.
	Изучение окружающей среды, ее охрана (состояние растительного и животного мира, влияние среды на здоровье человека). Выявление концентраций тяжелых металлов
Целевые	Обнаружение месторождений полезных ископаемых; изучение и предотвращение возможных геологических осложнений и катастроф
Периодическое опробование	Контроль за качеством воды и очищенных стоков; изучение вредного воздействия загрязнений окружающей среды

кальную геологическую обстановку — всю совокупность факторов, определяющих закономерности распространения и геологические структуры пород в том или ином регионе, представляющем для нас интерес. Все данные, которые возможно получить на основании изучения опубликованных карт, отчетов и статей либо путем непосредственных наблюдений в полевых и(или) лабораторных условиях, могут быть отнесены к геологическим показателям.

Для обнаружения месторождений полезных ископаемых или для выявления геологических структур применяют соответствующую методику. Специфика ее определяется различными свойствами природного сырья или грунтов, что необходимо учитывать при поисково-разведочных работах и изучении мест заложения будущих сооружений. В табл. 8.1 приводится классификация различных методов поисково-разведочных исследований.

8.1. ГЕОФИЗИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ

Благодаря методам, основанным на различии физических свойств горных пород, нам удается получить информацию о горных породах и структурах, скрытых под поверхностью Земли и недоступных для непосредственного наблюдения. Эти методы находят широкое применение в нефтяной геологии, играют важную роль при разведке полезных ископаемых, а также используются во время предварительных исследований участков, отводимых под

строительство различных зданий и рудников. Геофизические методы, позволяющие регистрировать те или иные изменения в глубинах Земли, привлекаются и для прогнозирования потенциально опасных явлений, как природных, так и связанных с деятельностью человека.

8.1.1. СЕЙСМИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

Упругие волны, образующиеся при землетрясениях или в результате искусственных взрывов, распространяются в горных породах с различными скоростями в зависимости от состава и физических свойств пород. Скорость распространения сейсмических колебаний измеряется обычно в метрах (или километрах) в секунду. Сейсмические волны отражаются или преломляются на контактах различных пород, характеризующихся разными скоростями распространения сейсмических колебаний; при этом часть волн, отразившихся от геологических границ, возвращается на земную поверхность, где они регистрируются соответствующими приборами (сейсмоприемниками, геофонами).

Данные о скоростях распространения волн в породах, о глубине и наклоне поверхностей раздела между различными литологическими образованиями устанавливаются на основе учета времени прохождения импульсов от пункта взрыва до геофона или до нескольких геофонов (рис. 8.1). Сейсмический профиль строится по наблюдениям на целом ряде сейсмоприемников. Большинство сейсмических исследований связано с продольными P-волнами, относительно более быстрыми, чем поперечные S-волны.

При наземных сейсмических исследованиях источниками возбуждения упругих колебаний служат взрывчатые вещества либо механические ударные устройства — вибраторы. При неглубоком проникновении в толщу пород, например для определения мощности слоя аллювиальных или ледниковых наносов, залегающих на коренных породах в основании проектируемого моста или какого-либо другого сооружения, необходимые импульсы могут быть получены при помощи ударов молотом или кувалдой при расстоянии между источником и приемниками не более нескольких метров.

При необходимости более глубокого зондирования земных недр приходится использовать тяжелое, громоздкое при транспортировке оборудование. В связи с этим наземные сейсмические исследования оказываются дорогостоящими; так, стоимость 100-километрового сейсмопрофиля в Англии в начале 1980-х годов составляла несколько сотен тысяч фунтов стерлингов. Морские сейсмические исследования, где взрывы производят на поверхности моря, а сеть геофонов буксируют специальным судном, обходятся значительно дешевле.

Скорости распространения сейсмических волн различны в породах разных типов. Сейсморазведка используется для обнаружения поверхностей раздела между рыхлыми наносными отложениями и коренными породами, между осадочными и метаморфическими или изверженными породами либо (в некоторых случаях) между более и менее акустически жесткими границами осадочных пород. В связи с тем что сейсмические волны распространяются в воде со значительно более высокой скоростью, чем в воздухе, скорость их распространения в не насыщенных водой

Рис. 8.1. Сейсмические волны.

Показаны схематизированные траектории сейсмических волн, используемых при сейсмических исследованиях методами отраженных (МОВ) и преломленных волн (МПВ).

Скорость распространения продольных волн, м/с

Воздух	330
Вода	1450
Почвы, песок	170—800
Глинистые сланцы, песчаники, известняки	1500—4000
Метаморфические породы	>5000
Граниты	>5000

и водонасыщенных высокопористых породах также резко различна. Главное применение сейсмические исследования находят при поисках и разведке нефтяных месторождений и в инженерной геологии.

Метод отраженных волн (МОВ). Данный метод основан на использовании сейсмических волн, отражающихся от акустических границ подобно лучу света от зеркальной поверхности. Метод отраженных волн играет очень важную роль при проведении поисково-разведочных работ в осадочных бассейнах. На основе материалов МОВ, обработанных с привлечением соответствующих математических зависимостей, мы получаем информацию о мощности литолого-стратиграфических подразделений (каждому из которых свойственна определенная скорость сейсмических волн), о присутствии либо об отсутствии отчетливых поверхностей отражения (которые могут быть установлены и стратиграфическими методами по керну буровых скважин). Методом отраженных волн определяется также положение в разрезе стратиграфических перерывов или угловых несогласий, устанавливается наличие складок и разрывных нарушений.

Метод преломленных волн (МПВ). Метод основан на изучении сейсмических волн, преломляющихся на акустически жестких границах разных пород. Этот метод особенно полезен для обнаружения ловушек нефти и газа, таких как антиклинали или соляные купола. Природная сейсмичность изучается МПВ в пределах и вблизи зон активных разломов или вулканических очагов. Ценность этих наблюдений для прогнозирования возможных геологических катастроф (землетрясений или вулканических извержений) определяется возможностью непрерывного учета сейсмических толчков в течение длительных периодов времени. Сейсмографы, используемые для этой цели, усиливают импульсы, поступающие с поверхности Земли, и регистрируют полученную информацию.

8.1.2. ГРАВИМЕТРИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

Ускорение силы тяжести (ускорение свободного падения) g, измеренное в какой-либо определенной точке на земной поверхности, зависит не только от таких факторов, как широта, альтитуда (высотная отметка), топография местности, но и от геологи-

ческого строения региона. В результате гравиметрической съемки, охватывающей целый ряд объектов исследования, можно выявить аномалии силы тяжести, свойственные тем или иным горным породам. Тела относительно плотных пород характеризуются положительными аномалиями силы тяжести («пики» или максимумы на гравиметрических картах); породам сравнительно легким, т. е. обладающим небольшой плотностью, свойственны отрицательные аномалии (минимумы на этих картах). Интенсивность локальных аномалий может достигать 100 мгал (1 мгал $= 10^{-5}$ м/с^2).

Наземная гравиметрическая съемка обычно выполняется с небольшим шагом наблюдений и используется для обнаружения аномалий, источник которых расположен на незначительной глубине от земной поверхности. При морских и особенно аэрогравиметрических съемках выявляются аномалии более глубинной природы (на глубине по крайней мере 10 км). Результаты гравиметрических наблюдений обычно наносят на карты с учетом соответствующих поправок. Введением поправок за свободный воздух и промежуточный слой измеренные значения силы тяжести приводятся к уровню моря. Таким образом, гравиметрическая аномалия представляет собой разность наблюденных значений, приведенных к уровню моря, и так называемых нормальных значений, определяемых фигурой Земли.

Интерпретация гравиметрических данных базируется на изучении плотности пород; при этом могут использоваться ее средние значения (рис. 8.2) либо непосредственно измеренные на образцах. После того как установлены значения плотности пород, можно с помощью математических методов смоделировать размеры и форму всей изучаемой толщи, которая создает наблюденную аномалию. Благодаря периодическим гравиметрическим исследованиям в районах активных вулканических очагов можно обнаружить изменения, обусловленные подъемом магмы, еще до наступления самого извержения.

Гравиметрический метод применяется для изучения геологического строения осадочных бассейнов, а также метаморфических и изверженных пород. Гравитационные аномалии помогают установить форму и границы седиментационных бассейнов и местонахождение выступов фундамента, вблизи которых в структурах осадочной толщи могут быть обнаружены залежи углеводородов или руд. Например, региональное поднятие на континентальном шельфе к востоку от Шетландских островов оказалось подводным хребтом, разделяющим два потенциально нефтеносных бассейна.

Из приведенных выше данных ясно, что гравиразведка используется для изучения тех участков земной коры, где существует дифференциация пород по плотности. В связи с высокими значениями плотности рудных минералов рудные месторождения, как правило, характеризуются положительными гравитационными аномалиями. Гравиметрические исследования часто привлекают для детального изучения уже известных рудных месторождений, где измерения выполняют с малыми промежутками (метры — десятки метров). Магматические тела — интрузии, с которыми могут быть связаны рудные месторождения, представляют более крупные объекты гравиметрических исследований. Например, многие интрузии основного состава сопровождаются положительными гравитационными аномалиями; гранитным же телам присущи обычно отрицательные аномалии (см. рис. 8.2). Соляные купола (которые могут играть роль ловушек для углеводородов), как правило, дают хорошо выраженные отрицательные аномалии силы тяжести.

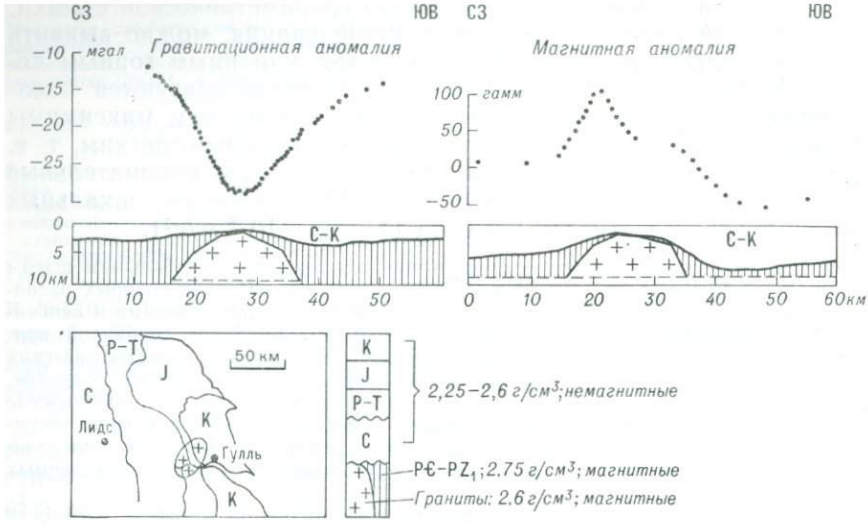


Рис. 8.2. Пример использования гравиметрических и магнитометрических исследований.

Отрицательная гравитационная аномалия и сложная магнитная аномалия указывают на присутствие гранитов, перекрытых чехлом несогласно залегающих на них отложений карбона—мела.

Плотность, г/см³

Вода	1
Песок	2
Осадочные породы	2,2—2,8
Галит, гипс	2,2—2,3
Метаморфические породы	2,6—3,0
Граниты	2,6
Основные и ультраосновные породы	2,8—3,3
Сульфиды металлов	>4,0

8.1.3. МАГНИТОМЕТРИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

Магнетит и другие магнитные минералы придают горным породам, в состав которых они входят, магнитные свойства, изменяющиеся в зависимости от состава, структуры, возраста и генезиса пород. Намагниченность пород описывается как модулем, так и направлением; направление отвечает положению того или иного объекта относительно древнего и современного магнитных полюсов Земли. Положительные и отрицательные магнитные аномалии выражаются в гаммах и изменяются обычно в пределах ± 1000 гамм *.

Обычная стрелка компаса, отклоняющаяся от своего направления на север вблизи выходов магнитных горных пород, использовалась еще в XVII столетии в Швеции в качестве прибора, предназначенного для поисков железной руды. В современных магнитометрах роль стрелки компаса играет магнитный прибор, чувствительный к самым незначительным изменениям магнитных свойств пород. Основное практическое применение магнитометры находят при изучении метаморфических и изверженных образо-

ваний, для которых магнитометрическая съемка дает достаточно детальную информацию о таких структурных элементах, как простирание пород, положение разломов или распространение интрузивных тел, глубина их залегания и т. д.

Морская магнитная съемка играет решающую роль в исследовании строения океанического дна, в том числе для прослеживания осей его разрастания и трансформных разломов. Все эти данные помогают выявлять перспективные участки, где возможно обнаружение месторождений полезных ископаемых; детальная наземная магнитная съемка позволяет непосредственно находить залежи железных и других руд. Результаты наблюдений (после внесения необходимых поправок) представляются в виде карт магнитного поля и могут быть использованы для моделирования морфологии геологических тел, с которыми связаны соответствующие аномалии (как это показано на рис. 8.2).

Основная ценность магнитометрических методов — это их свойство «видеть» сквозь покровы немагнитных либо слабонамагниченных осадочных толщ и обнаруживать представляющие интерес объекты в подстилающих породах. Например, докембрийские полосчатые железные руды Кривого Рога (Украина) создают 1000-километровую аномалию, благодаря чему они и были обнаружены под чехлом немагнитных фанерозойских отложений Русской платформы.

8.14. ЭЛЕКТРОРАЗВЕДОЧНЫЕ И ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ МЕТОДЫ

Целый ряд методов, связанных с поисками и разведкой полезных ископаемых, разработан благодаря способности пород проводить электрический ток и поддерживать разность электрических потенциалов (естественную либо индуцированную). При электроразведке методом сопротивлений электрический ток поступает от генератора в землю, проходя через два разнесенных электрода; при этом измеряют падение напряжения с помощью второй пары электродов. Изучение сопротивления горных пород по горизонтали и вертикали осуществляется смещением пары электродов измерительной линии в горизонтальной плоскости либо изменением разноса электродов питающей линии. Электроразведка методом вызванной поляризации основана на том свойстве, что разность потенциалов в породах, возникающая при включении соответствующей установки, не исчезает мгновенно после отключения тока. Это обусловлено тем, что на частицах пород — хороших проводников создаются электрические заряды.

Метод сопротивлений используется при разведке полезных ископаемых и в инженерной геологии. В основу метода положено низкое удельное сопротивление (или, иными словами, высокая электропроводимость) некоторых рудных минералов по сравнению с силикатами, а водонасыщенных пород — по сравнению с сухими.

---

* Магнитные аномалии принято измерять в нанотесла; 1 гамма соответствует 1 нТл.

При разведке рудных месторождений методы сопротивлений и вызванной поляризации, используемые для оконтуривания рудных тел, могут сочетаться с методом электромагнитного зондирования. В этих исследованиях применяются приборы, напоминающие детекторы металлов, которые служат для досмотра пассажиров и багажа в контрольных пунктах аэропортов. Электромагнитные волны, возбуждаемые прибором, индуцируют токи в проводниках, таких как сульфиды, что в свою очередь регистрируется датчиками детектора.

В инженерной геологии электроразведка применяется при исследовании неуплотненных образований, имеющих высокую пористость; содержащаяся в этих порах вода, особенно минерализованная, служит относительно хорошим проводником. Комплексный каротаж буровых скважин на нефтяных месторождениях обычно включает и метод сопротивлений, который позволяет установить наличие или отсутствие горизонтов пористых пород (особенно если они содержат рассолы).

8.1.5. РАДИОМЕТРИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

Радиоактивный распад таких широко распространенных в природе элементов, как уран, торий, калий, а также радиоизотопов, образующихся в реакторах, сопровождается выделением элементарных частиц, которые могут быть обнаружены соответствующими приборами. В любой заданной точке общую радиоактивность можно измерить самым обычным спектрометром. Используя многоканальные приборы, можно дифференцировать радиоактивное излучение, поступающее от разных источников; именно эти приборы применяются как при поисках и разведке радиоактивных элементов, так и для обнаружения потенциально опасных источников радиации.

Благодаря аэрорадиометрическим методам можно устанавливать региональные аномалии в распределении радиоактивных элементов. Эта методика с успехом применялась в районе Канадского щита для выявления перспективных участков, заслуживающих постановки более детальных поисково-разведочных работ. Наземная радиометрическая съемка позволяет обнаружить отдельные неглубоко залегающие месторождения радиоактивных элементов.

Этими методами можно пользоваться и при решении целого ряда проблем охраны окружающей среды, в первую очередь в тех случаях, когда приходится иметь дело с рассеиванием радиоактивных веществ из рудных отвалов или старых горных выработок. Радиометрические методы находят применение также при проверке наличия вредной для человека радиации вблизи реакторов и штабелей радиоактивной руды. Эманацию радона, выделяющуюся из зон разломов, используют как один из индикаторов для предсказания землетрясений.

8.2. ДИСТАНЦИОННЫЕ МЕТОДЫ

Аэро- и космическая съемка Земли с самолетов и искусственных спутников — богатейший источник информации об особенно-

стях поверхностных слоев литосферы и растительного покрова нашей планеты, а также о ее гидросфере и атмосфере. Многие из этих съемок выполняются с геологическими целями, а некоторые спутники («Ландсат», «Геосат» и др.) используются главным образом для сбора информации о природных ресурсах. Методы съемки, передачи и математической обработки данных, применяемые в таких исследованиях, развиваются большей частью по линиям оборонной промышленности, изучения космоса и совершенствования средств связи, причем соответствующие приборы устанавливаются на орбитальных спутниках или самолетах либо буксируются самолетами; одна из таких установок получила название «Бёрд» («Птица»).

Существуют разные цели применения дистанционных методов исследований в геологии. С их помощью мы получаем ценные сведения о характере рельефа и о геологическом строении малоизученных районов, которые могут быть использованы для повышения эффективности и снижения себестоимости наземных рекогносцировочных и поисковых работ. С применением этой методики стало возможным обнаружение структур, практически не выявляемых при наземных исследованиях. С помощью дистанционных наблюдений можно изучить некоторые особенности геологического строения тех регионов, о которых трудно получить представление, если ограничиться методами наземных поисков и съемки.

Остается рассмотреть методы, связанные с использованием излучения в широком диапазоне длин волн. Имеется в виду излучение Солнца или искусственных источников, транспортируемых на спутниках. Одиночный спутник, предназначенный для съемки какой-то определенной части земной поверхности, может охватить площадь 100×100 км; на одном же аэрофотоснимке, выполненном с высоты нескольких километров, фиксируется участок поверхности до 5 км^2.

В картографии и геологии широкое применение находят черно-белые и цветные фотоснимки, выполненные в видимой области спектра. С помощью стереоскопических насадок можно получить трехмерное изображение земной поверхности. После устранения оптических искажений (путем введения соответствующих коррекций) фотоснимок может служить основой для построения топографической карты.

На тех участках, где растительный покров редкий либо отсутствует вовсе, целый ряд геологических тел может быть приблизительно оконтурен на основе поверхностной окраски и текстуры пород, обусловленных характером выветривания и трещиноватости. С помощью фотоснимков изучают структурные особенности: элементы залегания пород, простирание складок и разрывных нарушений и т. д. Эти сведения можно получить по различным модификациям рельефа, обусловленным дифференциальной эрозией (рис. 8.3).

Даже для районов с густым растительным покровом или с преобладанием возделываемых земель по топографическим особенностям местности могут быть выявлены общие закономерности геологического строения; о слагающих эти районы породах можно составить представление также по изменениям растительного покрова. Позднее правильность интерпретации фотоматериалов корректируется сопоставлением с данными наземных съемок («наземный контроль»).

С помощью спектрограмм невидимой части спектра излучения можно обнаружить ряд особенностей, недоступных для непосред-

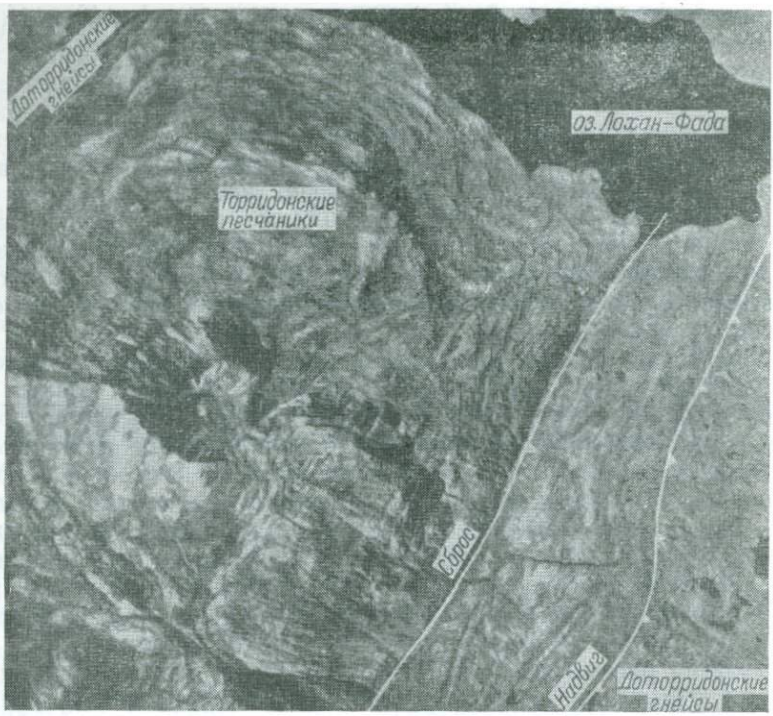


Рис. 8.3. Методика аэрогеологической съемки.

На аэрофотоснимке показан участок земной поверхности в северо-западной части Шотландии площадью несколько квадратных километров. К югу от оз. Лохан-Фада на основе наблюдения структур земной поверхности обнаружены субгоризонтально залегающие торридонские (верхнедокембрийские) песчаники, подстилаемые метаморфическими породами фундамента. Сброс север-северо-восточного простирания отделяет выходы пород торридонского возраста от кембрийских отложений, на которые надвинуты гнейсы фундамента.

ственного наблюдения. Полиспектральные (многозональные) изображения особенно наглядно отражают изменения состава и состояния растительного покрова; они используются при решении различных проблем экологии, сельского хозяйства и охраны окружающей среды. Особенно интересны с точки зрения геологической науки радиолокационные изображения (для получения которых облачный покров не является помехой), а также снимки, выполненные в инфракрасных лучах, с помощью которых можно обнаружить природные и искусственные источники тепла. Этот метод используется для выявления дымов, выделяемых промышленными объектами и рассеивающихся в атмосфере, а также сточных вод, содержащих различные жидкие отходы, спускаемые в озера, реки и эстуарии.

Дистанционные методы исследования представляют для нас особый интерес, так как они дают возможность фиксировать естественные либо связанные с деятельностью человека изменения, происходящие в определенные временны́е периоды: недели, месяцы

или годы. Для этого необходимо сопоставлять аэро- или космические фотоматериалы, полученные в разное время. Многим катастрофическим явлениям природы: землетрясениям, вулканическим извержениям или оползням — предшествуют поддающиеся наблюдению более медленные геологические процессы. Например, извержение вулкана может предваряться подъемом магмы из недр, что сопровождается возрастанием теплового излучения, которое может быть зафиксировано приборами с инфракрасными рецепторами. С высоты масштабы подобных явлений оцениваются более объективно. Благодаря дистанционной фотосъемке можно фиксировать и такие медленно протекающие процессы, как миграция песчаных отмелей или наступление пустынь на плодородные земли.

8.3. ИССЛЕДОВАНИЯ В СКВАЖИНАХ

Хотя структурно-геологический анализ и геофизические методы исследований позволяют нам получить достаточно верное представление о закономерностях залегания горных пород в земных недрах, все же только непосредственное изучение образцов этих пород, отобранных с более или менее значительных глубин от поверхности Земли, является наиболее надежным критерием проверки прогнозов, получаемых с помощью вышеописанных методов (см. разделы 8.1 и 8.2).

Бурение скважин — самый важный для геологов метод сбора информации о земных недрах — является и самым дорогостоящим. Бурение одной 7-километровой скважины в 1980 г. обошлось Англии в 6 млн. фунтов стерлингов. Мелкие скважины (глубиной несколько сотен метров) используются для проверки перспективных аномалий при поисках месторождений полезных ископаемых. Стенки эксплуатационных скважин для добычи воды или углеводородов, а также для получения геотермальной энергии, как правило, крепятся цементирующими веществами либо обсадными трубами. Большую часть этих скважин после завершения работ цементируют.

Бурение осуществляется при помощи буровых коронок, присоединяемых к бурильным трубам. Буровая коронка либо изготавливается из специальных твердых сплавов, либо высокая прочность ее обеспечивается включениями алмазов (алмазное бурение). Разрушение горных пород достигается в процессе вращения буровых коронок или долот. В качестве охлаждающего и смазочного материала используется либо обычная вода (главным образом в неглубоких скважинах), либо глинистый раствор, в который добавляют различные вещества, в том числе утяжелители, например барит.

Коренные породы выбуриваются либо в виде непрерывного столбика — керна, который через определенные промежутки времени извлекают на поверхность целиком, либо в виде обломков пород, выносимых из скважины вместе с глинистым раствором.

При разведке и разработке рудных месторождений большая часть керна извлекается ненарушенной. Наиболее широко в практике геолого-разведочных работ применяется алмазное бурение, при этом диаметр керна составляет, как правило, 2—6 см. На нефтяных месторождениях скважины обычно имеют больший диаметр и породы извлекаются главным образом в виде обломков. Сплошной керн здесь стараются получить только для наиболее важных частей разреза, например, когда скважина пересекает литологические границы или продуктивные горизонты.

Особенности геологического разреза, пройденного скважиной, фиксируются на каротажных диаграммах, где находят свое отражение характерные свойства пробуренных пород, а также литологические границы и глубины их залегания. Фиксируется и поступление шлама (мелких обломков пород) с глинистым раствором. Вслед за первоначальным изучением керна приступают к более детальным его исследованиям: извлекают и определяют содержащуюся в породах макро- и микрофауну, проводят комплексный анализ наиболее представительных образцов (в том числе изотопный).

Дополнительной задачей геофизических исследований скважин является определение направления их бурения (инклинометрия). Большинство скважин бурят вертикально, но при разведке некоторых полезных ископаемых применяют наклонное бурение. На практике отклонения от заданного направления могут достигать 90°. Поэтому необходимо иметь полное представление о фактическом направлении скважины, прежде чем оценивать истинную мощность и элементы залегания пробуренных пород.

8.4. ГЕОХИМИЧЕСКИЕ И МИНЕРАЛОГИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ

Колебания концентраций как главных, так и рассеянных элементов в горных породах, почвах и других субстанциях на земной поверхности отражают плодородие земли и дают первое представление о распространении полезных ископаемых в недрах. Геохимические методы поисков, при которых учитываются эти взаимосвязи, используются главным образом при поисках полезных ископаемых, а также при решении проблем сельского хозяйства, медицины и охраны окружающей среды от загрязнения.

Рекогносцировочные геохимические исследования, обычно охватывающие довольно обширные территории, основаны на опробовании различных толщ; затем эти данные обрабатываются с использованием статистических методов. В областях развития метаморфических и изверженных пород, для которых характерны незначительные колебания в их составе и свойствах, отбор образцов по определенной сетке (по взаимопересекающимся профилям) редко дает положительный эффект. Речные и озерные осадки, образовавшиеся в результате эрозии и переотложения коренных пород, с одной стороны, и поверхностных отложений — с другой, формируются в условиях водосборных бассейнов. Съемка, основанная на анализе русловых осадков, дает нам достаточно четкое

представление о закономерностях распространения многих химических элементов при плотности опробования одна-две точки на 1 км². Такая съемка часто сочетается с отбором проб речных вод, переносящих различные растворенные вещества, как минеральные, так и органические. В ряде случаев проводится опробование и растительного покрова (биогеохимическая съемка).

Тяжелые металлы обнаруживают в пробах при помощи проверенного временем поискового «старательского» метода — шлихования. Пробы рыхлых русловых осадков помещают в плоский ковш или лоток и промывают водной струей, достаточно сильной, чтобы смыть преобладающие по количеству частицы почвы, а также обломки таких минералов, как кварц, полевые шпаты, слюды, составляющие легкую фракцию (при этом мы можем получить дополнительные данные о составе пород, залегающих выше по течению).

Образцы грунта, часто отбираемые в очень большом количестве (например, при рекогносцировочных съемках на территории Англии и Уэльса было взято около 50 тыс. проб), анализируются экспресс-методами с применением достаточно точных автоматических приборов. Приборы-автоматы выполняют также спектральные анализы — определяют содержания в пробах до 35 химических элементов. Результаты аналитических исследований наносят на соответствующие карты и (или) на перфоленты.

Геохимические аномалии, выявленные на рекогносцировочной стадии изучения территории, становятся объектом дальнейших, более детальных исследований. Чаще всего при геохимической съемке имеют дело с металлами и некоторыми другими элементами, представляющими интерес для возможной постановки поисково-разведочных работ (к таким элементам относятся хром, медь, железо, никель, свинец, олово, уран, цинк). Кроме того, пристального внимания заслуживают химические элементы, связанные, как правило, с рудными месторождениями и получившие название элементов-указателей (например, ореолы аномальных концентраций мышьяка образуются вокруг сульфидных месторождений). Интересны также ассоциирующие друг с другом элементы, дающие ключ к познанию генезиса целого ряда горных пород в рудоносных районах. Наконец, при геохимических съемках, проводимых с целью изучения окружающей среды, фиксируются элементы, необходимые для правильного питания или, наоборот, вредные для животных и людей (свинец, кадмий, радиоактивные элементы).

Большинство элементов, обнаруживаемых в речных осадках, отражают в основном состав коренных пород, из которых они поступили. Тем не менее при интерпретации геохимических данных приходится учитывать, что некоторые элементы могут оказаться в аллювиальных отложениях в результате воздействия различных поверхностных процессов. Например, железо и марганец концентрируются в речных осадках там, где вода имеет повышенную кислотность и обогащена органическим веществом. Уран часто дает растворимые соединения в окислительной обстановке, так же как цинк, фтор и целый ряд других элементов; поэтому их концентрации в русловых осадках являются относительно пониженными. Дополнительные анализы речных вод и непосредственное изучение образцов донного грунта позволяют выявить «загрязнение» русловых осадков продуктами выветривания.

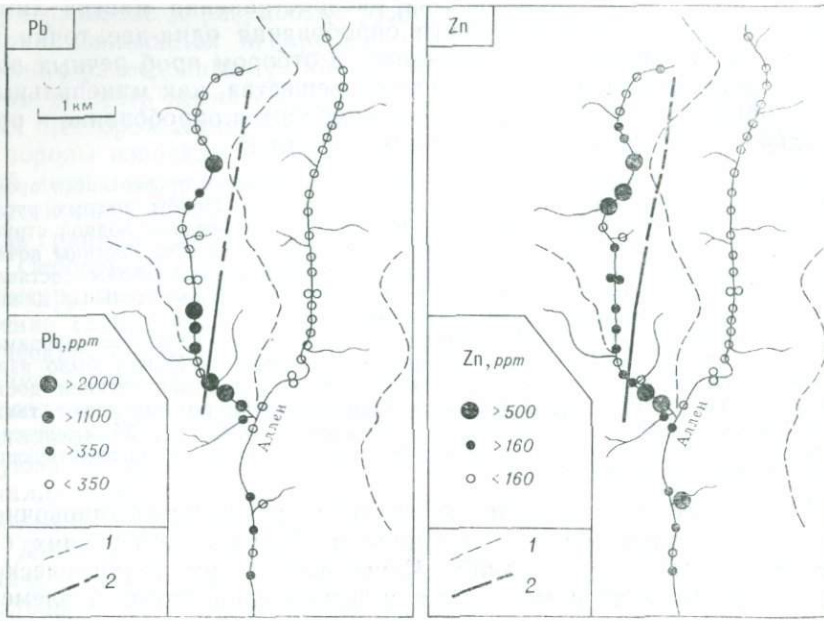


Рис. 8.4. Опробование русловых осадков (по неопубликованным данным М. Хейла).

В результате отбора проб по реке Аллен и ее притокам (к северу от города Труро, Юго-Западная Англия) было обнаружено высокое содержание свинца и цинка в осадках донного грунта вблизи жилы с полиметаллическим оруденением.
1 — бассейновый водораздел; *2* — рудоносная жила.

Если обнаружены в достаточно высоких концентрациях тяжелые металлы или уран в русловых осадках, необходимо продолжать детальное опробование отложений и вод с целью прослеживания аномалийных зон вверх по речной сети вплоть до источника этих элементов (рис. 8.4). В результате изучения приуроченных к речным руслам обломков коренных пород, продуктов выветривания и ледниковых отложений, а также тяжелых минералов, накапливающихся в русловых осадках, можно обнаружить рудные или жильные минералы либо характерные минералы — спутники залежей полезных ископаемых. Примером минералов-спутников может служить магнезиальный гранат пироп, часто встречающийся в кимберлитах, в то время как в большинстве других пород он довольно редок. Эти гранаты присутствуют в кимберлитах в значительно большем количестве, чем алмазы, поэтому они служат прекрасным ориентиром при поисках алмазов.

В тех случаях, когда изучение геохимических аномалий имеет своей целью оценить опасность, которой подвергается окружающая среда, внимание исследователя должно быть обращено в первую очередь на такие объекты, как почвы, поверхностные и грунтовые воды, атмосферная пыль и скопления различных отходов. Дело в том, что растительные и животные организмы в основном

усваивают те химические элементы, которые рассеяны в перечисленных субстанциях.

Для того чтобы получить представление о составе и в конечном итоге оценить качество водных ресурсов, степень загрязнения очистных вод и других стоков, осуществляют стандартное опробование, химический и другие виды анализов. Подобная методика используется также для регистрации изменений, связанных с профилактическими мероприятиями, например с обособлением городской свалки. При этом определяют значения таких показателей, как pH, Eh, и устанавливают содержание растворенных органических веществ, токсичных металлов и микроорганизмов.

9. ЗАКЛЮЧЕНИЕ. РОЛЬ ЧЕЛОВЕКА В ГЕОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССАХ

В ходе написания этой книги автору пришлось пересмотреть свою оценку воздействия человека на геологические процессы. В связи с этим граница между теми процессами, которые можно квалифицировать как природные, и теми из них, на которых сказываются результаты человеческой деятельности, представляется не такой уж резкой. В наше время человек является доминирующим по своей роли видом биосферы, причем переход человеческого общества на стадию широкого индустриального развития оказал воздействие на геологические процессы не меньшее, чем в палеозойское время — эволюция породообразующих многоклеточных организмов или в позднепалеозойское — появление развитых форм наземной растительности.

Независимо от нашей воли и желания человек выступает в роли геологического фактора и, будучи таковым, он взаимодействует с другими факторами как на суше, так и (в меньшей степени) на море. При изучении влияния человека на геологические процессы следует учитывать три специфические особенности:

— во-первых, это влияние затрагивает почти каждую среду обитания на поверхности земного шара;

— во-вторых, по шкале геологического времени длительность этого влияния еще весьма короткая;

— в-третьих, это влияние в общем является контролируемым, т. е. может быть ограничено разумными пределами.

Поскольку в каждой из предыдущих глав книги мы рассматривали по отдельности различные природные ресурсы и в связи с этим разные аспекты человеческой деятельности, по-видимому, не сложилось общего впечатления о том, насколько существенно сказалось воздействие человека на геологические процессы в целом. Степень этого воздействия определяется потребностями человечества в природном сырье и изменениями земных ландшафтов применительно к тем или иным нуждам человеческого общества.

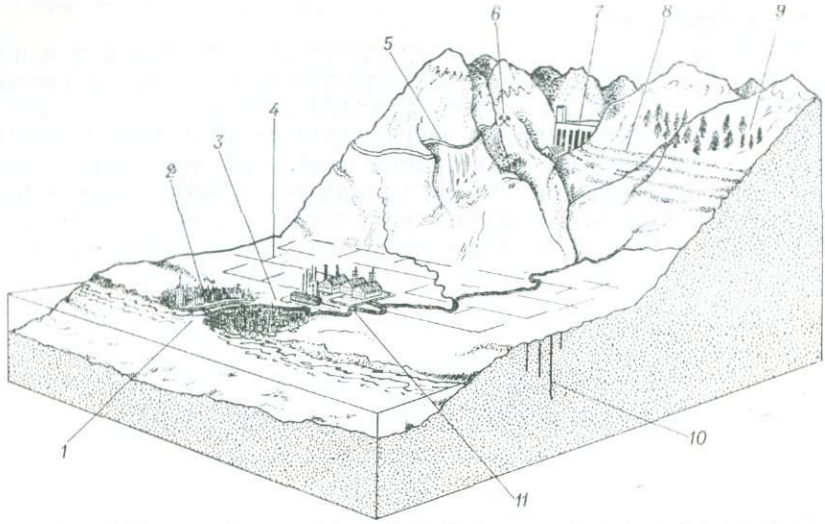


Рис. 9.1. Режим речной системы. Природный и искусственный режимы реки на всем ее протяжении (блок-диаграмма).

1 — водный поток, регулируемый в эстуариях путем дренирования и сооружения плотины (контроль над паводками, регулирование судоходства); *2* — город, испытывающий постоянную потребность в воде, что ставит проблему очистки сточных и отработанных промышленных вод (при решении вопроса об удовлетворении городских нужд необходимо предусмотреть опасность истощения водоносного горизонта и поступления туда соленых вод); *3* — грунтовые воды в низинах, где необходимо предохранять от загрязнения аллювиальные отложения; *4* — интенсивное развитие сельского хозяйства в равнинной местности, где приходится использовать ирригацию и вносить удобрения в почву (следует учитывать возможность поступления некоторого количества удобрений в речную сеть); *5* — дорожное строительство, связанное с работой рудников (надо считаться с опасностью оползней); *6* — металлы, выщелачиваемые из рудных штабелей и отвалов, они могут проникать в речную сеть (эта опасность существует при эксплуатации практически любого рудника); *7* — водохранилища и гидроэлектростанции (их сооружение вносит изменения в режим грунтовых вод, а нагрузка, создаваемая плотиной, может повлиять на устойчивость грунта); *8* — террасное земледелие на крутых склонах (может привести к эрозии почвы); *9* — лесонасаждения, благодаря которым сток на водосборной площади может уменьшаться; *10* — мелкие скважины (в результате их эксплуатации аллювий может быть обеднен грунтовыми водами); *11* — индустриальный комплекс, использующий чистые природные воды и возвращающий загрязненные, которые требуют тщательной очистки.

Чтобы иметь полное представление о взаимодействии человека и природы, нужно мысленно сопоставить различные проявления человеческой деятельности с целым рядом нарушений геологического равновесия. Эти процессы происходят, например, в таких природных регионах, как дельты или прибрежные равнины (рис. 9.1, 9.2).

Совершенно очевидна необходимость детального планирования и координации различных преобразований, затрагивающих в той или иной степени окружающую среду. При отсутствии должной координации могут возникнуть разрушительные геологические процессы; при соблюдении же необходимых условий удается свести к минимуму нежелательные побочные явления. Геологическая экспертиза при планировании и координации мероприятий, связанных с изменениями окружающей среды, должна проходить в три этапа.

Рис. 9.2. Река, разветвляющаяся на многочисленные рукава (Ирак).

На аэрофотоснимке видна многократная миграция русла реки, в результате чего поселки могут быть разрушены и возделываемые земли размыты.

В первую очередь следует получить все исходные данные об исследуемой территории на основе геологических, геофизических и геохимических карт и отчетов. Второй этап связан с обнаружением полезных ископаемых (горючих, металлов, стройматериалов и др.) и подсчетом их запасов, а также с выбором наиболее подходящих мест для строительства тех или иных объектов, например гидростанций. На третьем этапе необходимо дать оценку всем природным ресурсам и иметь точный прогноз, как скажутся на различных геологических явлениях уже существующие или только проектируемые сооружения. При прогнозировании особое внимание следует обратить на потенциально опасные геологические процессы.

В сбор необходимой информации по всем этим вопросам большой вклад вносят международные научные объединения (особенно в области морской геологии), а также исследователи, работающие в системе национальных академий наук. Однако основную ответственность за успешное разрешение указанных проблем несут официальные организации, назначаемые правительствами разных стран.

Добыча полезных ископаемых и выбор мест заложения строительных объектов обычно находятся в ведении специальных государственных учреждений (особенно это характерно для стран со-

циалистического содружества), международных и национальных компаний по разработке нефтяных и рудных месторождений, а также частных инженерно-строительных фирм. На заключительной стадии оценки и прогнозирования ресурсов полезных ископаемых приходится учитывать не только геологические, но и политические, социальные и экономические факторы. Значимость каждого фактора определяется тем, с какого рода организацией мы имеем дело, а также особенностями политической и экономической обстановки и, что весьма существенно, деловыми качествами людей, от которых зависит претворение в жизнь этих проектов.

Остается только пожалеть, что как правительственные, так и частные объединения, на которые возлагается ответственность за решение тех или иных геологических проблем, почти никогда не имеют в своем составе специалистов в области наук о Земле. В такой ситуации представляется особенно важным, чтобы среди руководителей указанных организаций, а также среди широкого круга исполнителей были лица, если и не имеющие специального геологического образования, то хотя бы располагающие основными познаниями в области геологии. Трудности составления верных долгосрочных прогнозов воздействия человека на те или иные природные процессы связаны еще и с тем, что по шкале геологического времени эти воздействия протекают чрезвычайно медленно по сравнению с кратковременностью человеческой жизни.

Представление о природном ландшафте как о чем-то неизменном («стар как холмы») настолько глубоко укоренилось в нашем сознании, что мы поневоле часто забываем учитывать «врожденную» неустойчивость большинства сред на земной поверхности. В действительности же многие геологические события завершаются в пределах отрезков времени, измеряемых годами или даже днями, а замедленность геологических изменений относится не к самим событиям, а к длительным временным промежуткам, разделяющим эти события. Из сопоставления периодов времени, в течение которых происходят те или иные события, природные, с одной стороны, и обусловленные вмешательством человека — с другой, видно, что, например, частота катастрофических землетрясений, наводнений и вулканических извержений, соответствует частоте таких случаев, как прорывы плотин или обвалы на шахтах (табл. 9.1).

При прогнозировании необходимо учитывать и менее разрушительные процессы, связанные, например, с подъемом и понижением уровня Мирового океана либо с формированием песчаных баров, которые, однако, обусловливают значительные изменения, сказывающиеся спустя несколько столетий. От традиционных представлений о «стабильности» земного шара приходится отказаться — к этому приводит нас изучение длительных геологических процессов.

Большое беспокойство вызывает еще и тот факт, что многие источники традиционных горючих и рудных ископаемых, добываемых из земных недр, иссякнут, по-видимому, на протяжении жизни нескольких поколений. Вообще говоря, большинство горных по-

Таблица 9.1. **Сопоставление с временной шкалой различных событий, природных и связанных с деятельностью человека**

Минимальная продолжительность	События (курсивом выделены события, связанные с деятельностью человека)
Сутки и менее	Падение метеоритов.
	Землетрясения, оползни, грязевые потоки.
	Обвалы в шахтах и на рудниках.
	Ливневые паводки; *прорывы плотин.*
	Штормы, мутьевые потоки, эксплозивные вулканические извержения, пирокластические потоки.
	Обрушение горных пород в результате взрывов на шахтах и на рудниках
	Вулканическая деятельность.
	Эрозия почвы; перемещение холмов.
	Загрязнение речных и озерных водоемов.
Десятилетие	Миграция песчаных баров и отмелей.
	Заиливание гаваней.
	Истощение водоносных горизонтов, проникновение в них соленых вод.
	Распад короткоживущих радиоактивных изотопов
Столетие	Разрастание (спрединг) морского дна более чем на 10 м.
	Подъем или понижение уровня Мирового океана.
	Изменения климата.
	Аккумуляция торфа, аллювиальных и пляжевых отложений.
	Распад долгоживущих радиоактивных изотопов
Миллион лет	Разрастание морского дна более чем на 100 км.
	Эволюция новых видов (флоры и фауны).
	Созревание нефти и угля.
	Накопление мощных осадочных толщ.
	Формирование крупных вулканов.
	Рудообразующие процессы

род и других природных веществ относятся к возобновляемым ресурсам, поскольку процессы, обусловившие их формирование, продолжают действовать. Однако естественные скорости их восстановления могут оказаться настолько малыми по сравнению со скоростями потребления, что по существу эти ресурсы можно считать невосполнимыми. Что же касается сравнительно быстро восстанавливающихся ресуров, таких как вода или питательные вещества почвы, то создается впечатление, что их баланс в глобальном масштабе в основном сохраняется, однако в разные периоды времени и в разных местах земного шара то и дело отмечается их резкая нехватка.

Огромные массы природных стройматериалов сохранились до наших дней, тем не менее во многих развитых странах, т. е. именно там, где на них существует максимальный спрос, они зачастую становятся дефицитными. Традиционные ресурсы практически всех горючих ископаемых и ряда металлов, как предполагают многие специалисты, будут исчерпаны в обозримом будущем. Хотя представляется вполне вероятным, что сырье будет посту-

пать из этих источников в течение более длительного времени благодаря открытию новых месторождений, совершенствованию методов добычи и обогащения, тем не менее полностью ликвидировать разрыв между скоростью восстановления и темпами потребления природных ресурсов практически невозможно.

Общее количество рудных полезных ископаемых, извлеченных из недр за всю историю человечества, оказывается, однако, незначительным по сравнению с количеством этих руд, содержащихся в верхних слоях земной коры и в Мировом океане. Так, например, учтенные 100 тыс. тонн золота, добытого во всем мире за пять веков со времени открытия Америки, едва ли соизмеримы с 10 млрд. тонн этого металла, растворенными в водах Мирового океана. На основании подобных сопоставлений мы убеждаемся в том, что ресурсы, относящиеся в настоящее время к нетрадиционным (разработка их сейчас еще нерентабельна), могут приобрести решающее значение в будущем. При современном уровне технологии получение металлов из бедных руд, особенно из силикатных минералов, оказывается очень дорогостоящим, так как требует огромных энергетических затрат. Если бы стало возможно извлекать их из подобных источников со значительно меньшими затратами, это сразу же избавило бы нас от нехватки многих материалов, которую мы так резко ощущаем.

Что касается горючих ископаемых, то нетрадиционные их источники — битуминозные сланцы или нефте- и битумонасыщенные песчаники представляют собой огромные ресурсы углеводородов, которые только недавно начали разрабатываться в значительных масштабах. Радиоактивный элемент уран — основа атомной энергетики — также широко распространен во многих горных породах, из которых его в конце концов научатся извлекать.

С геологической точки зрения никоим образом нельзя утверждать, что земные ресурсы вскоре окажутся истощенными. Вся трудность заключается в том, что еще не разработана технология для рентабельной добычи ряда полезных ископаемых из тех или иных источников. При разработке новых методов, призванных обеспечить наилучшее использование ресурсов земного шара в ближайшие несколько столетий, необходимо учитывать все геологические данные. При этом следует иметь в виду, что внедрение новых методов в практику является сложным и длительным процессом. Так, первую и последнюю стадии подготовки нового угольного месторождения к разработке в Англии разделяет более десятилетия.

При освоении старых и новых видов земных ресурсов должны быть предприняты более согласованные усилия для поддержания и восстановления геологического равновесия, нарушенного в результате деятельности человека. Однако, чтобы должным образом контролировать или модифицировать какой-то геологический процесс, необходимо вначале четко представить себе его сущность. Поэтому в различных научных и практических отраслях геологи работают в тесном контакте со специалистами по смежным дисциплинам.

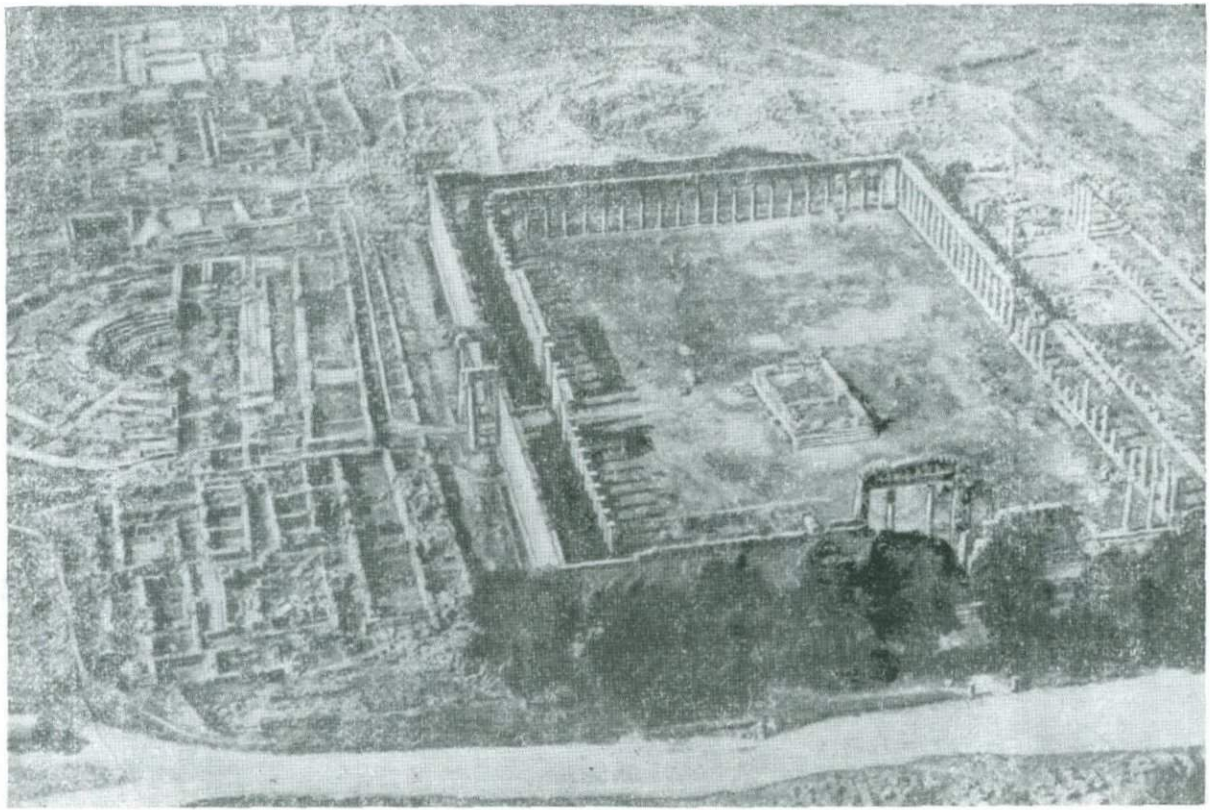


Рис. 9.3. Изменения климата в прошлом.

Эти развалины — все, что осталось от некогда цветущего города Киренаика, от тех далеких времен, когда Северная Африка была основным поставщиком зерна для Римской империи (аэрофотоснимок).

В качестве примеров тех проблем, решение которых тормозится из-за отсутствия необходимого комплекса данных, можно привести следующие:

— реакция окружающей среды на заполнение пористого горизонта раствором, отличным по составу от первичной поровой жидкости;

— распространение и изменчивость по площади и по разрезу глубоководных металлоносных осадков;

— зависимость здоровья людей и животных от химического состава почвы;

— поведение радиоактивных элементов в условиях земной поверхности.

Из этих примеров видно, что остается невыясненным очень широкий круг вопросов; в будущем же нам придется разрешать все новые и новые проблемы. Конечный результат длительных процессов, например, степень изменения природных ландшафтов в результате осуществления таких региональных проектов, как мелиорация земель в Нидерландах, вообще невозможно прогнозировать сейчас с достаточной точностью. Развитие атомной энергетики, благодаря которой удается в значительной мере преодолевать «энергетический голод», с особой остротой ставит вопрос о надежном захоронении отходов атомного сырья.

Крайне важной является проблема климата. Сущность ее заключается в том, что климатические условия в будущем окажутся, по всей вероятности, столь же изменчивыми, как и в прошлом (рис. 9,3). На эту проблему стоит обратить особое внимание. Скорость и перепад возможного повышения (или понижения) среднегодовой температуры и амплитуда колебаний уровня Мирового океана в результате отступания (или нарастания) покрова полярных льдов могут быть предположительно вычислены на основе сопоставлений с данными послеледникового периода. Практическое воздействие этих факторов на водные ресурсы, сельское хозяйство, на устойчивость густонаселенных прибрежных зон — все эти проблемы остаются нерешенными, так же как и вопрос о возможном влиянии на климат повышенного выделения углекислого газа при сгорании угля и нефти.

В областях знания, связанных с изучением Земли, мы не можем выделять чистую и прикладную науку: каждая научная отрасль должна быть прикладной, т. е. должна служить нуждам человечества. На ученых всей планеты лежит определенная доля ответственности за те решения, которые принимаются сейчас или будут приняты в будущем.

Может быть, уместно закончить эту книгу высказыванием участника конференции по проблемам загрязнения атмосферы М. У. Холдгейта [Holdgate M. W., 1979 г.]: «Наша цель в конечном счете состоит в том, чтобы оценить опасность загрязнения атмосферы. Какую бы технологию мы ни использовали, полностью устранить эту опасность невозможно. Единственное, чего мы можем достигнуть,— это установить, чем именно мы рискуем в том или ином случае и к каким пагубным изменениям это может привести. В конце концов, чем-то все равно придется рискнуть или пожертвовать, но самое важное — знать, что́ мы делаем».

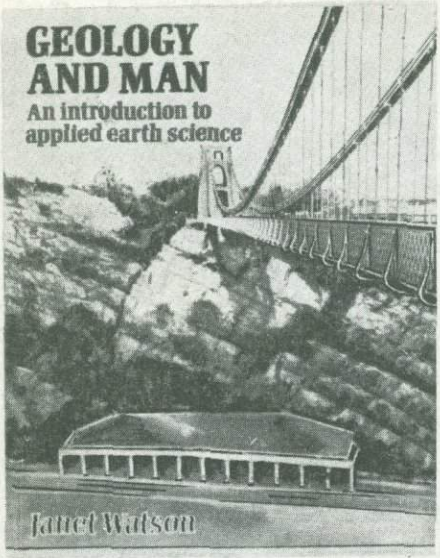
ОГЛАВЛЕНИЕ

От переводчика . . . 5
Предисловие . . . 6
1. Человек и Земля . . . 8
1.1 Введение . . . —
1.2. Ресурсы . . . 9
1.3. Нарушение геологического равновесия . . . 13
2. Вода . . . 15
2.1. Введение . . . —
2.2. Взаимоотношение атмосферы и гидросферы . . . 21
2.3. Взаимосвязь поверхностных и подземных вод . . . 22
2.4. Пористость и проницаемость . . . 24
2.5. Поток подземных вод . . . 26
2.6. Рациональное использование водных ресурсов . . . —
3. Энергетические ресурсы . . . 32
3.1. Ресурсы возобновляемые и невозобновляемые . . . —
3.2. Гидроэлектрическая энергия . . . 33
3.3. Геотермальная энергия . . . 34
3.4. Ядерное топливо . . . 36
3.5. Горючие ископаемые. Нефть и газ . . . 38
3.6. Горючие ископаемые. Угленосные формации . . . 59
4. Металлы и их ресурсы . . . 67
4.1. Введение . . . —
4.2. Разведка рудных месторождений . . . 74
4.3. Месторождения, связанные с магматической деятельностью . . . 76
4.4. Рудные месторождения, связанные с процессами седиментации, диагенеза и выветривания . . . 85
4.5. Взаимосвязь между процессами рудообразования, метаморфизма и тектогенеза . . . 95
4.6. Гидротермальные жильные системы . . . 96
5. Неметаллическое сырье . . . 98
5.1. Введение . . . —
5.2. Строительные материалы . . . 99
5.3. Керамическое сырье, огнеупорные материалы и наполнители . . . 105
5.4. Органические химикалии и продукты нефтехимического синтеза . . . 107
5.5. Производные эвапоритов . . . 108
5.6. Фосфориты . . . 111
5.7. Драгоценные, поделочные и декоративные камни . . . 112
6. Геологические аспекты инженерно-строительных работ . . . 117
6.1. Вопросы устойчивости режима земной поверхности . . . —
6.2. Проявления нарушений природного равновесия . . . 118
6.3. Водохранилища и регулирование режима рек . . . 131
6.4. Прибрежные зоны . . . 136
6.5. Ресурсы дна Мирового океана . . . 139
6.6. Физико-механические свойства горных пород . . . 141
7. Взаимодействие с биосферой . . . 143
7.1. Геологические процессы в биосфере . . . —
7.2. Почвы . . . —
7.3. Обработка и охрана почв . . . 150
7.4. Геохимические факторы в жизни растений, животных и человека . . . 152
7.5. Минералы, приносящие вред здоровью человека . . . 157
7.6. Загрязнение окружающей среды, вопросы размещения вредных отходов 158
8. Методы поисково-разведочных исследований . . . 162
8.1. Геофизические методы . . . 164
8.2. Дистанционные методы . . . 171
8.3. Исследования в скважинах . . . 173
8.4. Геохимические и минералогические методы . . . 174
9. Заключение. Роль человека в геологических процессах . . . 177

ин-т геол.

4830

65 коп.



Книгу «Геология и человек» можно рассматривать как своеобразное введение в курс наук о Земле, в познание тайн нашей планеты. Чтобы сохранять окружающий нас мир, надо знать и понимать его.

Автор этой книги Джанет Уотсон — профессор геологии Британского колледжа науки и техники в Лондоне, член Королевского общества содействия развитию естествознания, председатель Лондонского геологического общества.

В Ленинградском отделении издательства «Недра» в 1981 году вышла книга Г. Рида и Дж. Уотсон «История Земли».

«НЕДРА»